

La Sanidad Vegetal en la Agricultura y la Silvicultura

Retos y
perspectivas
para la próxima
década



AUTORES

Rafael M. Jiménez Díaz,
María Milagros López y
Ramon Albajes

LA SANIDAD VEGETAL EN LA AGRICULTURA Y LA SILVICULTURA: RETOS Y PERSPECTIVAS PARA LA PRÓXIMA DÉCADA

Real Academia de Ingeniería de España

AUTORES

Rafael M. Jiménez Díaz¹, María Milagros López²
y Ramon Albajes³

¹ Catedrático Emérito de Patología Vegetal. Departamento de Agronomía, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y de Montes, Universidad de Córdoba

² Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). Centro de Protección Vegetal y Biotecnología. Departamento de Bacteriología (jubilada). Moncada, Valencia.

³ Agrotecnio y Universitat de Lleida, Lleida



Real
Academia
de Ingeniería





Real
Academia
de Ingeniería



La sanidad vegetal en la agricultura y la silvicultura: retos y perspectivas para la próxima década

Obra producida en el ámbito de la subvención concedida a la Real Academia de Ingeniería por el Ministerio de Ciencia e Innovación

EDITA:
REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA DE ESPAÑA
www.raing.es

Primera edición: junio de 2023.
Edición no venal.

AUTORES

Rafael M. Jiménez Díaz, María Milagros López y Ramon Albajes.

Esta publicación ha sido presentada en la sede de la Real Academia de Ingeniería de España el día 20 de junio de 2023.

Esta publicación ha sido revisada por los académicos Elías Fereres, Ana Conesa e Ignacio Romagosa.

El contenido, los análisis y recomendaciones recogidos en este documento son responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente de las instituciones a las que pertenecen.

El presente libro no es un informe de asesoría. Las decisiones de carácter teórico, económico y estratégico o comercial de las empresas son responsabilidad exclusiva de sus gestores.

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0
Reconocimiento - No comercial - Compartir 4.0
(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

© De los textos: sus autores.

© De las imágenes y gráficos: sus autores.

DEPÓSITO LEGAL: M-18095-2023
ISBN: 978-84-95662-89-7

Diseño y maquetación de la colección: mgráfico
Impreso en España por Imprenta DOCECALLES



Pie de imágenes de la cubierta:

- Mejoras en la aplicación de PP. FF. mediante tecnologías de agricultura de precisión (Cortesía de C. Román).
- Frutos con decoloración de melocotonero afectado por la sharka causada por el virus de la viruela del ciruelo (PPV) (Cortesía de M. Cambra).
- Mosca sírfida que, además de ser depredadora de plagas, es un polinizador eficiente (Cortesía de J. Avilla).
- Nodulaciones en raíces de melocotonero causadas por nematodos del género *Meloidogyne* (Cortesía de P. Castillo).
- Adulto de la polilla del boj, *Cydalima perspectalis*, plaga invasora en ecosistemas forestales de Europa (Cortesía de M. Eizaguirre).
- Células de la bacteria *Xylella fastidiosa* en el lumen de un vaso de xilema de vid (Cortesía de L. de la Fuente).
- Naranjos afectados por huanglongbing ('*Candidatus Liberibacter* spp.') mostrando los nuevos brotes amarillos (Cortesía de J. Bové).
- Sintomas de rizado amarillo de la hoja causado por el virus (*Tomato Yellow Leaf Curl virus*, TYLCV) (Cortesía de E. Moriones).
- Infestación de la mala hierba invasora *Amaranthus palmeri* en un cultivo de maíz (Cortesía de J. Recasens).
- Colonia de una especie del género fúngico *Trichoderma* efectiva en el control biológico de enfermedades causadas por hongos y oomicetos (Cortesía de E. Monte).



Real
Academia
de Ingeniería

La Real Academia de Ingeniería de España

La Real Academia de Ingeniería, creada en 1994, tiene como fines promover la calidad y la competencia de la Ingeniería española y fomentar el estudio, la investigación, la discusión y la difusión de sus técnicas y de sus fundamentos científicos y sociales. Para cumplir estos objetivos, entre otras actividades, realiza estudios y emite informes y dictámenes. Su ámbito territorial es el Reino de España, sin perjuicio de la posibilidad de realizar actividades en el exterior o establecer relaciones de colaboración con entidades extranjeras de carácter análogo o complementario.



AGROTECNIO

Agrotecnio es un instituto de investigación perteneciente a la red CERCA de centros de excelencia de la Generalitat de Catalunya. Está situado en el Campus Agroalimentario, Forestal y Veterinario de la Universitat de Lleida (UdL). Fue creado en 2012, como evolución de los antiguos centros UPC-IRTA (Universitat Politècnica de Catalunya - Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries) y UdL-IRTA, en funcionamiento desde los años 80 del pasado siglo. Su actividad se centra en el estudio de los desafíos actuales y futuros en la cadena de producción de alimentos y piensos de una manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente, mediante el empleo de investigación multidisciplinaria y de vanguardia. Su Patronato está compuesto por autoridades de los Departaments d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural, que lo preside, y de Recerca i Universitats, así como de la propia UdL.



Presentación del Presidente de la Real Academia de Ingeniería

A pesar del indudable progreso experimentado en los últimos decenios en abastecer a la población mundial con una cantidad y calidad de alimentos suficientes, el sistema agroalimentario mundial sigue mostrando repetidamente sus debilidades a lo largo de toda la cadena alimentaria, desde la producción agrícola y ganadera hasta llegar al consumidor. Las plagas, malas hierbas y enfermedades de los cultivos, por ejemplo, causan pérdidas económicas sustanciales, siendo particularmente más elevadas en áreas agrícolas desfavorecidas. La FAO calcula que las mermas en la producción, según regiones y cultivos, representan alrededor del 25% de la producción y se ha estimado que pueden llegar a suponer anualmente más de 250 mil millones de dólares de quebranto a la economía global.

La Sanidad Vegetal, a través de la protección de los cultivos y masas forestales, es una parte sustancial de las disciplinas científicas y tecnologías que sustentan la agricultura y la silvicultura, tratándose de una materia crítica para garantizar la seguridad alimentaria mundial. La Sociedad necesita aumentar notablemente la productividad de la agricultura y silvicultura y hacer compatible este aumento con la sostenibilidad de los nuevos métodos y técnicas que vamos introduciendo. En ese marco general, se inserta la Sanidad Vegetal cuyo progreso ha sido particularmente sensible a la doble vertiente productiva y sostenible. Pero, la Sanidad Vegetal no sólo se centra en la protección de los cultivos alimentarios o de las masas forestales, también de otros cultivos de interés creciente, tales como fibra, maderas especiales, corcho, biocombustible, biomasa para la absorción de CO₂, algunos medicamentos, y de una variada gama de servicios medioambientales.

Para cumplir sus fines fundacionales, la Academia, entre otras actividades, publica libros para potenciar el debate técnico multidisciplinar entre academia y sociedad. Con este fin, la Academia encomendó esta obra a tres ingenieros agrónomos, reconocidos especialistas en la temática abordada que creemos que han sabido encontrar un magnífico equilibrio entre el rigor técnico y la accesibilidad para nuestros miembros y seguidores. Estamos convencidos que este trabajo contribuirá a la promoción y difusión de la

Ingeniería, particularmente agronómica y forestal, en nuestra sociedad y, por tanto, sirviendo a los fines de nuestra Academia. Por ello, queremos expresarles el reconocimiento de la Academia de Ingeniería.

Quiero finalizar agradeciendo a todos los colaboradores, evaluadores y académicos que desinteresadamente lo han revisado en profundidad; así como al Centro de Investigación en Agrotecnología, Agrotecnio, pertenecientes a la red de centros de excelencia CERCA de la Generalitat de Catalunya, por el apoyo que ha hecho posible la realización del mismo.

Antonio Colino Martínez
Presidente de la Real Academia de Ingeniería de España

Agradecimientos

Deseamos dedicar este libro a los pioneros de la Sanidad Vegetal en España que fueron nuestros maestros, y a los estudiosos que en la actualidad están comprometidos con su conocimiento y práctica profesional.

Sine agricultura nihil est; sine plantarum sanitate, nulla agricultura

Los tres autores de esta obra quieren agradecer, en primer lugar, a la Real Academia de Ingeniería de España y en particular a uno de sus miembros, el Profesor Ignacio Romagosa, su propuesta de escribir unas reflexiones acerca de la Sanidad Vegetal con motivo de la celebración del Año Internacional de la Sanidad Vegetal, decretado por la FAO en 2020 y prolongado posteriormente a 2021. A medida que iba avanzando la redacción de nuestras reflexiones, lo que en primer lugar pretendía ser un documento-informe de unas páginas de extensión se ha convertido en el libro que el lector tiene en sus manos. En nuestro agradecimiento a la Real Academia de Ingeniería queremos incluir explícitamente a los tres académicos que han avalado nuestro proyecto y que con su visión amplia de la agricultura y la silvicultura han aportado ideas para la mejora de la obra: los profesores Elías Fereres, Ana Conesa e Ignacio Romagosa.

En segundo lugar, deseamos expresar nuestro agradecimiento al Dr. Juan Antonio Navas Cortés, que ha sido el autor de los apartados sobre la Epidemiología de

las enfermedades de plantas en el capítulo C5, dada su reconocida experiencia en la materia. Asimismo, agradecemos a los colegas que han intervenido como revisores de los distintos capítulos del Libro y que se relacionan al final de este apartado, su disposición generosa y su disponibilidad, lo que nos ha permitido completar y mejorar su contenido. Los revisores de cada capítulo son reconocidos especialistas en las respectivas temáticas. Ello no obsta para que la responsabilidad del contenido final del Libro sea únicamente de los tres autores del mismo. Asimismo, agradecemos la colaboración puntual de colegas como los Drs. Ana Palacio-Bielsa y Mariano Cambra que nos han suministrado la información que les hemos solicitado sobre trabajos no publicados o no disponibles. Animamos a los lectores de esta obra para que nos hagan llegar los errores u omisiones que encuentren en esta versión, que serán tenidos en cuenta en una eventual re-edición mejorada del Libro, colaboración que les agradecemos de antemano.

Finalmente, también queremos agradecer la incentivación y ayuda que nos ha brindado el Centro de Investigación en Agrotecnología de Lleida, Agrotecnio Center, uno de los centros CERCA (www.cerca.cat) de investigación de excelencia de la Generalitat de Catalunya y adscrito al Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural. Este Centro, además de financiar los encuentros presenciales de los tres autores, ha permitido sufragar parte de los gastos de edición del Libro.



Relación de revisores, con indicación del capítulo en el que han intervenido

Capítulos	Revisores	Afiliación de los revisores
A1 y A2	<i>Fernando García-Arenal</i> <i>Enrique Quesada</i> <i>Jordi Recasens</i> <i>Bàrbara Baraibar</i>	Centro de Biotecnología y Genómica de Plantas, Univ. Politécnica de Madrid. Madrid Univ. de Córdoba, Córdoba Univ. de Lleida, Agrotecnio, Lleida Univ. de Lleida, Agrotecnio Center, Lleida
B1	<i>Emilio Rodríguez-Cerezo</i> <i>Antonio Vicent</i> <i>Matilde Eizaguirre</i>	E.U. Joint Research Centre, Sevilla Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, Moncada, Valencia Univ. de Lleida, Agrotecnio Center, Lleida
B2	<i>Maria Lodovica Gullino</i> <i>Alberto Fereres</i>	Univ. di Torino, Agroinnova, Torino Instituto de Ciencias Agrarias, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid
B3	<i>José Luis Alonso Prados</i>	Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Unidad de Productos Fitosanitarios, Madrid
B4	<i>Vicente Dalmau</i>	Servicio de Sanidad Vegetal, Generalitat Valenciana, Valencia
C1	<i>Mariano Cambra</i> <i>Núria Agustí</i> <i>Jordi Recasens</i>	Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, Moncada, Valencia Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries, Centre de Cabrils, Cabrils, Barcelona Univ. de Lleida, Agrotecnio, Lleida
C2	<i>Emilio Gil</i>	Univ. Politècnica de Catalunya, Barcelona
C3	<i>Antonio Molina</i> <i>Josep Jaques</i>	Centro de Biotecnología y Genómica de Plantas, Univ. Politécnica de Madrid. Madrid Univ. Jaume I, Castelló de la Plana
C4	<i>Cristina Castañé</i> <i>Emili Montesinos</i>	Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries, Centre de Cabrils, Cabrils, Barcelona Univ. de Girona, Institut de Tecnologia Agroalimentària, Girona
C6	<i>Mariano Cambra</i> <i>Òscar Alomar</i>	Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, Moncada, Valencia Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries, Centre de Cabrils, Cabrils, Barcelona

Prólogo

Este libro pretende mostrar resumidamente al lector no familiarizado con la Sanidad Vegetal el papel que esta desempeña en la agricultura y la silvicultura y vislumbrar el que puede tener en el futuro próximo, para el que se anuncian cambios sustanciales en el sistema agroalimentario mundial. La oportunidad de dicho objetivo es doble. De una parte, por la relevancia que la Asamblea General de la Naciones Unidas reconoció a la Sanidad Vegetal al declarar el 2020 como Año Internacional de la Sanidad Vegetal, celebración que fue prolongada en 2021 como consecuencia de la pandemia causada por la COVID 19. De otra parte, por la mayor sensibilización hacia los patógenos humanos de gran parte de la sociedad ante los problemas creados por dicha pandemia, que como es bien sabido está causada por el coronavirus SARS-CoV-2 de presumible origen animal. En paralelo, el estado sanitario de los cultivos y las masas forestales está siendo permanentemente afectado o amenazado por cientos de especies nocivas de virus y viroides, bacterias, hongos y oomicetos, nematodos, y artrópodos fitófagos que causan enfermedades y plagas, - algunas consideradas incluso como pandemias-, y de malas hierbas que compiten con las plantas cultivadas y masas forestales por los recursos que determinan su rendimiento y provisión de los servicios agroecosistémicos. La concienciación social en los países del mundo desarrollado de que una alimentación suficiente y saludable es indispensable para mejorar la salud de la población, junto con la evidencia de que las zoonosis y las contaminaciones de los productos vegetales con patógenos humanos y hongos toxigénicos repercuten sobre la salud humana, han favorecido la consideración unitaria del sistema sanitario humano, ganadero, agrícola y medioambiental dando lugar a un concepto explícitamente formulado bajo el nombre de Salud Única o Global (*One Health*) (Capua, 2020).

Las exigencias que la sociedad plantea a la agricultura y la silvicultura para que resuelvan problemas diversos que inciden sobre el progreso humano son múltiples y bien conocidas. No solamente les demanda de forma afortunadamente creciente, que provean a la población humana de alimentos y bienes industriales en cantidad y calidad suficientes y de salubridad contrastada. También les exige que, en las actividades para satisfacer tal reclamación, la agricultura y el manejo de las masas forestales sean respetuosos con el entorno natural y comprometidos con la mejora y preservación de los recursos naturales para las generaciones futuras. Al mismo tiempo, se les solicita que desarrollen una alternativa creíble al uso de combustibles fósiles que está propiciando el cambio climático, cuyas consecuencias solo podemos atisbar en estos momentos. A la satisfacción de tales exigencias sociales se unen objetivos adicionales propios del dinamismo ineludible de los sistemas agrícolas y forestales que conjuntamente a aquellas van a delinear el perfil de la agricultura y la silvicultura en los próximos decenios. Por ejemplo, la modificación, mediante transformación y edición genética de características relevantes de los cultivares, como su producción, composición, resistencia a agentes nocivos, etc., o la utilización de las plantas para obtener medicamentos de manera asequible y segura, y la conservación de la biodiversidad vegetal y animal de todo tipo de ecosistemas, que van a suponer, entre otros, objetivos insoslayables para la agricultura y silvicultura de los próximos tiempos, y algunos lo son ya desde hace varias décadas. Además, a los múltiples objetivos de la agricultura y silvicultura que hemos referido, se le ha añadido recientemente el reto de la reducción de emisiones de gases con efecto invernadero, e incluso el papel de los ecosistemas agrícolas y forestales en la absorción de CO₂ y su contribución como una acción mitigadora del cambio climático.

Entendemos, agradecemos y aplaudimos, por tanto, la oportunidad de la Real Academia de Ingeniería de España al auspiciar en 2021 este Libro, que permite al lector interesado ahondar en los aspectos medioambientales relacionados con la agricultura y la silvicultura, en los que están directamente involucradas las actividades de la Sanidad Vegetal.

El contenido del Libro está dividido en tres partes (A-C). En la parte A se justifican: (i) cómo la Sanidad Vegetal contribuye de forma decisiva al aumento de la productividad agrícola y forestal, y a la eficiencia de los recursos empleados para ella, al reducir las cuantiosas pérdidas de cosecha que causan las plagas, enfermedades y malas hierbas, y potenciar los servicios agroecosistémicos; (ii) cómo las amenazas actuales a la agricultura y la silvicultura se constituyen en retos a resolver de forma muy particular por la Sanidad Vegetal; y (iii) cómo operan las disciplinas científicas que sustentan la Sanidad Vegetal -que algunos proponen referirla de forma holística como Medicina de los Vegetales-, para conseguir los objetivos de aquella. La reciente publicación en 2019 del Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España, coordinado por dos de los autores de la presente obra, sirve para que el presente documento ahonde de forma crítica en conclusiones que ya se presentaron en el mismo y que todavía siguen siendo válidas en su mayor parte.

En la segunda parte, o parte B, se expone cómo la Sanidad Vegetal está respondiendo a los retos creados por las amenazas que afronta la agricultura y la silvicultura modernas. Las variadas tecnologías agrícolas y silvícolas que hoy en día afrontan esos retos de maneras distintas, y las propias de la Sanidad Vegetal, deben responder por vías propias y sólo las actividades rigurosas y solventes en I+D+Transferencia de Tecnologías pueden ofrecer soluciones eficientes y sostenibles a los mismos. Entre los retos planteados a la Sanidad Vegetal, se han seleccionado algunos que están exigiendo constantemente y con particular intensidad esas soluciones. Ejemplos de ellos son: (i) el aumento incesante de organismos invasores exóticos causantes de plagas, enfermedades y de malas hierbas que se extienden por países de los cinco continentes; (ii) las repercusiones del cambio climático sobre la distribución e incidencia tanto de esos mismos organismos alóctonos como de los organismos nocivos nativos; (iii) el impacto sobre la Sanidad Vegetal de la legislación de algunas agriculturas del mundo sobre el uso restrictivo de los productos fitosanitarios, en particular la dictada por la Unión Europea (UE), y el criticismo a menudo inespecífico de parte de la sociedad actual al uso de los mismos; y, finalmente (iv) la importancia creciente de la agricultura ecológica, que aconseja hacer algunas consideraciones acerca del papel de la Sanidad Vegetal para responder a esa demanda creciente de alimentos con certificación ecológica. No iríamos mucho más allá de la simple palabrería, si abordáramos la respuesta a todos esos retos sin examinar críticamente las capacidades de los sectores que han de desarrollar el conocimiento y las tecnologías para resolverlos, así como las acciones para aplicarlos en la práctica real; por ello, a lo largo de todo el Libro nos referimos a la salud real de la I+D+Transferencia en el campo de la Sanidad Vegetal, que debe recibir más apoyo público y privado, y a la formación especializada de científicos y técnicos en el ámbito de la Sanidad Vegetal, tal como ya se señalaba en el mencionado Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España.

Las perspectivas de progreso de la Sanidad Vegetal que ya se están comenzando a consolidar en la actualidad constituyen la tercera parte, o parte C, del Libro. Y a tal fin se han seleccionado aquéllas en que los autores trabajan o más han trabajado o conocen de cerca. No se ha pretendido ser exhaustivo, sino señalar algunas temáticas en las que los avances en la eficiencia de la Sanidad Vegetal están siendo muy significativos y pueden serlo todavía más en la próxima década. Se han seleccionado los siguientes campos: (i) el Diagnóstico de enfermedades, artrópodos fitófagos y malas hierbas; (ii) las Tecnologías de la Información, las Comunicaciones, y la Agricultura de Precisión; (iii) la Resistencia de las plantas contra enfermedades y plagas; (iv) el Control biológico; (v) la Epidemiología de enfermedades y la Dinámica de

poblaciones; y (vi) la Integración de medidas y medios de control para la Gestión Integrada que persiga la mayor resiliencia de las plantas cultivadas y masas forestales.

Este Libro ha sido escrito conjuntamente por tres autores, cada uno de ellos especialista en un campo distinto de la Sanidad Vegetal, que lo han abordado en base a sus conocimientos y experiencias durante más de 40 años de ejercicio profesional, por lo que no pretende ser una exhaustiva revisión bibliográfica, sino que incluye una visión personal y crítica de cada tema. En la redacción se han tenido presente los vocablos y términos recogidos por el Diccionario de la Real Academia de la Lengua, salvo cuando la especificidad del término aconsejó recurrir a glosarios científico-técnicos reconocidos internacionalmente (v. gr., *Definitions of some Terms used in Plant Pathology. British Mycological Society; Glossary of Plant-Pathological Terms. APS Press; Nuevo Diccionario Ilustrado de Micología. APS Press*). En algún caso, como ha sido el del capítulo C5 sobre la Epidemiología de enfermedades y la Dinámica de poblaciones, hemos recurrido a un colaborador especialista en el tema y cuyo nombre se incluye en el capítulo de los Agradecimientos. Una vez escrita la primera versión de los tres autores, cada capítulo ha sido revisado de manera independiente por uno o varios colegas expertos en cada tema concreto, lo cual nos ha permitido en muchos casos completar y actualizar las temáticas abordadas. Sus nombres figuran en el capítulo de Agradecimientos en el bien entendido que el texto final es responsabilidad única de los tres autores del libro. A todos/as ellos/as nuestras más sinceras gracias por sus excelentes aportaciones al texto definitivo.

Como otros documentos auspiciados por la Real Academia de Ingeniería de España, el presente Libro está dirigido a un público con un nivel alto de educación, aunque no esté particularmente familiarizado con la Sanidad Vegetal, porque hemos entendido que esa es la audiencia propia de dicha Real Academia. Por otra parte, hemos pretendido extender al máximo posible la visibilidad y el conocimiento de la razón de ser de la Sanidad Vegetal entre personas que eventualmente tengan oportunidad de tomar decisiones sobre ella. Ese objetivo no obsta para que los investigadores y expertos en transferencia agraria ya iniciados en la Sanidad Vegetal, como quizá sea el caso de Ingenieros Agrónomos y de Montes o Biólogos, puedan encontrar alicientes para reflexionar y discutir acerca de la Medicina de los Vegetales.

Sin la sensibilización social sobre: (i) los retos que tiene planteados la Sanidad Vegetal, (ii) la comprensión (o por lo menos la intuición) de la complejidad de las soluciones que se están investigando y aplicando; (iii) las exigencias crecientes de la legislación mundial y en particular de la UE; y (iv) la necesidad de conservar y hacer posible el aumento de los servicios ecosistémicos que proveen la agricultura, la silvicultura y los ecosistemas naturales para nuestra subsistencia, no será posible aumentar la sostenibilidad y productividad del sistema agroalimentario. Confiamos en que este Libro contribuya a informar para hacer reflexionar sobre todo ello al lector interesado, tal como nos ha sido solicitado por la Real Academia de Ingeniería.

Bibliografía

Capua, I. 2020. Circular Health: Empowering the One Health Revolution. Milano: Bocconi University Press.

ÍNDICE

La Sanidad Vegetal en la agricultura y la silvicultura	I
Presentación Real Academia de Ingeniería	VII
Presentación AGROTECNIO	IX
Carta del Presidente RAI	X
Agradecimientos	XII
Prólogo	XV
Índice	XIX
A. Agricultura, Silvicultura y Sanidad Vegetal	1
Cap. A1. La Sanidad Vegetal y los objetivos de la agricultura y la silvicultura del siglo XXI: promover la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de los sistemas agroforestales	3
A1.1 Agricultura y provisión de alimentos y otros productos	3
A1.2 Sostenibilidad de los agroecosistemas y Sanidad Vegetal	4
A1.3 Importancia de la Sanidad Vegetal en la seguridad alimentaria	5
A1.3.1 Repercusión social de la Sanidad Vegetal más allá de la reducción del rendimiento de los agroecosistemas	5
A1.3.1.1 Enfermedades	6
A1.3.1.1.1. <i>Impacto de los patógenos exóticos sobre sectores agroindustriales</i>	7
A1.3.1.1.2. <i>Impacto de los patógenos exóticos sobre el uso de recursos de disponibilidad limitada</i>	8
A1.3.1.1.3. <i>Impacto de los patógenos exóticos sobre el medioambiente</i>	9
A1.3.1.1.4. <i>Impacto social de epidemias recientes</i>	9
A1.3.1.2. Plagas	10
A1.3.2. Pérdidas mundiales de cosecha ocasionadas por enfermedades plagas, y malas hierbas en cultivos importantes	13
A1.3.2.1. Pérdidas de cosecha en la agricultura española ocasionadas por enfermedades plagas, y malas hierbas	15
A1.3.2.1.1. <i>Pérdidas de cosecha en la agricultura española ocasionadas por hongos y oomicetos, bacterias, virus, viroides, y nematodos representativos</i>	16
A1.3.2.1.2. <i>Pérdidas de cosecha en la agricultura española ocasionadas por artrópodos fitófagos y malas hierbas representativos</i>	19
A1.4. Importancia de la Sanidad Vegetal en la salubridad alimentaria	21
A1.4.1. Micotoxinas y micotoxicosis	21
A1.4.2. Las plantas como vectores de patógenos humanos	25
A1.5. Disciplinas que sustentan la Sanidad Vegetal	26
A1.5.1. Patología Agrícola y Forestal	27
A1.5.2. Entomología Agrícola y Forestal	27
A1.5.3. Malherbología	29
A1.5.4. Hacia una concepción holística de la Sanidad Vegetal: una Medicina de los Vegetales	31
A1.6. Bibliografía	32

Cap. A2. Retos de la Sanidad Vegetal a nivel global y en España	35
A2.1. Persistencia de la magnitud de las pérdidas globales de cosecha ocasionadas por enfermedades, plagas, y malas hierbas	35
A2.1.1. La reemergencia de enfermedades, plagas, y malas hierbas: un indicador de la interacción entre las innovaciones tecnológicas en la agroindustria y silvicultura actuales, y la Sanidad Vegetal	35
A2.1.1.1. Innovaciones en las tecnologías agrícolas y reemergencias de problemas fitosanitarios	35
A2.1.1.1.1. <i>La homogeneidad genética de los cultivos</i>	36
A2.1.1.1.2. <i>La introducción de estirpes exóticas más virulentas o de vectores más eficientes de los patógenos en los lugares de producción</i>	38
A2.1.1.1.3. <i>La intensificación agrícola y las nuevas prácticas culturales</i>	38
A2.1.1.1.3.1. <i>Influencia del monocultivo y no del laboreo</i>	39
A2.1.1.1.3.2. <i>Influencia de la intensificación y estructura de las plantaciones...</i>	40
A2.1.1.1.3.3. <i>Influencia de la intensificación de las rotaciones</i>	41
A2.1.1.2. Cambios en la demanda de los mercados	42
A2.1.2. La emergencia de nuevas enfermedades, plagas, y malas hierbas: un elemento clave en la Sanidad Vegetal actual	43
A2.2. Retos que afronta la Sanidad Vegetal en el siglo XXI	44
A2.2.1. Retos derivados de las formas y sistemas de producción agro-forestal	44
A2.2.2. Retos derivados de la introducción transfronteriza de agentes exóticos y la emergencia y reemergencia de enfermedades, plagas y malas hierbas	44
A2.2.3. Retos derivados de cambios en el medioambiente: el Cambio Climático	45
A2.2.4. Retos derivados de cambios en las tecnologías de aplicación a la producción agrícola y la gestión de la Sanidad Vegetal	45
A2.2.5. Retos sobre los medios y estrategias para la gestión de enfermedades, plagas y malas hierbas	46
A2.2.6. Retos para la investigación científico-técnica, la formación, y la transferencia de tecnologías	47
A2.3. Situación actual de la Sanidad Vegetal en España	48
A2.3.1. La estructura actual del sistema español de la Sanidad Vegetal	48
A2.3.1.1. La Dirección General de Sanidad de la Producción Agraria (DGSPA)	48
A2.3.1.2. Los Servicios de Sanidad Vegetal de las CC. AA.	49
A2.3.1.3. La Sanidad Vegetal en las Universidades y Organismos Públicos de Investigación (OPIs)	50
A2.3.1.3.1. <i>La formación universitaria en Sanidad Vegetal</i>	50
A2.3.1.3.2. <i>La I+D en Sanidad Vegetal</i>	52
A2.3.1.3.3. <i>La transferencia de conocimientos y tecnologías (TT) en Sanidad Vegetal</i>	53
A2.3.1.4. Las Sociedades Científicas y Profesionales en Sanidad Vegetal	54
A2.4. Bibliografía	55
B. Retos para la Sanidad Vegetal en la próxima década	57
Cap. B1. Organismos nocivos exóticos y Bioseguridad Vegetal	59
B1.1. Problemas causados por los organismos nocivos exóticos	59
B1.2. Dificultades del control de los organismos nocivos exóticos	65
B1.2.1. Estrategias y medidas de exclusión	65
B1.2.2. Estrategias y medidas de erradicación	67
B1.2.3. Medidas de contención	69
B1.2.4. Medidas de evasión	70
B1.3. Nueva clasificación de plagas reguladas en la UE	71
B1.3.1. Plagas de cuarentena y plagas prioritarias en la UE	72
B1.3.2. Plagas reguladas no cuarentenarias en la UE	73
B1.3.3. Estatus de las malas hierbas y plantas invasoras en España	74

B1.4.	Las especies exóticas invasoras	74
B1.5.	La Prevención Integrada de nuevas plagas, enfermedades y malas hierbas de alto riesgo en España	76
B1.6.	La Bioseguridad, una disciplina global	81
B1.7.	La Bioseguridad global exige un marco cooperativo y legislativo internacional	81
B1.8.	Análisis de Riesgos para la Bioseguridad Vegetal	82
B1.8.1.	Análisis de Riesgos para la Bioseguridad de la introducción de organismos nocivos exóticos	83
B1.8.2.	Análisis de Riesgos para la Bioseguridad de la introducción de organismos exóticos para control biológico	84
B1.9.	Importancia de las disciplinas nucleares de la Sanidad Vegetal en los Análisis de Riesgos para la Bioseguridad Vegetal	85
B1.10.	Fisiología y Ecología de los organismos nocivos exóticos para la evaluación y gestión de riesgos	86
B1.10.1.	Dificultades prácticas del Análisis de Riesgos para la Bioseguridad Vegetal ...	87
B1.10.2.	Factores asociados con la introducción de organismos nocivos y emergencias de nuevas plagas	88
B1.11.	Fuentes de información sobre organismos exóticos nocivos	90
B1.12.	Más sombras que luces: perspectivas de la prevención y la gestión de los organismos nocivos exóticos	90
B1.13.	Bibliografía	93
Cap. B2.	Repercusiones del Cambio Climático en los efectos de las plagas, enfermedades, y malas hierbas	97
B2.1.	Cambio Climático y Sanidad Vegetal: una relación en un marco global	97
B2.2.	Efectos del Cambio Climático en los cultivos y masas forestales	98
B2.3.	Impactos generales del Cambio Climático sobre las malas hierbas, los artrópodos fitófagos, y los agentes fitopatógenos	99
B2.3.1.	Las malas hierbas	99
B2.3.2.	Las plagas	100
B2.3.2.1.	Efecto del Cambio Climático sobre el área de distribución de los artrópodos fitófagos	100
B2.3.2.2.	Efecto del Cambio Climático sobre la biología de los artrópodos fitófagos	100
B2.3.2.3.	Efecto del Cambio Climático sobre las interacciones tróficas entre plantas y organismos fitófagos	101
B2.3.2.4.	Efecto del Cambio Climático sobre la dinámica poblacional de los fitófagos	101
B2.3.3.	Las enfermedades	101
B2.3.3.1.	Efecto del Cambio Climático sobre el área de distribución de los agentes fitopatógenos	102
B2.3.3.2.	Efecto del Cambio Climático sobre los ciclos vitales de los agentes fitopatógenos y el desarrollo de la patogénesis en las enfermedades	103
B2.3.3.3.	Efecto del Cambio Climático sobre la fisiología de las interacciones entre la planta y el patógeno	105
B2.3.3.4.	Efecto del Cambio Climático sobre la eficiencia de las estrategias empleadas para la Gestión Integrada de las enfermedades	106
B2.4.	Modelos de distribución de organismos nocivos	107
B2.4.1.	Modelos de nicho ecológico o correlativos	107
B2.4.2.	Modelos mecanicistas	108
B2.4.3.	Un ejemplo de utilización de modelos para predecir la distribución de especies en función del Cambio Climático: el caso de la mosca de la aceituna, <i>Bactrocera oleae</i>	108

B2.5.	A modo de conclusiones	109
B2.6.	Bibliografía	111
Cap. B3. Los Productos Fitosanitarios y los Bioplaguicidas, y su papel en la Sanidad Vegetal del siglo XXI		113
B3.1.	Productos Fitosanitarios convencionales: definiciones, tipos principales, y utilización en el siglo XXI	113
B3.2.	Uso actual de los Productos Fitosanitarios convencionales	115
B3.2.1.	Cantidad total de Productos Fitosanitarios utilizados	115
B3.2.2.	Cantidad de Productos Fitosanitarios utilizados por continente	117
B3.3.	Cara y cruz de los Productos Fitosanitarios convencionales	118
B3.3.1.	Resistencia de los organismos nocivos a los Productos Fitosanitarios	119
B3.3.2.	Resurgimiento rápido de los organismos diana	119
B3.4.	Efectos de los Productos Fitosanitarios convencionales en la salud humana, medioambiental, y animal	120
B3.4.1.	Efectos negativos en la salud humana	120
B3.4.2.	Impacto negativo en el medioambiente	122
B3.4.3.	Impacto en artrópodos: sin insectos no hay vida	123
B3.5.	Legislación europea en materia de Productos Fitosanitarios	124
B3.5.1.	Registro de los Productos fitosanitarios en la Unión Europea y su problemática	124
B3.5.1.1.	Metodología de evaluación de riesgos por Productos Fitosanitario	125
B3.5.1.2.	Niveles máximos de residuos de Productos Fitosanitarios en alimentos	126
B3.5.2.	Residuos de plaguicidas en los productos importados por la Unión Europea procedentes de países terceros	126
B3.6.	Bioplaguicidas: definiciones y tipos principales	127
B3.6.1.	Evolución del uso de Bioplaguicidas	129
B3.6.2.	Cara y cruz de los Bioplaguicidas	130
B3.7.	Perspectivas de mejora en el uso de los Productos Fitosanitarios	132
B3.7.1.	Implantación de la Gestión Integrada de Plagas y Enfermedades	132
B3.7.2.	Mejora de la toxicidad y persistencia	132
B3.7.3.	Mejoras en las formulaciones	133
B3.7.4.	Mejoras en la aplicación	134
B3.7.5.	Disminución del riesgo de efectos negativos de los Productos Fitosanitarios	134
B3.8.	Luces, sombras, y futuro de los Productos Fitosanitarios y los Bioplaguicidas en la Unión Europea	135
B3.9.	Bibliografía	140
Cap. B4. Situación actual y retos de la Sanidad Vegetal en la Agricultura Ecológica		143
B4.1.	Principales tipos actuales de agricultura y sus características	143
B4.1.1.	Agricultura convencional y Gestión Integrada de enfermedades, plagas, y malas hierbas	143
B4.1.2.	Agricultura ecológica	144
B4.1.3.	Comparaciones entre agricultura convencional y ecológica	147
B4.1.3.1.	Reconversión de agricultura convencional en ecológica	148
B4.1.3.2.	Productividad	148
B4.1.3.3.	Biodiversidad	148
B4.1.3.4.	Medioambiente	150
B4.1.3.5.	Economía	150
B4.1.3.6.	Salud humana	150
B4.1.3.7.	Composición y atributos organolépticos	151
B4.2.	¿Es posible cultivar en la Unión Europea sin productos fitosanitarios?	153
B4.3.	La Agricultura Ecológica en la Unión Europea	154

B4.4.	Importancia de la Agricultura Ecológica en España	154
B4.5.	Oportunidades para la Sanidad Vegetal en los agroecosistemas de agricultura ecológica	157
B4.5.1.	Consideraciones sobre lagunas actuales de la Sanidad Vegetal en agricultura ecológica	157
B4.5.2.	Manejo de enfermedades en agricultura ecológica	159
B4.5.2.1.	Acciones para reducir el inóculo del patógeno en el lugar de producción	160
B4.5.2.1.1.	<i>Métodos de desinfestación del suelo en la Agricultura Ecológica</i>	161
B4.5.2.1.2.	<i>Prácticas culturales que reducen el inóculo disponible antes de establecer el cultivo</i>	162
B4.5.2.1.2.1.	<i>Saneamiento de las parcelas de cultivo</i>	162
B4.5.2.1.2.2.	<i>Rotación de cultivos</i>	163
B4.5.2.1.2.3.	<i>Emmiendas orgánicas</i>	164
B4.5.2.2.	Exclusión del patógeno mediante el uso de semillas y material propagativo asexual libre de infección	164
B4.5.2.3.	Reducción de la eficiencia del inóculo en los cultivos establecidos	165
B4.5.2.3.1.	<i>Prácticas culturales para modificar los ambientes favorables</i>	165
B4.5.2.3.2.	<i>Utilización de cultivares resistentes contra los patógenos</i>	166
B4.5.2.3.3.	<i>Protección del cultivo mediante aplicación foliar de productos autorizados en la Agricultura Ecológica</i>	167
B4.5.3.	Manejo de artrópodos en cultivo ecológico	169
B4.5.4.	Manejo de malas hierbas en cultivo ecológico	170
B4.6.	Luces, sombras, y perspectivas de la mejora de la Sanidad Vegetal en la Agricultura Ecológica en España	171
B4.7.	Bibliografía	173

C. Perspectivas en la mejora de la Sanidad Vegetal mediante innovaciones biológicas y tecnológicas

175

Cap. C1.	Nuevas tecnologías para el diagnóstico de plagas y enfermedades de plantas agrícolas y forestales: retos y perspectivas	177
C1.1.	Necesidad del diagnóstico fiable de plagas, enfermedades, y malas hierbas en el siglo XXI	177
C1.2.	Métodos de identificación de insectos y ácaros	179
C1.3.	Métodos de diagnóstico y detección de virus, viroides, bacterias, hongos, oomicetos, y nematodos	181
C1.4.	Métodos de identificación de malas hierbas	186
C1.5.	Validación de técnicas de diagnóstico, detección, e identificación: sensibilidad, especificidad, precisión, repetibilidad, y reproducibilidad	187
C1.6.	Laboratorios oficiales autorizados y Laboratorios nacionales de Referencia en España y en la Unión Europea	188
C1.7.	Luces, sombras y perspectivas del diagnóstico e identificación de agentes nocivos	190
C1.8.	Bibliografía	193
Cap. C2.	Las tecnologías de la Información, las Comunicaciones, y la Agricultura de Precisión	195
C2.1.	¿En qué consiste la Agricultura de Precisión?	195
C2.2.	Los sistemas de apoyo a la toma de decisiones	196
C2.3.	La Agricultura de Precisión en la Sanidad Vegetal	197
C2.3.1.	Antecedentes	197

C2.3.2. Identificación y monitorización de poblaciones de agentes nocivos, y detección remota de estreses abióticos y bióticos	198
C2.3.2.1. Teledetección	198
C2.3.2.2. Vehículos aéreos no tripulados	200
C2.3.2.3. Robots para usos de protección de cultivos	201
C2.3.3. Aplicación de productos fitosanitarios	202
C2.3.4. Otros ámbitos para la mejora de la Sanidad Vegetal con la Agricultura de Precisión	204
C2.4. A modo de conclusiones	205
C2.5. Bibliografía	207

Cap. C3. El desarrollo y utilización de cultivares resistentes a organismos nocivos como elemento clave de la Sanidad Vegetal	209
C3.1. Razón de ser de la resistencia a organismos nocivos en la Sanidad Vegetal	209
C3.2. Naturaleza de la resistencia a agentes causantes de enfermedades	210
C3.2.1. Naturaleza de la resistencia no-huésped	211
C3.2.2. Naturaleza de la resistencia huésped	212
C3.2.2.1. Características de la resistencia cualitativa mono-/ oligogénica	214
C3.2.2.1.1. <i>Organización de los genes R</i>	214
C3.2.2.1.2. <i>Estructura molecular de los genes R</i>	215
C3.2.2.2. Características de la resistencia cuantitativa	216
C3.2.2.3. Interacción entre el genotipo de la planta y el del patógeno en la resistencia raza-específica: la relación gen a gen	217
C3.2.2.4. Las bases moleculares de la relación gen a gen y el sistema inmune de las plantas contra los agentes microbianos	218
C3.2.2.4.1. <i>Un sistema de inmunidad innata en las plantas contra los agentes microbianos</i>	219
C3.2.2.4.2. <i>Mecanismos que subyacen en el reconocimiento entre plantas y microorganismos</i>	221
C3.2.2.4.3. <i>La interacción proteína-proteína no es el único mecanismo en la regulación del sistema inmune vegetal: el papel de los sARNs</i>	222
C3.2.3. Luces y sombras de la mejora de plantas y utilización de cultivares mejorados para resistencia cualitativa	224
C3.2.3.1. Estrategias para optimizar el uso eficiente de la resistencia raza-específica	225
C3.2.4. Luces y sombras de la mejora y utilización de cultivares mejorados para resistencia cuantitativa	227
C3.3. Mejora de resistencia a artrópodos fitófagos	230
C3.3.1. Tipos de relaciones planta-fitófago: desde el estudio ecológico de las relaciones a la comprensión de los mecanismos implicados en las mismas	230
C3.3.2. Aprovechamiento de los caracteres que confieren a las plantas la resistencia a los fitófagos	231
C3.3.2.1. Caracteres físicos	232
C3.3.2.1.1. <i>Ceras sobre la superficie foliar</i>	232
C3.3.2.1.2. <i>Tricomas</i>	232
C3.3.2.1.3. <i>Canales secretores</i>	232
C3.3.2.1.4. <i>Dureza y enrollamiento de las hojas</i>	232
C3.3.2.2. Caracteres químicos	233
C3.3.2.2.1. <i>Terpenos</i>	233
C3.3.2.2.2. <i>Fenoles</i>	233
C3.3.2.2.3. <i>Compuestos nitrogenados</i>	233
C3.3.2.2.4. <i>Proteínas inducibles con efecto en el sistema digestivo de los fitófagos</i>	234
C3.3.2.2.5. <i>Compuestos volátiles</i>	234
C3.3.3. Señalización en la planta del ataque de un fitófago y su comunicación a la población	234
C3.4. Perspectivas en la mejora de cultivares resistentes a patógenos y artrópodos fitófagos	236
C3.5. Bibliografía	239

Cap. C4. Control biológico de plagas, enfermedades, y malas hierbas	243
C4.1. Relaciones tróficas en ecosistemas agrícolas y forestales que son utilizadas por el control biológico	243
C4.2. Presente y futuro del control biológico de plagas	243
C4.2.1. De la inoculación a la conservación de enemigos naturales	243
C4.2.2. El control biológico de plagas en programas de gestión integrada	244
C4.2.3. Los múltiples componentes del control biológico de conservación	245
C4.2.4. El uso de organismos entomopatógenos en el control microbiano de plagas	245
C4.3. Presente y futuro del control biológico de enfermedades	246
C4.3.1. Supresión natural de enfermedades en suelos cultivados	249
C4.3.1.1. Tipos de supresión específica de enfermedades en suelos cultivados	249
C4.3.2. Agentes y mecanismos del control biológico de enfermedades	250
C4.3.2.1. Antibiosis	251
C4.3.2.2. Competición	252
C4.3.2.3. Hiper-parasitismo	253
C4.3.2.4. Inducción de mecanismos de defensa en la planta huésped	254
C4.3.3. Debilidades y fortalezas del control biológico de enfermedades	255
C4.3.4. Perspectivas futuras del control biológico de enfermedades	257
C4.4. Control biológico de malas hierbas	259
C4.5. Debilidades, fortalezas, y perspectivas del control biológico de plagas, enfermedades y malas hierbas	260
C4.6. Bibliografía	262
Cap. C5. Epidemiología de las enfermedades y Dinámica de Poblaciones de artrópodos fitófagos	265
C5.1. Epidemiología de las enfermedades de las plantas	265
C5.2. Modelización de epidemias	265
C5.3. Nuevas aproximaciones a la modelización de epidemias	266
C5.3.1. Modelización de epidemias en un contexto de Cambio Climático	267
C5.3.2. Modelización de enfermedades emergentes	267
C5.4. Nuevas tecnologías para la adquisición de datos para estudios en epidemiología	268
C5.4.1. Uso de las tecnologías SIG en estudios epidemiológicos	268
C5.4.2. Sistemas de apoyo a la toma de decisiones	269
C5.4.3. Detección remota de enfermedades de cultivos	269
C5.5. Aplicaciones prácticas de los estudios epidemiológicos para el control de enfermedades	271
C5.5.1. Manejo de enfermedades causadas por patógenos emergentes basado en modelos de riesgo	271
C5.5.2. Modelos epidemiológicos para cuantificar la dispersión de patógenos transmitidos por vectores	272
C5.5.3. Modelos epidemiológicos para el manejo de patógenos vasculares residentes en el suelo	273
C5.5.3.1. Modelización de la fusariosis vascular del garbanzo	273
C5.5.3.2. Modelización espacio-temporal de la verticilosis del olivo	274
C5.6. Consideraciones finales: Retos para la modelización de enfermedades de las plantas	275
C5.7. Dinámica de Poblaciones de artrópodos fitófagos	276
C5.8. Componentes del crecimiento de una población de artrópodos fitófagos	277
C5.9. Modelos de dinámica de poblaciones	278
C5.10. Distribución de individuos de una población de artrópodos fitófagos en el espacio, diseminación y metapoblaciones	280
C5.11. Monitorización de la dinámica poblacional de artrópodos fitófagos y muestreo en un cultivo o masa forestal	281
C5.12. Consideraciones finales: la dinámica de poblaciones en la Gestión Integrada de Plagas	284

C5.13. Bibliografía	285
Cap. C6. La integración de medidas y medios de control, y del manejo del agroecosistema, como estrategia clave de la Sanidad Vegetal	289
C6.1. Una visión holística para la integración de métodos en el manejo del agroecosistema ..	289
C6.2. La Gestión Integrada de Plagas en sentido amplio: concepto, aplicabilidad y limitaciones	290
C6.2.1. Concepto de Gestión Integrada de Plagas	291
C6.2.2. Complejidad de la Gestión Integrada de Plagas: una llamada de cautela sobre la aplicabilidad	292
C6.2.3. Limitaciones de la Gestión Integrada de Plagas	300
C6.2.4. Gestión Integrada de Plagas en España	302
C6.3. La necesidad de una ciencia holística de la Gestión Integrada de Plagas	302
C6.3.1. Las aportaciones de la Ecología: progresos y limitaciones	303
C6.3.2. La aproximación evolutiva para el manejo de las interacciones bióticas	305
C6.4. Integración de otros protagonistas del sistema agroalimentario en la Gestión Integrada de Plagas	307
C6.5. Bibliografía	309
EPÍLOGO: EL RETO MULTIFACÉTICO DE LA SEGURIDAD Y SALUBRIDAD ALIMENTARIA GLOBAL MEDIANTE LA PROTECCIÓN DE LAS PLANTAS CON ESTRATEGIAS SOSTENIBLES	315
AUTORES	320

An aerial photograph of agricultural fields, showing a grid-like pattern of crops and irrigation channels. A large, bold, black letter 'A' is superimposed on the upper right portion of the image.

A

**AGRICULTURA
Y SANIDAD VEGETAL**

A. Agricultura y Sanidad Vegetal

A1. Capítulo A1. La Sanidad Vegetal y los objetivos de la agricultura y la silvicultura del siglo XXI: promover la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de los sistemas agroforestales

A1.1. Agricultura y provisión de alimentos y otros productos

La agricultura y la silvicultura son clave para el desarrollo y la estabilidad de la población mundial porque le proveen de alimentos, fibras, madera, piensos y forrajes para la producción ganadera, y servicios eco-sistémicos indispensables para su subsistencia. Aun siendo intuitiva de por sí, la relevancia y significación global de esta percepción ha ido adquiriendo notoriedad pública y política durante las últimas décadas asociada particularmente a crisis alimentarias. Un ejemplo de ello tuvo lugar en los años 2007-2008, en los que la progresiva reducción de stocks derivada de malas cosechas por desastres naturales y condiciones climáticas adversas para la producción agrícola, y el incremento de la demanda de alimentos de países emergentes (Brasil, China, India, Indonesia, México, etc.) junto con otros factores coyunturales (ej., fomento de cosechas para biocombustible, especulaciones en el sector financiero), determinaron una crisis alimentaria de naturaleza global, multisectorial y permanente, que motivó la reclamación de que la agricultura fuera considerada como sector estratégico global (Lamo de Espinosa, 2009; Sumpsi, 2009).

Muy poco después, en 2009, la crisis alimentaria se consideró ya permanente porque la ingesta calórica de más de 900 millones de habitantes del planeta era inferior a las necesidades mínimas de nutrición, indicando que el incremento de la producción de alimentos no había conseguido alcanzar el Objetivo del Milenio enunciado en la Cumbre de la Alimentación de Roma en 2000, que proyectaba para 2015 reducir a la mitad la cifra de 840 millones de personas malnutridas (Sumpsi, 2009). En 2021, con ocasión de la 42ª conmemoración del Día Mundial de la Alimentación, este último autor, Subdirector General de FAO, indicaba que la cantidad global de malnutridos se había venido reduciendo hasta el año 2015 pero había repuntado de nuevo desde entonces, de manera que la proyección de FAO es que, si no se producen cambios, la cifra de 900 millones de habitantes malnutridos se alcanzará de nuevo en 2030.

La permanencia de la crisis alimentaria global está estrechamente vinculada con el incremento de la población mundial –entre otros factores, como el incremento de la demanda de alimentos de países emergentes- que ha crecido durante los últimos 220 años hasta alcanzar cerca de 8.000 millones de habitantes en la actualidad, con una proyección de crecimiento de hasta 11.000 millones para final del presente siglo (ONU, 2019). Este crecimiento poblacional determinará un incremento en la demanda de alimentos que no podrá ser satisfecho con una mayor extensión de suelo cultivable, porque la disponibilidad de este es limitada y porque el aumento de dicha extensión contribuiría, además, a una pérdida de biodiversidad indeseada desde el prisma de la sostenibilidad y a una disminución del suelo con buena capacidad de captura de dióxido de carbono, CO₂ (Bremmer et al., 2021).

De hecho, un análisis de las perspectivas globales de disponibilidad de alimentos en el siglo XXI realizado en 2001 por el Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias del CGIAR (*Consultative Group for International Agricultural Research*; Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional), estimó que el aumento en la superficie de cultivo que pudiera tener lugar desde dicho año contribuiría en menos del 20 % al incremento global de producción de cereales y tubérculos necesario para satisfacer la demanda de dichos cultivos en 2020 (Pinstrup-Andersen, 2001). En la actualidad, el suelo agrícola se ha convertido en un bien escaso y es objeto de una creciente demanda, que durante los últimos años se ha venido plasmando en un proceso de compra de tierras con fondos soberanos -denominado *land grabbing*- por diversos países (ej., China, Corea del Sur, Japón, etc.) en varios lugares del mundo, cuya finalidad declarada es asegurar tanto su independencia como su autonomía alimentaria (Lamo de Espinosa, 2012).

Como resultado de todo ello, el número de hectáreas de suelo cultivable/ cápita irá menguando en el futuro más próximo, y la creciente demanda alimentaria deberá ser satisfecha necesariamente mediante el incremento de la productividad de los cultivos, a través de la mejora del rendimiento potencial y la eficiencia en el uso de los insumos necesarios (ej., agua, fertilizantes, etc.). Sin embargo, la tasa de incremento de los rendimientos unitarios a través de la mejora genética vegetal ha ido decreciendo hasta niveles que se consideran insuficientes para afrontar las necesidades debidas al crecimiento de la población (Ray et al., 2013). Además, a esta limitación genética en las perspectivas de incremento de la producción de los cultivos, se han de sumar las limitaciones adicionales debidas a la incidencia de factores bióticos y abióticos que reducen el rendimiento de aquellos (ej., estreses hídricos y térmicos, enfermedades, plagas, malas hierbas, eventos meteorológicos extremos asociados al Cambio Climático, etc.) (Bailey-Serres et al., 2019).

A1.2. Sostenibilidad de los agroecosistemas y Sanidad Vegetal

La incidencia de enfermedades y plagas de artrópodos fitófagos, y la competencia por espacio e insumos de las malas hierbas que conjuntamente comprometen la sanidad de los agroecosistemas, originan un malfuncionamiento fisiológico de las plantas cuya repercusión negativa sobre los cultivos agrícolas y masas forestales son objeto de estudio por las disciplinas nucleares de la Sanidad Vegetal (la Patología Agrícola y Forestal, la Entomología Agrícola y Forestal, y la Malherbología (cf., Apartado A1.5.). En cultivos ya establecidos, este malfuncionamiento afecta: (i) la absorción de agua y nutrientes por el sistema radical; (ii) la translocación en el xilema del agua y nutrientes absorbidos por raíces funcionales; (iii) la actividad de tejidos meristemáticos; (iv) la interceptación y absorción de radiación solar por tejidos fotosintéticos; y (v) la eficiencia fotosintética y redistribución de los asimilados a tejidos no fotosintéticos, dependiendo de la naturaleza de las afecciones antes referidas. A los efectos citados anteriormente se suman, además, el detrimento de las funciones y servicios de los ecosistemas herbáceos y forestales. Un caso paradigmático de efectos negativos sobre ecosistemas herbáceos concierne el decaimiento de las praderas de gramíneas perennes nativas en California, por la prevalencia y gravedad de las infecciones por el virus del enanismo amarillo de la cebada y otros cereales (BYDV) asociada con la introducción de gramíneas anuales exóticas como la avena loca (*Avena fatua*) (Malmstrom et al., 2005). En el caso de ecosistemas forestales y cultivos leñosos, los cambios perjudiciales en la función y servicio ecosistémicos derivan de la mortalidad de plantas que se produce prontamente tras el establecimiento de las plantaciones y masas forestales, o más tarde cuando estas se encuentran establecidas (Cheatham et al., 2009). Un ejemplo de este último caso, raramente considerado, es el detrimento de la función de cultivos leñosos y masas forestales que, junto con el establecimiento de pastizales, la agro-silvicultura y prácticas como el mínimo laboreo, se consideran acciones efectivas para la captura de CO₂ atmosférico que puede contribuir significativamente a la mitigación del Cambio

Climático. Así, los estudios sobre “Cuantificación y certificación de carbono orgánico en suelos agrícolas mediterráneos” realizados por el Grupo Operativo CARBOCERT (www.une.org/cooperacion/carbocert), indican que la captura anual de CO₂ por los 2,6 millones de ha de olivar, 1 millón de ha de viñedo, y 600.000 ha de almendro en España pueden llegar a 7,3, 9,1, y 1,26 millones de toneladas de CO₂, respectivamente; y que las 180.000 ha de cítricos de la Comunidad Valenciana capturan anualmente entre 800.000 y 900.000 t, equivalentes a las emisiones realizadas por 150.000 vehículos (www.levante-emv.com/comunitat-valenciana/2011/05/05/). Obviamente, la **reducción demográfica y de cultivo que puedan ocasionar las plagas, enfermedades y malas hierbas, y el perjuicio fisiológico en las plantas supervivientes a estas, repercuten negativamente sobre el potencial total de captura de CO₂ de cultivos y masas forestales.**

Como consecuencia del malfuncionamiento fisiológico de los cultivos que originan, **las enfermedades, plagas y malas hierbas constituyen un factor reductor de la cosecha alcanzable** (Rabbinge, 1993) y, dependiendo del agente nocivo, pueden comprometer la salud de las personas y animales consumidores del producto cosechado de los cultivos afectados. La magnitud de estos efectos negativos se estudia en los Apartados A1.3. y A1.4., y la repercusión de ellos sobre la seguridad y salubridad alimentaria global llevó a la **Asamblea General de las Naciones Unidas (ONU) a declarar el 2020 Año Internacional de la Sanidad Vegetal**. En esta atención especial subyace el reconocimiento intrínseco de que: (i) las enfermedades, plagas de fitófagos, y malas hierbas tienen efectos negativos importantes y globales sobre la seguridad y salubridad alimentaria, el bienestar de la población y la conservación de los recursos agrícolas y forestales; (ii) dichos efectos son escasamente percibidos por la sociedad y por los medios de difusión en la mayoría de los países desarrollados y en vías de desarrollo; y (iii) la Sanidad Vegetal es un pilar clave para contrarrestarlos (*Global Initiative Announced to Protect World's Plants from Pests*. SeedWorld, <https://seedworld.com/global-initiative-announced-to-protect-worlds-plants-from-pests/>.Google Scholar). Además, en la consecución de este último objetivo mediante estrategias de gestión integrada, la **Sanidad Vegetal propicia: (i) la sostenibilidad de los agroecosistemas porque contribuye al uso eficiente de los insumos necesarios para la productividad de los cultivos sanos** (ej., material vegetal, agua, suelo, fertilizantes, energía, etc.) -y por ello reduce la necesidad de incrementar el consumo de estos para mantener la productividad en cultivos afectados-; y (ii) la **protección de las personas y del medioambiente a través de acciones que minimizan el uso de productos fitosanitarios de síntesis con residuos perjudiciales** (Jiménez Díaz, 2009).

A1.3. Importancia de la Sanidad Vegetal en la seguridad alimentaria

El efecto de las enfermedades, plagas y malas hierbas se ha cuantificado sistémicamente por la magnitud de las pérdidas que originan en la cosecha alcanzable, y se muestra en el Apartado A1.3.2. siguiente. Sin embargo, los registros históricos sobre la incidencia de plagas y enfermedades indican que su **potencial de causar grandes devastaciones en los agroecosistemas trasciende la reducción de las cosechas.**

A1.3.1. Repercusión social de la Sanidad Vegetal más allá de la reducción del rendimiento de los agroecosistemas

La consecuencia principal de los organismos nocivos de los cultivos y masas forestales de los que trata la Sanidad Vegetal es la reducción del rendimiento, del valor de la cosecha de los cultivos, o de la utilidad de las masas forestales. Sin embargo, estas consecuencias han ido en ocasiones más allá y han provocado auténticos problemas sociales a lo largo de la historia. A continuación, se muestran algunos ejemplos de enfermedades, plagas y malas hierbas que han provocado algunas de esas situaciones.



Foto 1. Impacto de las enfermedades de las plantas sobre la disponibilidad de alimentos y sectores agroindustriales. **A.** Parcela experimental de patata en el Valle de Toluca (Méjico) afectada gravemente por un ataque de mildiu causado por *Phytophthora infestans* (Cortesía de H.D. Thurston); **B.** Esporulación de *Plasmopara viticola* en granos inmaduros de uva afectados de mildiu de la vid; **C, D.** Huanglongbing de los cítricos causado por '*Candidatus Liberibacter spp.*': vista de plantaciones de naranjos mostrando los nuevos brotes amarillos (C), y 100 % de árboles afectados (D) (Cortesía de J. Bové).

A1.3.1.1. Enfermedades

La historia de la Fitopatología –la ciencia que estudia la naturaleza, causa, control y aspectos socioeconómicos de las enfermedades de las plantas (cf., Apartado A1.5.1.)- está jalonada de ejemplos de enfermedades (causadas en su mayor parte por patógenos exóticos introducidos en las áreas de cultivo; cf., Apartado A2.1.2. y Capítulo B1.), que conmocionaron a las sociedades, porque originaron hambrunas, enfermedades de las personas y tasas elevadísimas de fallecimientos en la población, y ruina económica de los agricultores, entre otros efectos (Ainsworth, 1981; Santini et al., 2018). Por ejemplo, en 1845, unas condiciones ambientales inusualmente favorables propiciaron que el oomiceto *Phytophthora infestans* (el agente causal del mildiu de la patata, Foto 1A), primero detectado en Bélgica, se extendiera hasta España, Irlanda, Italia y países escandinavos. En Irlanda, la prolongación de dichas condiciones favorables hasta 1852 propició el desarrollo de epidemias devastadoras de la enfermedad que causaron hambrunas, la muerte de más de 1 millón de irlandeses, y la emigración a América del Norte de 1,5 millones adicionales. Casi 100 años más tarde, la conjunción en Bengala –actualmente parte de la India y Bangladesh- de condiciones ambientales inusuales junto con la introducción del hongo *Bipolaris oryzae* (sinónimo: *Helminthosporium oryzae*) y la utilización de cultivares de arroz muy susceptibles al mismo, favoreció ataques de la mancha parda que destruyeron el 50-90 % de los cultivos de arroz y desencadenaron epidemias que causaron una catástrofe similar a la del mildiu de la patata, porque ocasionaron hambre, malnutrición, y la muerte de más de 2 millones de personas.

Aunque por la facilidad de su estudio se tienda a referir a las micosis vegetales para ilustrar los efectos devastadores de las enfermedades, tales efectos son también propios de las de otra naturaleza etiológica. Un ejemplo relevante de ello es la sucesión de pandemias causadas por el virus del mosaico de la cassava o mandioca, un cultivo básico para la alimentación en África Central y África Oriental en las que viene causando grandes pérdidas (Fargette et al., 2006). Las devastaciones por esta enfermedad se han venido produciendo desde finales del siglo XIX, pero no fue hasta los años 1970s que su etiología viral

fue desvelada, y hasta final del siglo XX que la disponibilidad de tecnologías moleculares permitiera determinar que es causada por un complejo de geminivirus denominados CMGs, que son transmitidos por moscas blancas del complejo de especies *Bemisia tabaci*.

La introducción de agentes nocivos exóticos en nuevas áreas de cultivo también ha demostrado la capacidad de: (i) arruinar sectores agroindustriales de gran significación social; (ii) interferir con el uso de recursos de disponibilidad limitada, como el suelo agrícola; y (iii) originar desastres ecológicos.

A1.3.1.1.1. Impacto de los patógenos exóticos sobre sectores agroindustriales

Entre 1851 y 1878, el sector vitivinícola de Francia y países vecinos fue arrasado secuencialmente por tres agentes nocivos de la vid originarios de EE. UU.: *Erysiphe necator* (sinónimo: *Uncinula necator*, agente causal del oídio), *Daktulosphaira vitifolia* [sinónimo: *Phylloxera vastatrix*, la filoxera (ver detalles más abajo)], y *Plasmopara viticola* [agente causal del mildiu (Foto 1B)]. El oídio, que había sido detectado en Inglaterra a finales de los años 1840s afectando vides importadas de EE. UU., redujo en 1854 más del 80 % la producción vinícola francesa. La gravedad del impacto en la industria llevó a importar vides de los EE. UU. que presumiblemente no serían afectadas por la enfermedad, pero con las cuales se introdujo *D. vitifoliae*, un insecto homóptero que parasita el sistema radical de la vid cuyos daños, en la segunda mitad del siglo XIX, superaron en importancia los debidos al oídio (cf., Apartado A1.3.1.2.). La magnitud del desastre causado por la filoxera motivó la importación de vides no viníferas resistentes a *D. vitifoliae*, que sirvieron de portainjerto para los cultivares de vides europeas y controlaron los daños causados por el homóptero. Sin embargo, en 1878, con las plantas importadas se introdujo *P. viticola*, cuya expansión en Francia y países vecinos en los 5 años siguientes reprodujo la ruina causada por el oídio en décadas anteriores.

La historia más reciente demuestra que estos impactos fitosanitarios sobre sectores agroindustriales estratégicos siguen ocurriendo en distintos países y cultivos, como es el caso del huanglongbing (HLB), brote amarillo o *greening* de los cítricos causado por tres especies de la bacteria '*Candidatus Liberibacter*' que son transmitidas por dos psilas vectoras, *Diaphorina citri* y *Trioza erytreae*. El HLB está considerada mundialmente como la enfermedad más destructiva de los cítricos, ya que ha ocasionado la desaparición de cerca de 100 millones de árboles en distintos países de Asia y África comprometiendo seriamente la supervivencia de su citricultura (López et al., 2018). Pero actualmente no solo puede ser un factor limitante de la citricultura, sino conllevar la destrucción parcial del sector agrícola y de las industrias relacionadas en los países mediterráneos, que de momento están libres de ella. Esto ocurrió en la primera década del siglo XXI en Brasil primero y en el estado de Florida (EE. UU.) poco después (Foto 1C, D). El impacto económico del HLB ha sido dramático, y la situación actual sigue siendo difícil, a pesar de que las primeras detecciones se realizaron en el siglo XXI, cuando la bacteria responsable era ya bien conocida y no obstante fue introducida de países asiáticos (Bové, 2014). En Brasil, 6 años después de la identificación de '*Ca. Liberibacter asiaticus*' en 2004, más de 6 millones de árboles fueron eliminados -oficial, y extraoficialmente de forma directa por los cultivadores- en un intento de limitar la diseminación de la bacteria. En Florida (EE. UU.), los costes de cultivo aumentaron drásticamente desde 2005, cuando se informó por primera vez de la enfermedad, y los costes de las inspecciones y de los tratamientos con insecticidas contra el vector aumentaron, respectivamente, de 4 a 17 dólares USA/ ha y de 240 a 1.000 dólares USA/ ha y año (EPPO, 2022). Además del elevado impacto económico, el HLB también tuvo un impacto social muy alto en los 7 primeros años tras la detección. Como consecuencia de la devastación de los cultivos, muchas empresas envasadoras de zumos y plantas de procesamiento quebraron, con pérdidas de más de 3.630 millones de dólares USA y de más de 6.600 puestos de trabajo. Ello demuestra que, en el siglo XXI, y aunque se disponía de la tecnología para haber erradicado los focos iniciales de la bacteriosis, no se tomaron las medidas necesarias para atajar los primeros focos y luego fue demasiado tarde. En Florida, el control del HLB

está dificultado en gran manera por la estructura y disposición de las fincas de las zonas afectadas, la presencia de muchos cítricos enfermos en jardines particulares, y la imposibilidad de imponer un programa de erradicación obligatorio. En cambio, en el Estado de São Paulo, Brasil, actualmente se han obtenido buenos resultados en dicho control mediante la aplicación a gran escala de una estricta estrategia integrada, que combina disposiciones legales, inspecciones periódicas, erradicación de árboles sintomáticos y control químico de vectores (Bové, 2014). Sin embargo, estas medidas tienen un elevado coste económico para los agricultores y la enfermedad ha llevado a la ruina a muchos pequeños productores citrícolas.

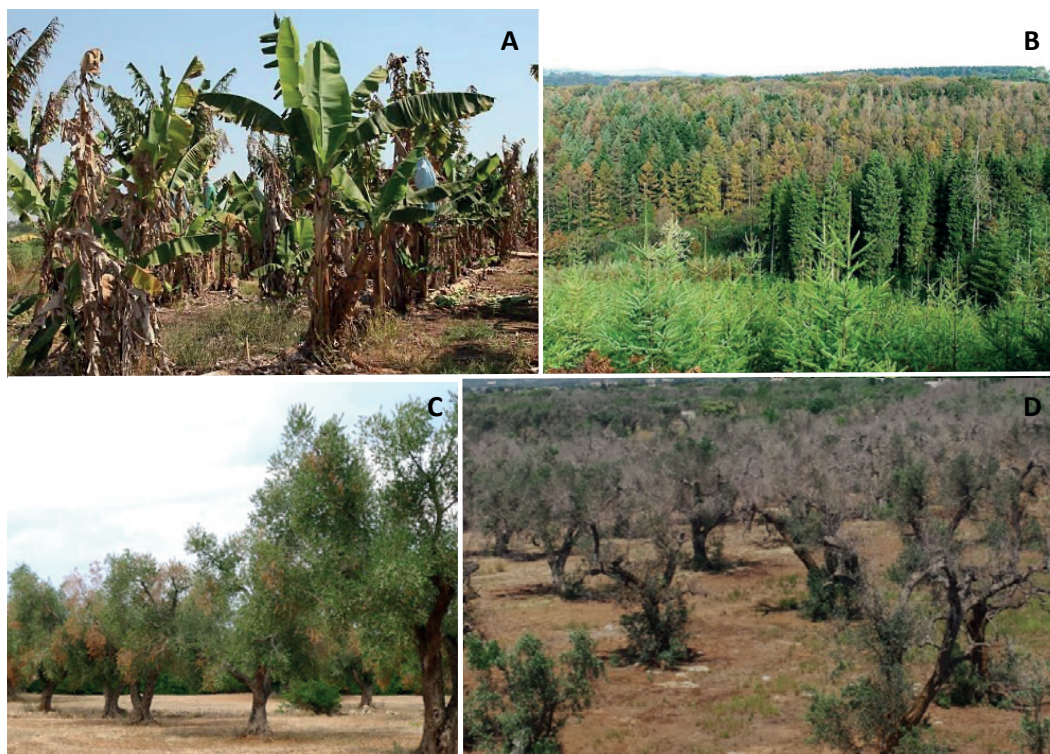


Foto 2. Impacto de patógenos exóticos sobre recursos de disponibilidad limitada y el medioambiente.

A. Mal de Panamá del plátano causado por la raza 4 Tropical de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Cortesía de M.M. Jiménez Gasco);

B. Vista de bosque de alerce japonés (*Larix* sp.) en el Reino Unido severamente afectado de muerte súbita causada por *Phytophthora ramorum*.

C, D. Decaimiento rápido del olivo causado por la estirpe ST53 de *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca* en la zona de Gallipoli (Apulia, Italia): desarrollo progresivo de los síntomas (C) (Cortesía de F. Nigro) y vista general de la devastación producida por una epidemia de la enfermedad (D) (Cortesía de B.B. Landa).

A1.3.1.1.2. Impacto de los patógenos exóticos sobre uso de recursos de disponibilidad limitada

La repercusión de los agentes nocivos sobre la disponibilidad de suelo agrícola es ilustrada por la expansión geográfica del mal de Panamá causado por el hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, que infecta la planta sistémicamente y sobrevive en el suelo durante décadas (Foto 2A). El establecimiento de nuevas plantaciones mediante nuevos rizomas 'hijos' de plantas infectadas y la dificultad en el control de la enfermedad, junto con la importancia económica y social del plátano –posiblemente la fruta más consumida en el mundo– en los países productores, han propiciado que la expansión del cultivo se basara fundamentalmente en la utilización de suelos vírgenes. Ello ha dado lugar a la infestación y disminución progresiva de la disponibilidad de suelo de cultivo, y contribuido a la amplia distribución global del patógeno en las zonas plataneras, de manera que el mal de Panamá es uno de los ejemplos más claros y convincentes de que el uso agrícola eficiente del suelo es comprometido por la introducción de patógenos exóticos capaces de sobrevivir prolongadamente en él (Ploetz, 1990).

Un caso similar concierne las bacterias *Ralstonia solanacearum*, *R. pseudosolanacearum* y *R. solanacearum* subsp. *indonesiense* –tres de las escasas bacterias fitopatógenas capaces de sobrevivir en distintos suelos– que causan la marchitez bacteriana y pueden infectar a más de 400 especies de más de 50 familias botánicas, principalmente Solanaceae y Musaceae. Se ha estimado que, solo en patata, esta bacteriosis afecta cada año a 1,54 millones de ha en más de 80 países, con pérdidas que superan los 950 millones de dólares USA. En España, la marchitez bacteriana se describió por primera vez en 1995.

Posteriormente se han detectado nuevos focos en diversas CC. AA., varios de los cuales se asociaron al riego con aguas superficiales contaminadas, y en todos ellos se aplicaron las medidas de erradicación establecidas en la legislación de la UE (López et al., 2018). El ciclo biológico de estos patógenos se desarrolla tanto dentro como fuera del huésped, debido a que pueden sobrevivir además del suelo, en agua y malas hierbas. Desde estos reservorios, las células bacterianas pueden moverse hacia las raíces de plantas susceptibles por quimiotaxis positiva hacia los exudados radicales. Tras causar el marchitamiento y, en muchos casos la muerte del huésped, estas bacterias retornan al suelo, agua u otros hábitats, en los que pueden sobrevivir durante largos períodos de tiempo en ausencia de plantas huésped. El suelo se puede contaminar, además, a través de material vegetal infectado -con o sin síntomas- y por el agua a través de la escorrentía de las aguas de riego y los vertidos de residuos agrícolas o industriales contaminados. El cultivo de plantas susceptibles en las zonas de suelo infestado es muy problemático ya que los métodos de control más utilizados son los culturales, como la rotación de cultivos o el barbecho durante años, y por ello la marchitez bacteriana conlleva importantes pérdidas económicas y sociales (López et al., 2018).

A1.3.1.1.3. Impacto de los patógenos exóticos sobre el medioambiente

El potencial de estos patógenos de ocasionar desastres ecológicos es paradigmáticamente ilustrado por el chancro del castaño causado por el hongo *Cryphonectria parasitica* (sinónimo: *Endothia parasitica*), uno de los ejemplos más dramáticos de la devastación que puede causar la introducción de agentes nocivos exóticos en un área geográfica nueva, en la que existen plantas susceptibles con las cuales no han co-evolucionado y que por tanto no han desarrollado resistencia o tolerancia a ellos. Este hongo fue introducido en EE. UU. a principios del siglo XX en plantas de *Castanea* spp. importadas de Japón que se plantaron en la ciudad de Nueva York. El chancro del castaño es posiblemente la enfermedad de mayor impacto medioambiental conocido, porque en los 50 años siguientes a la introducción causó la muerte de cerca de 3.500 millones de árboles en cerca de 3,5 millones de ha de bosques de castaño americano (*Castanea dentata*), con una tasa de expansión de 37 km/ año (Anagnostakis, 1988).

A1.3.1.1.4. Impacto social de epidemias recientes

La mayor parte de los ejemplos arriba citados ocurrieron en fechas en que el conocimiento sobre la naturaleza y el control de los agentes nocivos para los cultivos y masas forestales era incipiente, pero otros son más recientes y ambos se han elegido por su significación en la historia pasada y presente de la Fitopatología. Sin embargo, los avances en dicho conocimiento en el curso del tiempo no han impedido que hayan continuado produciéndose casos de importancia comparable, poniendo de manifiesto la estrecha vinculación de los fenómenos de devastación con: (i) el desarrollo de la agricultura intensiva; (ii) la intensificación del tráfico transnacional de material vegetal promovido por el comercio internacional; y (iii) la insuficiente eficiencia de la certificación e inspección fitosanitaria. Algunos ejemplos ocurridos durante las últimas dos décadas, que se describen a continuación, son notables por la gran resonancia que han tenido sus efectos sobre la sostenibilidad agrícola y forestal en la sociedad y los medios de comunicación.

La muerte súbita de alcornoques, encinas y robles (*Quercus* spp.) causada por el oomiceto *Phytophthora ramorum* originario del este de Asia, ha devastado extensas zonas boscosas de *Quercus* spp. y *tanoak* (*Lithocarpus densiflorus*) en California y Oregón (EE. UU.), y de alerce japonés en Gales, Inglaterra e Irlanda, en las que probablemente fue introducido a finales el siglo XX (Grünwald et al., 2012) (Foto 2B). La extensa mortalidad de árboles causada por *P. ramorum* tiene importantes y negativas repercusiones en la ecología de bosques y plantaciones (ej., cambios en la estructura y composición de las comunidades animales y vegetales, erosión del suelo, etc.), así como en las funciones y servicios ecosistémicos que prestan, sin menosprecio de las pérdidas económicas debidas a costes de erradicación en viveros, restricciones cuarentenarias, etc.

De forma similar, la necrosis regresiva de las ramas del fresno -causada por el hongo *Hymenoscyphus fraxineus* también originario del este asiático e introducido probablemente en Polonia a principio de 1990s-, originó conmoción social y eco mediático sin precedentes en el Reino Unido a finales de 2012, cuando se informó de su introducción y distribución, posiblemente en plantas importadas de Europa Central (Freer-Smith y Webber, 2017). Las epidemias de necrosis regresiva han ocasionado la muerte del 70-90 % de fresnos nativos en Europa, y para las ocurridas en el Reino Unido se ha estimado un coste económico de 7.600 millones de libras esterlinas en 10 años, derivado de la pérdida de los beneficios de la biodiversidad que determinan los fresnos (Coker et al., 2019; Hill et al., 2019).

Entre los graves problemas fitopatológicos que afectan a las masas forestales se encuentra *Bursaphelenchus xylophilus*, el nematodo de la madera del pino, un organismo nocivo de cuarentena en la Unión Europea (UE) que provoca graves daños en las especies del género *Pinus* sp. y otras coníferas. La infección por este nematodo causa el decaimiento súbito de los árboles afectados, produciendo una sintomatología conocida como seca o marchitamiento de los pinos e importantes daños económicos y ecológicos derivados de la muerte del arbolado. Además, la naturaleza cuarentenaria del nematodo exige que se realicen inspecciones en frontera, y supone importantes restricciones al comercio de madera y material de embalaje en aquellos países o zonas donde está presente, lo que implica un aumento de los costes de comercialización de estos productos. Este patógeno es originario de Norteamérica, se detectó en Europa en 1999 en Portugal, y en 2008 se detectó en España por primera vez en zonas actualmente demarcadas. La presencia en la Península Ibérica del coleóptero cerambícido *Monochamus galloprovincialis*, considerado el vector más eficiente de *B. xylophilus*, supone un gran riesgo para España, ya que puede dispersar al nematodo desde Portugal y desde las zonas demarcadas españolas. Como medida general de control, los órganos competentes de las CC. AA. establecen el censo de todos los aserraderos e industrias de la madera, para que puedan ser inspeccionadas y sometidas a seguimiento fitosanitario oficial en caso de que reciban madera o cualquier otro material susceptible a este nematodo procedente de una zona demarcada.

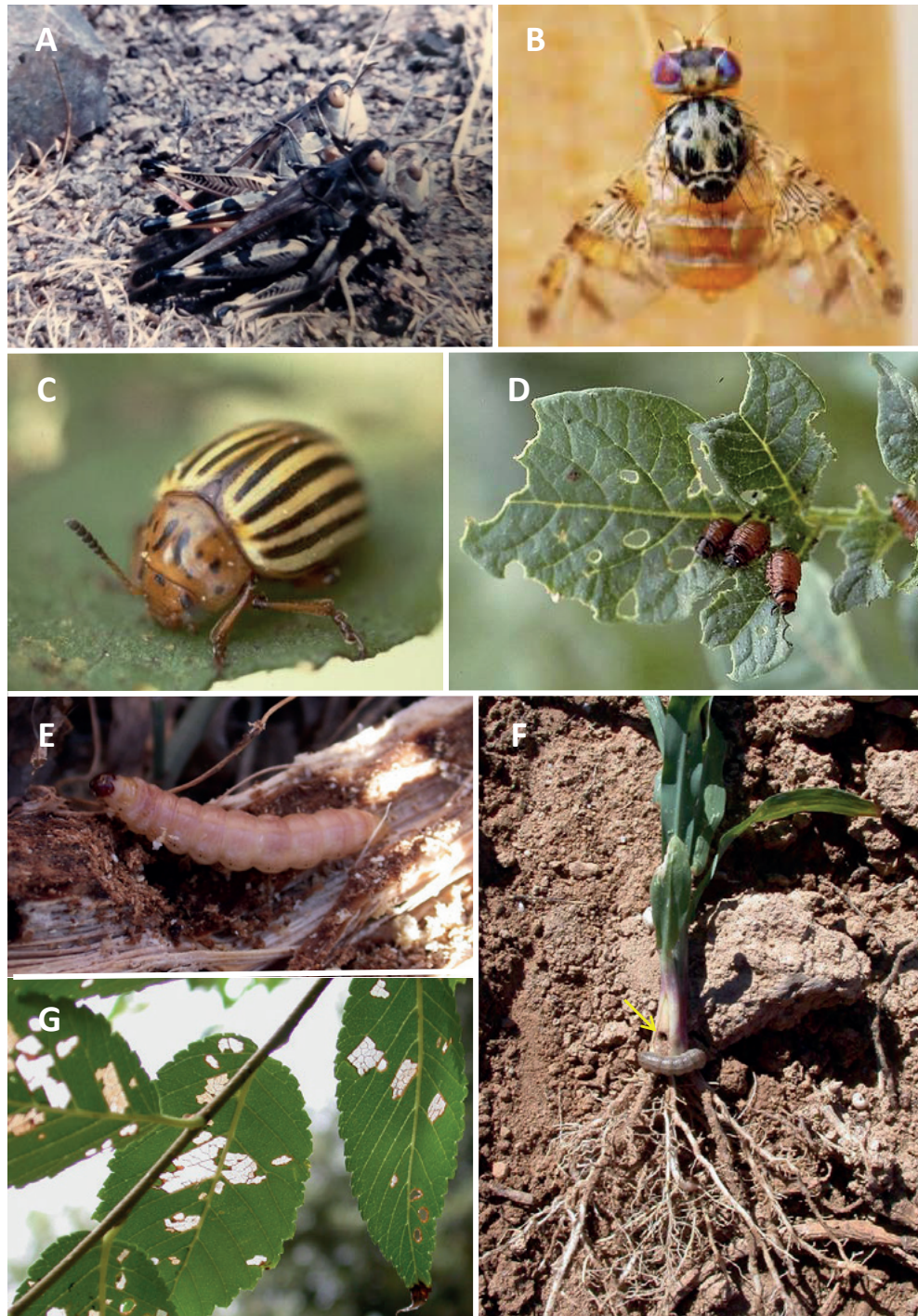
El decaimiento rápido del olivo, causado por la estirpe CoDIRO (acrónimo de *Complesso del Disseccamento Rapido dell'Olivo*) (grupo genético ST53) de la bacteria *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca*, es ejemplo de enfermedades cuya capacidad destructiva ha generado gran impacto social. Esta enfermedad fue descrita por primera vez en Europa en 2013 en la península de Salento de la región italiana de la Apulia, y desde entonces está causando conmoción en el sector oleícola europeo por la devastación que origina y la rapidez con que la bacteria se extiende por todo el olivar de la región. *X. fastidiosa* subsp. *pauca* -muy probablemente introducida en plantas ornamentales importadas de Costa Rica- ya infectaba más de 8.000 ha de olivar en Italia cuando el decaimiento rápido fue diagnosticado en 2013, pero en el año 2019 la enfermedad se había extendido por más de 25.000 ha y afectaba a más de 10 millones de olivos, causando pérdidas estimadas en más 1.000 millones de euros (Foto 2C, D). *X. fastidiosa* comprende varias subespecies cuya capacidad destructiva en cultivos tan importantes como almendro, cítricos, y vid, entre otros, es bien conocida y por ello es considerada una de las bacterias fitopatógenas más peligrosas e importantes. Por ejemplo, la clorosis variegada de los cítricos causada por *X. fastidiosa* subsp. *pauca* y la enfermedad de Pierce de la vid causada por *X. fastidiosa* subsp. *fastidiosa* originaron pérdidas anuales de más de 100 y 104 millones de dólares USA, respectivamente, en plantaciones de naranjo en los estados de Sao Paulo y de Minas Gerais (Brasil) y de vid en California.

A1.3.1.2. Plagas

Es probable que la primera vez que muchos lectores escucharon el término 'plaga' estuviera asociado a la proliferación de langostas y sus consecuencias, en algún texto histórico no restringido a la agricultura, singularmente en el Libro del Éxodo de la Biblia. Las langostas son acrididos que cumplen con

la teoría de las fases de Uvarov, que pueden ser solitarios, pero en ciertas circunstancias se vuelven más abundantes y cambian su comportamiento y hábitos, volviéndose gregarios, para abandonar por el vuelo sus áreas de reserva en lo que constituye una plaga de langosta. Un gran enjambre puede constar de hasta 40-150 millones de langostas/ km² repartidas en un área de miles de km², y una bandada de 1 km² puede llegar a consumir una cantidad de vegetación equivalente a los alimentos que consumen 35.000 personas (FAO, 2020a). Por ello, la incidencia de las langostas ha provocado a lo largo de la historia migraciones de grandes poblaciones en busca de alimento y de posibilidades de supervivencia tras sus ataques. La gestación de las plagas de langosta se produce primariamente por un conjunto de factores abióticos, con énfasis en los climáticos, y antrópicos, en general asociados al abandono del seguimiento y mantenimiento preventivo de sus poblaciones en las zonas de reserva.

Foto 3. Especies de insectos que han ocasionado plagas de importancia histórica (A-D) y tipos de daños causados por artrópodos fitófagos (E-G). **A.** La langosta mediterránea (*Locusta migratoria*) (Cortesía de E. Quesada); **B.** Adulto de la mosca mediterránea de la fruta (*Ceratitis capitata*), ejemplo de plaga exótica (cf., Capítulo B1.) con impacto notable, introducida en el sur de Europa hace varios decenios (Cortesía de C. Ioratti); **C, D.** Escarabajo de la patata, *Leptinotarsa decemlineata*: Adulto (C) y larvas devorando el limbo foliar de una planta de patata (D); **E.** Oruga del taladro del maíz (*Sesamia nonagrioides*) que ha vaciado una caña y matado la planta antes de madurar la mazorca; **F.** Orificio en la base de una planta de maíz (flecha) causado por *Spodoptera exigua* que impedirá el crecimiento de ella; **G.** Daño causado por la galeruca del olmo, *Galerucella luteola*, que reduce el valor ornamental de esa especie de jardín y de arbolado urbano (Fotos C a G, cortesía de M. Eizaguirre).



La langosta del desierto (*Schistocerca gregaria*) es probablemente la especie más conocida debido a su amplia distribución (África del Norte, Medio Oriente y subcontinente indio) y a su gran capacidad migratoria. Está considerada como la más peligrosa de todas las especies de plagas migratorias que existen, debido a su capacidad para reproducirse con rapidez, migrar a grandes distancias desde sus zonas de reserva y destruir cultivos (AEMET, 2020). Entre 2003 y 2005, una gran infestación de *S. gregaria* cubrió gran parte de África occidental y llegó hasta Oriente Medio, afectando a más de 8 millones de personas y ocasionando pérdidas de hasta el 100 % del cereal, el 90 % de las verduras y el 85 % de los pastos. Para controlar la plaga fue necesario aplicar 13 millones de litros de insectidas y, aún así, el daño a los cultivos se estimó en 2.500 millones de dólares USA.

La langosta migratoria (*Locusta migratoria*), que comprende hasta 10 subespecies, constituye enjambres en África, Asia, Australia y Nueva Zelanda, pero es más rara en Europa. La langosta mediterránea (*Docios-taurus maroccanus*) (Foto 3A) es una especie endémica en España, con un ciclo biológico extraordinariamente adaptado a sus áreas de reserva peninsulares en Aragón y Extremadura (Quesada-Moraga y Santiago-Álvarez, 2000; Santiago-Álvarez et al., 2003), donde se llevan a cabo medidas de seguimiento y control preventivo de este acrídido; a modo de ejemplo, solo en Aragón el presupuesto para el control de la langosta en 2018 ascendió a 335.000 euros. Las técnicas de la agricultura de precisión están ayudando en buena medida en la vigilancia y control de esta especie; ese es el caso, por ejemplo, del uso de imágenes de satélites para la detección de zonas propicias para la puesta de la langosta mediterránea en el valle de La Alcuía en Ciudad Real (Ruiz de la Hermosa et al., 2022).

La contribución de la FAO a nivel internacional ha sido decisiva para la vigilancia de infestaciones de langosta (<http://www.fao.org/3/i6152en/i6152en.pdf>). La *European Space Agency* (ESA) con una serie de socios internacionales y la FAO se unieron para ensayar cómo predecir la presencia de estos insectos y alertar a los países con una antelación de 2 a 3 meses, tiempo esencial para que las autoridades locales puedan organizar medidas preventivas. Dada su importancia real, la FAO elabora boletines mensuales y actualizaciones periódicas que resumen la situación de la langosta y pronostican la migración y reproducción de los insectos en cada país (<https://www.fao.org/home/es/2020>). En 2020, la langosta del desierto puso en peligro los medios de vida agro-pastoriles y la seguridad alimentaria de millones de personas en el Cuerno de África y el Yemen. Con una campaña de respuesta a gran escala y sin precedentes, bajo la coordinación de la FAO, se han tratado más de 1,3 millones de hectáreas infestadas en 10 países y evitado la pérdida de 2,7 millones de toneladas de cereales, aproximadamente (FAO, 2020b).

En los tiempos modernos, el caso de la filoxera, *D. vitifoliae*, ya mencionado más arriba (cf., Apartado A1.3.1.1.1.) es posiblemente el más significativo por sus consecuencias económicas y sociales (<https://daily.seventy.com/measuring-phylloxeras-impact-on-the-world-of-wine/9>). En el Apartado A1.2.1.1. se ha indicado la secuencia de problemas sanitarios de la vid en la segunda mitad del siglo XIX que llevaron a la importación de material vegetal de EE. UU. a Europa. Fruto de ello fue la introducción y establecimiento de la filoxera en el valle del Ródano, que arruinó la viticultura europea en los decenios siguientes. En los primeros años de la extensión de la filoxera en Francia, los viticultores españoles, más libres de la competencia vecina, aumentaron sensiblemente la superficie vitivinícola (un proceso iniciado con la introducción del oídio en Francia, ver más arriba) y todavía hoy podemos ver las pendientes montañosas con bancales para el cultivo de la vid que se han ido abandonando para su cultivo. Poco después, la filoxera se extendió por la Península y su viticultura siguió la misma suerte que la francesa.

Señalemos, dada la naturaleza de este libro, que la sociedad francesa tardó bastante tiempo en aceptar oficialmente que el agente causante del problema era un homóptero próximo a los pulgones, y

quienes así lo indicaron en un principio fueron ridiculizados. Tengamos en cuenta que el desarrollo de la ciencia a mediados del siglo XIX era todavía incipiente, particularmente la etiología de los problemas sanitarios en los vegetales, máxime cuando se trataba de problemas causados inherentemente por insectos fitófagos. La aplicación en Francia, unos cuantos años después, del mejor método para combatir la plaga cual fue el injerto de las variedades europeas en pies de vid americana, junto con la ruina de la viticultura de los países vecinos, permitió el nuevo florecimiento de la industria vitivinícola francesa. Al igual que ocurre con lo indicado para otros problemas fitosanitarios, la incidencia de la filoxera en la sociedad y economía de la Europa meridional contribuyó, aun a costa de sufrir enormes pérdidas, al progreso de la Sanidad Vegetal y de la Agronomía dedicada al control de plagas y enfermedades. Posiblemente, el control de la filoxera mediante injertos sobre patrones americanos resistentes constituye, todavía hoy, uno de los mayores éxitos del uso de la resistencia del material vegetal para el control de plagas causadas por insectos.

Otro ejemplo de plaga cuyas consecuencias han ido más allá de la reducción del rendimiento del cultivo, se da en la mosca mediterránea de la fruta, *Ceratitis capitata*, un díptero muy polífago y originario de la costa occidental de África a pesar de su nombre (Foto 3B). La incidencia económica de la mosca mediterránea de la fruta es muy importante en los sectores cítrico y frutícola de la cuenca mediterránea, donde en la actualidad es considerada la plaga más importante del cultivo del naranjo y del cv. 'Clementina' de mandarino. Debido al comercio internacional de las frutas atacadas por *C. capitata*, esta especie es cosmopolita y actualmente se extiende por Europa meridional y central, África, América Central y del Sur y oeste de Australia (<https://gd.eppo.int/taxon/CERTCA/distribution>). En varias zonas cítricas de EE. UU. (singularmente California y Florida), *C. capitata* es detectada esporádicamente dando lugar a la aplicación de medidas estrictas de erradicación tales como el método de machos estériles. Las medidas cuarentenarias aplicadas al comercio de cítricos con EE. UU. están siendo muy estrictas. Así, por ejemplo, en noviembre de 2001 se produjo la suspensión cautelar de las importaciones de clementinas españolas en los EE. UU. y la imposición en los años siguientes -y hasta la fecha- de un protocolo de exportación muy restrictivo que redujo las exportaciones a dicho país. Ello ha obligado a poner en marcha medidas de control muy estrictas, que no se hubieran aplicado en España por la simple reducción de la cosecha que causa en dicho producto. Como este ejemplo de la mosca mediterránea de la fruta, podríamos encontrar otros muchos, cuya principal repercusión negativa sobre la agricultura y silvicultura se centra en las restricciones comerciales que causa su presencia en una zona al estar incluida la plaga en las listas cuarentenarias de importación y exportación de países terceros y a pesar de que su incidencia en el rendimiento del cultivo sea escasa o incluso nula en algunos casos.

En el capítulo B1 de este libro se pueden encontrar otros ejemplos de especies exóticas invasoras de agentes nocivos que crean dificultades en el comercio internacional de plantas y sus productos, sean estos de uso alimentario u ornamental.

A1.3.2. Pérdidas mundiales de cosecha ocasionadas por enfermedades, plagas, y malas hierbas en cultivos importantes

Aunque los ataques de plagas, enfermedades e infestaciones de malas hierbas en los cultivos y masas forestales no tengan habitualmente el carácter devastador antes descrito, su incidencia causa importantes pérdidas en la cantidad de la cosecha anual alcanzable –el tipo de pérdida más generalmente considerado–, así como las asociadas a la calidad del producto cosechado y las que tienen lugar durante su almacenamiento y transporte.

La estimación de la magnitud de las pérdidas de cosecha alcanzable causadas por enfermedades, plagas y malas hierbas ha sido objeto de diversos estudios, entre los que cabe destacar por su abordaje sistemático

el realizado por Cramer (1967) sobre las concernientes a nivel global en más de 60 cultivos que incluían cereales, frutales, hortalizas, cultivos industriales y oleaginosos, y patata. Según este autor, las enfermedades, plagas y malas hierbas originaban una pérdida global anual del 34,9 % de la cosecha alcanzable de dichos cultivos -del cual 11,6 % era debida a enfermedades, 13,8 % a plagas y 9,5 % a malas hierbas- con un valor de 75.000 millones de dólares USA. Dos décadas más tarde, bajo el auspicio de la Asociación Europea de Protección de Cultivos, un grupo de científicos alemanes iniciaron uno de los estudios más concienzudos y completos realizado hasta la fecha, para estimar las pérdidas globales de cosecha causadas por enfermedades, plagas y malas hierbas en un grupo de cultivos seleccionados por su significación en la alimentación y la industria, utilizando datos derivados de publicaciones científicas o de ensayos de eficacia realizados por empresas de productos fitosanitarios. Las cifras más significativas de dicho estudio que han sido publicadas se presentan a continuación.

En 1994, Oerke y colaboradores estimaron que, a pesar de la aplicación de varias medidas de control de enfermedades, plagas y malas hierbas, durante el bienio 1988-1990 se produjo una pérdida media del 38 % de la cosecha global alcanzable en los ocho cultivos más relevantes para la alimentación y la industria (algodón, arroz, café, cebada, maíz, patata, soja, y trigo), que en conjunto ocupaban la mitad de la superficie cultivada en el mundo. De la referida pérdida de cosecha media global, el 12,4 % se atribuyó a enfermedades, 13,7 % a plagas, y 11,9 % a malas hierbas. En términos monetarios, el valor medio de la pérdida global de cosecha en los ocho cultivos durante dicho bienio fue del 42,1 % del valor potencial del producto cosechado, del cual 13,3 % fue atribuido a enfermedades, 15,6 % a plagas y 13,2 % a malas hierbas. Oerke et al. (1994) estimaron además que la pérdida media de cosecha global habría alcanzado un valor medio del 69,8 % de no haberse aplicado las medidas de control, y que la aplicación de estas pudo prevenir unas pérdidas de cosecha equivalentes al 27,6 % (160.000 millones de dólares USA) del valor de la cosecha alcanzable (579.000 millones de dólares USA).

En 2004, Oerke y Dehne (2004) publicaron una actualización de las estimaciones de las pérdidas globales de cosecha en los ocho cultivos antes referidos para el periodo de 1996 a 1998, a fin de considerar la potencial influencia de los avances en las tecnologías de producción y protección de cultivos sobre las estimaciones realizadas en 1988-1990. Dichos autores concluyeron que la pérdida media global de cosecha en 1996-1998 ascendió al 32 % de la cosecha alcanzable, de la cual 12,6 % correspondió a enfermedades, 10,1 % a plagas y 9,4 % a malas hierbas. Esta estimación de pérdida media global de la cosecha alcanzable fue confirmada en un estudio realizado en el bienio 2001-2003 con el mismo propósito que en el de 1996-1999 -en el que se excluyeron café y cebada de los ocho cultivos considerados anteriormente-, y la pérdida media global se estimó en 32,4 % y las debidas a enfermedades, plagas y malas hierbas en 12,8 %, 10,8 % y 8,8 %, respectivamente, a pesar de las medidas de control adoptadas en todo el mundo (Oerke, 2006). La valoración más completa del impacto negativo de enfermedades, plagas y malas hierbas sobre los cultivos requiere sumar a las estimaciones de pérdidas globales de cosecha alcanzable las que tienen lugar en postcosecha, que en términos generales se estiman en 10 % del producto cosechado (Pinstrup-Andersen, 2001), de manera que las pérdidas totales de cosecha atribuibles globalmente a enfermedades, plagas y malas hierbas en los periodos de estudio variaron en un intervalo de 42 a 48 % de la cosecha teóricamente alcanzable.

Recientemente, Savary et al. (2019) han confirmado la validez de las estimaciones de Oerke y colaboradores mediante una metodología distinta a la empleada por ellos, al determinar las pérdidas anuales de cosecha alcanzable originadas por 137 enfermedades y plagas de artrópodos fitófagos en cultivos de arroz, maíz, patata, soja y trigo en 67 países que producen el 84 % de la producción global de los mismos y cuyo consumo constituye el 50 % de la ingesta calórica. Dichas pérdidas globales anuales de cosecha alcanzable fueron del 30 % en arroz y variaron entre el 17 y el 23 % en los otros

cuatro cultivos, indicando que 20-30 % es un intervalo fiable para la estimación de la pérdida global anual de cosecha en arroz, maíz, patata, soja y trigo debidas a plagas y enfermedades. Puesto que a dichas pérdidas han de sumarse las debidas a malas hierbas, estimadas entre 8,8 y 11,9 % por Oerke y colaboradores, las estimaciones de Savary et al. (2019) indican que entre 1988-2003 y 2017 no se han producido cambios significativos en la Sanidad Vegetal global a nivel general. Y ello ha ocurrido a pesar de (i) los avances en el conocimiento y la tecnología para el control de las enfermedades, plagas y malas hierbas que han tenido lugar durante dicho periodo y (ii) la prohibición de uso de varios productos fitosanitarios llevadas a cabo en varias zonas de producción de alimentos en el mundo (Savary et al., 2019). En términos económicos y aunque es muy difícil cuantificar el impacto financiero de los distintos tipos de organismos nocivos (Rao y Reddy, 2020), las estimaciones de Sastry y Zitter (2014) cifran las pérdidas mundiales de rendimiento por enfermedades causadas por virus en 30.000 millones de dólares USA anuales, y la FAO ha estimado que, globalmente, las pérdidas anuales ocasionadas solo por las enfermedades -un promedio de 12,6 en el cómputo global- alcanzan un valor cercano a 220.000 millones de dólares USA.

A1.3.2.1. Pérdidas de cosecha en la agricultura española ocasionadas por enfermedades, plagas, y malas hierbas

La importancia de las enfermedades, plagas, y malas hierbas en España fue estudiada recientemente por una Comisión de científicos de diversos ámbitos de la Sanidad Vegetal, en el marco de una Acción Sectorial promovida por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), con objeto de identificar las enfermedades, plagas, y malas hierbas de carácter estratégico que causan pérdidas actualmente en sectores agrícolas y forestales clave para la economía española. A tal fin, la Comisión recabó información sobre los problemas más importantes de la Sanidad Vegetal en España a la Sociedad Española de Fitopatología (SEF), la Sociedad Española de Entomología Aplicada (SEEA), la Sociedad Española de Malherbología (SEMh), la Asociación Española de Sanidad Vegetal (AEsaVE), la Subdirección General de Sanidad e Higiene Vegetal y Forestal del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), y los Servicios de Sanidad Vegetal de las CC. AA. a través del Comité Fitosanitario Nacional. Con la información recibida la Comisión estableció una prioridad de binomios Cultivo-Enfermedad/Plaga/Mala hierba mediante criterios de: (i) Importancia económica (según cultivo/masa forestal y pérdidas causadas por la enfermedad/plaga/mala hierba); (ii) Disponibilidad de medios eficaces para el control de estos últimos; (iii) Carácter endémico o emergente del problema fitosanitario (cf., Apartado A1.3.2.1.1. y Capítulo A2., Apartado A2.1.1.); (iv) Viabilidad del control de este mediante investigación y desarrollo (I+D); y (v) Medidas de I+D que deben ser priorizadas para su utilización en programas de Gestión Integrada.

Fruto del referido estudio fue la identificación de un conjunto de cerca de 50 enfermedades, plagas y malas hierbas que en la actualidad afectan gravemente la estabilidad y productividad de sectores clave de la agroindustria española (ej., cultivos frutales, horticolas protegidos y al aire libre, olivo, vid), que se consideran endémicas o son resultado de introducciones de agentes nocivos exóticos que se establecieron con éxito por la dificultad de su control y/o la ineficiencia de las acciones de erradicación llevadas a cabo tras su detección. Aunque la magnitud de las pérdidas de cosecha que ocasionan dichas afecciones no ha sido adecuadamente cuantificada, la incidencia de estas ejerce un importante impacto negativo sobre los agroecosistemas implicados y se ilustra a continuación mediante algunos casos seleccionados a título de ejemplo, incluyendo: (i) enfermedades (verticilosis y antracnosis del olivo, complejo de Petri de la vid, fuego bacteriano del manzano y peral, mancha bacteriana de los frutales de hueso, tristeza de los cítricos, sharka de los frutales de hueso, mosaico de cultivos horticolas y nematodos noduladores); (ii) plagas (picudo rojo de las palmeras, y minador de la planta y fruto del tomate); y (iii) malas hierbas (amapola, vallico o bledos entre otras muchas) (Jiménez Díaz et al., 2019).

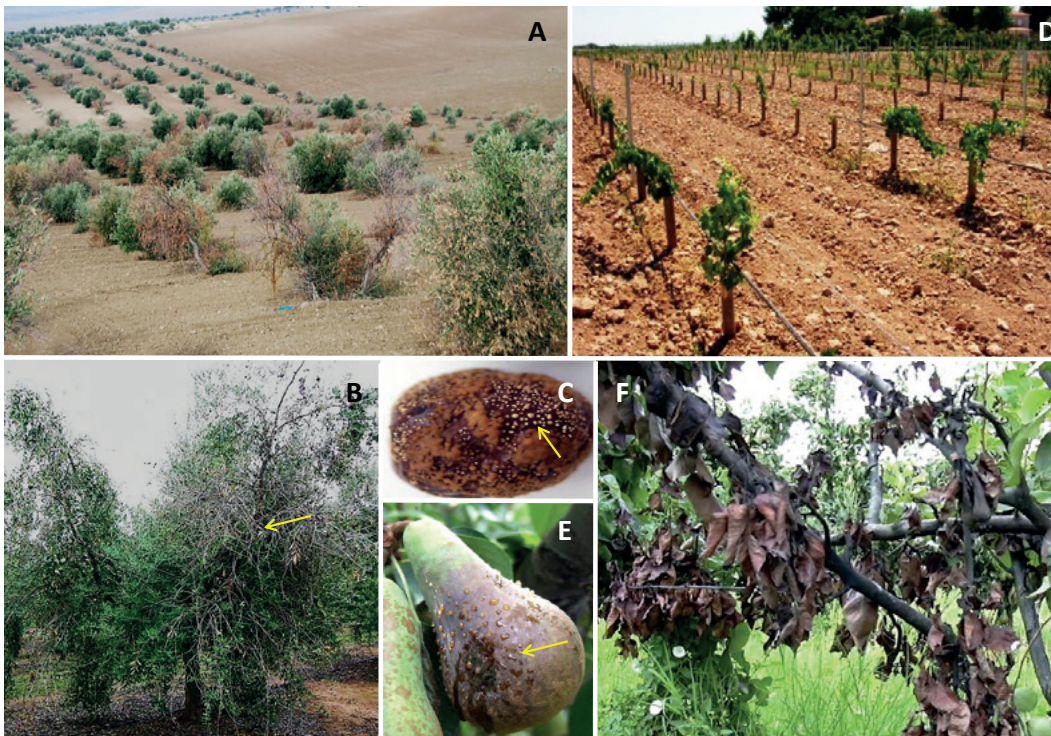


Foto 4. Enfermedades importantes de cultivos clave en la agricultura española I. **A.** Verticilosis del olivo causada por *Verticillium dahliae* en Écija (Sevilla) (Cortesía de A. Trapero); **B,** **C.** Antracnosis del olivo causada por diversas especies de *Colletotrichum*: Necrosis de ramas y defoliación extensa en olivo gravemente afectado (flecha) (B); y pudrición de oliva en la que se reproduce el hongo (flecha) (C) (Cortesía de A. Trapero); **D.** Vista de un viñedo joven afectado por el complejo de Petri causado por *Phaeoemoniella chlamydospora*, *Phaeoacremonium* spp. y otros hongos, en el que se aprecian plantas con desarrollo normal junto con otras de escaso desarrollo afectadas por el complejo (Cortesía de J. Armengol); **E, F.** Fuego bacteriano del peral causado por *Erwinia amylovora*: fruto maduro afectado con abundantes exudados de la bacteria (flecha) (E); y ramas necrosadas con hojas de aspecto quemado que dan nombre a la enfermedad (F) (Cortesía de M. A. Cimbra).

A1.3.2.1.1. Pérdidas de cosecha en la agricultura española ocasionadas por hongos y oomicetos, bacterias, virus, viroides y nematodos representativos

En este sub-apartado se indican las pérdidas de cosecha debidas a algunas enfermedades graves de cultivos estratégicos que han sido y continúan siendo prevalentes en España.

La verticilosis causada por el hongo *Verticillium dahliae* es actualmente el problema sanitario más importante del olivar en España y una de las enfermedades más amenazadoras de este cultivo en el mundo (Foto 4A) (Jiménez-Díaz et al., 2012). Esta enfermedad afecta al olivar en varias CC. AA., pero tiene especial impacto en Andalucía donde afecta a 1 de cada 3 olivares en las ocho provincias andaluzas -i.e., una prevalencia media del 34,4 % con un intervalo de variación del 48,9 % en la provincia de Jaén al 9,9 % en la de Málaga- con incidencias medias entre 12 y 20 % de olivos enfermos, según provincias (Jiménez Díaz, 2019). La pérdida global de cosecha que ocasiona la verticilosis del olivo en Andalucía es determinada por la muerte del árbol enfermo, así como por la muerte de inflorescencias y la desecación de los frutos en los árboles que sobreviven al ataque. Aunque dicha pérdida no se ha estimado directamente todavía, estimaciones cuidadosas de cosecha en olivos afectados en Israel indicaron pérdidas del 87 y 73 % de la cosecha/árbol el 3º y 5º años tras la plantación en olivares de regadío del cv. 'Picual', respectivamente (Levin et al., 2003); y en Córdoba, la cosecha de olivos del cv. 'Arbequina' afectados en plantaciones de regadío se redujo el 84 % y 56 % de la cosecha/árbol el 3º y 4º años tras la plantación, respectivamente (R.M. Jiménez Díaz y J.L. Trapero Casas, *datos no publicados*).

La antracnosis o aceituna jabonosa es la enfermedad más importante de la aceituna a nivel mundial y también en España, donde es causada de forma endémica por varias especies fúngicas del género *Colletotrichum* (Foto 4B, C). Esta enfermedad se caracteriza por la putrefacción del fruto -que determina su caída y contribuye a la pérdida de cosecha así como a la pérdida de calidad del aceite extraído- y el desarrollo de necrosis en las hojas y la defoliación y muerte de ramas. Las pérdidas de cosecha originadas por la antracnosis del olivo en España se han estimado en 75 millones de euros, pero las epidemias

severas favorecidas por otoños lluviosos y templados pueden ocasionar pérdidas del 85 al 100 % de la cosecha (Jiménez Díaz et al., 2019).

El complejo de Petri de la vid, que es causado por un grupo de hongos taxonómicamente diversos, constituye el principal problema fitopatológico limitante de la productividad y longevidad del viñedo a nivel mundial y en España, porque origina un decaimiento de vides jóvenes caracterizado por el retraso en su desarrollo, reducción de la vitalidad y eventual muerte de la cepa (Foto 4D). Esta enfermedad está ampliamente extendida en las diversas zonas vitivinícolas españolas, pero no se dispone de datos precisos sobre la prevalencia e incidencia de los ataques y de las pérdidas de cosecha ocasionadas por ellos en España. A título indicativo sobre la magnitud potencial de dichas pérdidas pueden servir las estimadas en Francia, que en la actualidad ascienden a un valor global de 1.000 millones de euros (Jiménez Díaz et al., 2019).

El fuego bacteriano causado por la bacteria *Erwinia amylovora* es la enfermedad más grave de las que afectan a los frutales de pepita a nivel mundial por ser altamente contagiosa y de difícil control. En España, esta enfermedad se detectó primero en el País Vasco, en 1995, y con posterioridad se ha extendido progresivamente a la mayoría de las CC. AA. productoras de manzano y peral. Las pérdidas económicas anuales causadas por el fuego bacteriano suelen ser muy elevadas en cultivares muy susceptibles de peral (*Pyrus communis*) y de manzano (*Malus domestica*), cuando las condiciones climáticas son favorables, y de menos cuantía en otras especies de pepita y rosáceas ornamentales. La enfermedad ocasiona la muerte extensa de inflorescencias, frutos inmaduros, y brotes, e incluso la muerte rápida de los árboles por la formación de chancros que anillan troncos y ramas (Foto 4E, F). A estas pérdidas directas hay que sumar los costes derivados de las medidas de inspección, erradicación y control de la enfermedad asociados a su carácter inicial de cuarentenaria en la UE, -si bien *E. amylovora* ha dejado de ser bacteria cuarentenaria pero está sujeta a medidas de regulación-. Los costes de la erradicación de plantas afectadas que se realizó desde 1995 fueron subvencionados al 50 % por la CC. AA. correspondiente y el MAPA. Por ejemplo, todos estos costes alcanzaron un valor de más de 1 millón de euros solo en la CC. AA. de Aragón durante el periodo 2000-2004 (Jiménez Díaz et al., 2019).

La mancha bacteriana de los frutales de hueso y del almendro es causada por *Xanthomonas arboricola* pv. *pruni* -una bacteria que también fue de cuarentena en la UE y que ahora está sometida a regulación- que infecta albaricoquero (*Prunus armeniaca*), almendro (*P. dulcis*), cerezo (*P. avium*), ciruelo europeo (*P. domestica*) y japonés (*P. salicina*), y melocotonero (*P. persica*), y que se encuentra distribuida en varias CC. AA. en España. Esta bacteriosis es considerada la más grave de las que afectan a los frutales de hueso, porque a la pérdida de cosecha derivada del debilitamiento del árbol afectado por la defoliación que causa en cultivares susceptibles -que en almendro se han estimado hasta 47 % de la cosecha- se une el nulo valor económico de los frutos afectados (Foto 5A, B) (Jiménez Díaz et al., 2019).

La tristeza de los cítricos es la enfermedad viral más importante de los cítricos en España y en el mundo. El virus de la tristeza de los cítricos, Citrus tristeza virus (CTV), fue posiblemente introducido en España en plantones de naranjo, 'Navel', importados de California entre 1932 y 1935, y en la actualidad se encuentra presente en la mayoría de las regiones españolas donde se cultivan cítricos. La enfermedad se desarrolla en especies de cítricos susceptibles cuando se injertan sobre naranjo amargo, limonero o zamboa, y el virus se transmite por injerto y por pulgones. La tristeza se caracteriza por un decaimiento generalizado del árbol asociado a defoliación, muerte de ramillas, y brotaciones cortas con producción de frutos pequeños y de baja calidad. Este decaimiento se puede prolongar durante años, acabando con la muerte del árbol, o resolverse con un colapso rápido en pocas semanas (Foto 5C, D). Los primeros ataques de tristeza se describieron en la Comunidad Valenciana en 1957, y desde entonces hasta final del siglo XX la enfermedad ha causado la muerte de más de 45 millones de árboles injertados sobre naranjo amargo (Cambra et al., 2000), y un coste

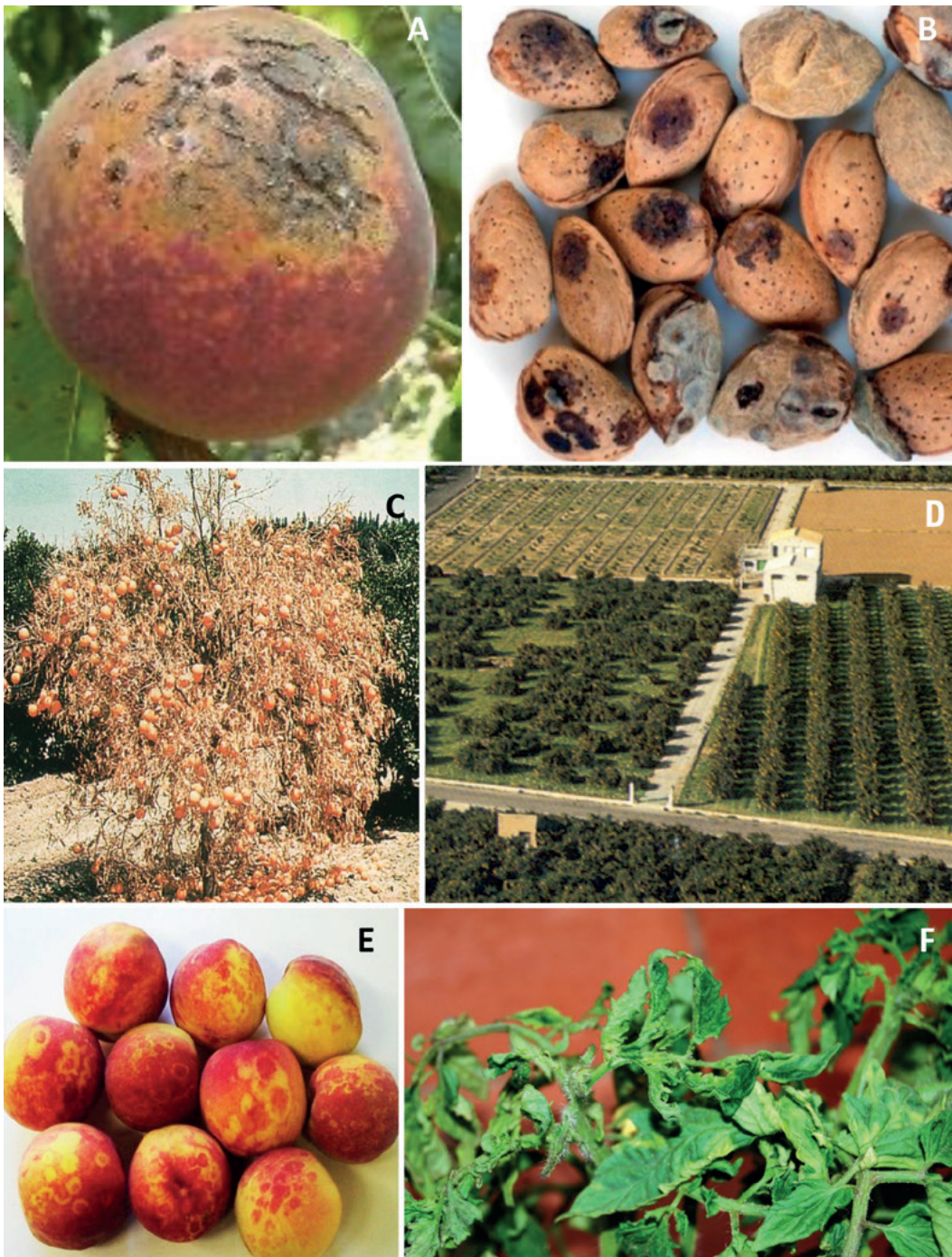


Foto 5. Enfermedades importantes de cultivos clave en la agricultura española II.

A, B. Mancha bacteriana de los frutales de hueso y del almendro causada por *Xanthomonas arboricola* pv. *pruni*: melocotón con manchas en la piel (A); y almendras caídas al suelo con distintos síntomas de la bacteriosis (Cortesía de M.A. Cambra);

C, D. Tristeza de los cítricos causada por el virus de la tristeza (CTV): colapso de naranjo dulce injertado sobre naranjo amargo (C) (Cortesía de P. Moreno) y: (D) aspecto de plantaciones de demostración en una zona con alta prevalencia de CTV, en Valencia: arriba a la derecha parcela en la que se han arrancado todos los árboles, a la izquierda parcela con árboles tolerantes recién plantados, abajo a la izquierda, parcela con huecos por muerte de árboles sobre naranjo amargo y los restante afectados por CTV y a la derecha nueva plantación con plantas de combinaciones tolerantes. (Cortesía de M. A. Cambra);

E. Frutos con decoloración de melocotonero afectado por la sharka causada por el virus de la viruela del ciruelo (PPV) (Cortesía de M. A. Cambra);

F. Mosaico y deformaciones foliares en tomate infectado por el virus del mosaico del pepino (CMV) en tomate (Cortesía de R. Santiago).

de 1.000 millones de euros por la eliminación de árboles enfermos y lucro cesante de cosecha. El problema se resolvió en España y otros países mediante un ejemplar programa de reconversión citrícola con cultivares certificados sobre patrones tolerantes, ya que en dichas combinaciones no se desarrollan síntomas de la enfermedad ni pérdidas (Jiménez Díaz et al., 2019).

La sharka o viruela de los frutales de hueso causada por el virus de la viruela del ciruelo, Plum pox virus (PPV), es la enfermedad más importante de dichos frutales porque reduce gravemente la producción de fruto y su calidad en las especies y cultivares susceptibles. Este virus se detectó en España en 1984, y su impacto actual y potencial deriva de la importancia del cultivo de frutales de hueso, principalmente de melocotonero (Foto 5E). Las pérdidas primarias, directas e indirectas ocasionadas por la sharka se han cifrado a

nivel internacional en más de 10.000 millones de euros en los últimos 35 años. En España, los programas de erradicación y de reducción de la incidencia han determinado la **eliminación de más de 2,8 millones de árboles infectados con un coste de cerca de 70 millones de euros desde 1989** (Jiménez Díaz et al., 2019), y de más de 219 millones de euros en los últimos 25 años -con una media de cerca de 9 millones de euros/año- de costes directos e indirectos debidos a análisis y subvenciones (Cambra, M., comunicación personal).

Los mosaicos de cultivos hortícolas causados por el virus del mosaico del pepino (Cucumber mosaic virus, CMV) son posiblemente las virosis más importantes de este sector agrícola en España y están considerados entre las 10 virosis de plantas más graves a nivel mundial. El CMV es el **virus vegetal de más amplio espectro de plantas huésped conocido**, que incluye más de 1.200 especies en 100 familias de mono y dicotiledóneas. Se trata también de **uno de los virus más importantes por la cuantía de las pérdidas económicas que causa** -en cultivos tan dispares como los de especies de solanáceas y cucurbitáceas hortícolas, leguminosas forrajeras, plátano, y ornamentales- y la **facilidad con que se disemina en los cultivos**, en los que es transmitido de forma no persistente por más de 80 especies de pulgones. El CMV puede causar grandes pérdidas económicas, atribuibles a la reducción del crecimiento y de la eficiencia fotosintética de la planta enferma asociada a los mosaicos foliares (Foto 5F), o a la calidad y al valor de mercado de la cosecha debido al manchado, deformación y alteración de la acumulación de azúcares y ácidos en los frutos. En España, la importancia del CMV es máxima en cultivos hortícolas, siendo el virus de mayor incidencia en cultivos al aire libre de calabacín, melón, pimiento, y tomate, en los que puede ocasionar pérdidas de hasta el **50 y el 80 % de la cosecha según cultivo** (Jiménez Díaz et al., 2019).

Los nematodos fitoparásitos son a menudo referidos como los "enemigos ocultos" de los cultivos, porque sus ataques carecen de sintomatología específica y dan lugar a un decaimiento generalizado que se suele atribuir a deficiencias en la fertilidad del suelo o en la provisión de agua a la planta si la afección no es diagnosticada adecuadamente. Entre ellos, los **nematodos noduladores del sistema radical** (*Meloidogyne* spp.) son considerados los de **mayor importancia económica a nivel global, y en España constituyen el principal problema fito-nematológico en cultivos hortícolas y frutales por la importancia cuantitativa y cualitativa de las pérdidas que ocasionan** y la diversidad de plantas a las que infectan. Las tres especies de *Meloidogyne* más importantes y extendidas mundialmente -*M. arenaria*, *M. incognita* y *M. javanica*- están **presentes en la mayoría de las CC. AA. en España y constituyen unos de los principales problemas de la horticultura y fruticultura españolas**, en las que se ha producido un incremento en la incidencia y gravedad de sus ataques coincidiendo con la intensificación agrícola, el desarrollo de los cultivos protegidos y el monocultivo o especialización en un número reducido de los mismos. Un estudio sobre más de 120 explotaciones hortícolas representativas de las 37.000 ha de cultivo de invernadero en la provincia de Almería, indicó que el 17,7 % de ellos estaban infestados por *M. arenaria*, *M. incognita* o *M. javanica* ocasionando una pérdida media de cosecha estimada del 30,8 % (Jiménez Díaz et al., 2019).

A1.3.2.1.2. Pérdidas de cosecha en la agricultura española ocasionadas por artrópodos fitófagos y malas hierbas representativas

Los sectores agroforestales españoles son afectados por un elevado número de plagas de fitófagos e infestaciones de malas hierbas (Foto 3), entre las cuales se describen a continuación algunas seleccionadas por la significación del impacto que tienen en sectores ornamentales o productivos.

El **picudo rojo de las palmeras** (*Rhynchophorus ferrugineus*) es **paradigma del impacto negativo de un insecto exótico cuando se introduce en plantas ornamentales de zonas urbanas**. Este coleóptero, originario del sur de Asia y parásito de numerosas especies de palmeras, se extendió rápidamente por la costa mediterránea española entre 2004 y 2006, en un proceso aparentemente asociado a la **importación masiva de palmeras en España -en su mayor parte procedentes de Egipto donde era conocida la existencia de la plaga-** para satisfacer la creciente demanda de las nuevas urbanizaciones asociadas

al *boom* inmobiliario. El impacto negativo del picudo rojo sobre la estructura ornamental urbana en la zona referida –y otras zonas españolas– ha ido asociado a la extrema sensibilidad de la palmera canaria (*Phoenix canariensis*) al insecto, que entre 2005 y 2009 causó la muerte de 43.000 palmeras de *P. canariensis* y 7.000 de palmera datilera (*P. dactylifera*) (Foto 6A). Según estimaciones del MAPA, el valor de las palmeras muertas y los gastos de prevención y tratamientos para el control de esta plaga en zonas urbanas y viveros, a nivel estatal y en las CC. AA., han significado una pérdida total de 150 a 200 millones de euros (Jiménez Díaz et al., 2019).

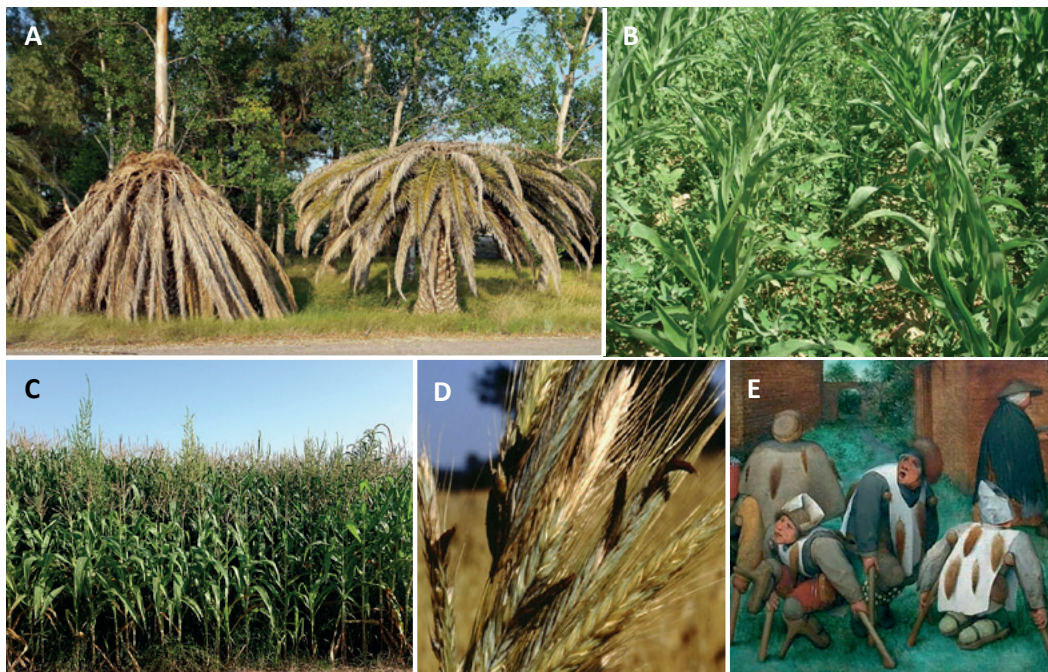


Foto 6. Plagas y malas hierbas importantes de cultivos clave en la agricultura española. **A.** Síntomas característicos y muerte de palmera *Phoenix canariensis* causados por el picudo rojo *Rhynchophorus ferrugineus* en Alzira (Valencia) (Cortesía de F. García Marí); **B.** Competencia de malas hierbas en un campo de maíz sin la escarda necesaria; **C.** Plantas de *Amaranthus palmeri* en un campo de maíz en Lleida (cortesía de J. Recasens Guinjuan); **D.** Esclerocios de *Claviceps purpurea*, cornezuelo, en espigas de cebada; **E.** Motivos del cuadro “Los Mendigos” de Pieter Bruegel el Viejo (1568) en el que se muestra el desmembramiento derivado de la ingesta de pan elaborado con harina obtenida de cultivos afectados por cornezuelo (Adaptado de CAST, 2003).

Otro ejemplo reciente de fitófago exótico que está causando problemas significativos es *Tuta absoluta*, un lepidóptero minador de la planta y fruto del tomate. Traemos a colación este ejemplo porque su incidencia en el cultivo del tomate, tanto al aire libre como en invernaderos, va más allá de las repercusiones en el rendimiento y calidad de la producción, ya que su introducción en la Cuenca Mediterránea hacia los años 2006 o 2007 puso en riesgo los programas de control integrado ya muy implantados en la producción protegida de tomate del territorio europeo y basados en el uso de enemigos naturales de las plagas. La necesidad de volver a realizar tratamientos insecticidas intensivos para el manejo de la nueva plaga hizo temer por la eficacia de los parasitoides y depredadores que venían siendo muy utilizados comercialmente en cultivo de tomate de invernadero. Afortunadamente, la sólida implantación y actividad del sistema de I+D y de transferencia de conocimientos y tecnologías en ese sector en los principales países europeos, permitió la identificación de enemigos naturales específicos del nuevo fitófago y su uso, junto con la adaptación en la utilización de depredadores generalistas ya utilizados contra otras plagas del tomate, en el manejo de la nueva plaga. Esta rápida respuesta a la introducción del fitófago invasor ha permitido con el tiempo encontrar soluciones de eficacia complementaria al control biológico, tales como el empleo de trampas y feromonas, así como el diseño de prácticas culturales encaminadas a rebajar la tasa de crecimiento de las poblaciones de *T. absoluta*.

Las infestaciones de malas hierbas constituyen problemas fitosanitarios relevantes en numerosos cultivos herbáceos y leñosos, entre las que caben destacar las que afectan a los cereales de invierno tanto por las pérdidas de rendimiento que ocasionan como por los costes que conlleva su control (Foto 6B).

Además, el control de aquellas con herbicidas es dificultado por el elevado número de casos de malas hierbas resistentes a ellos, debido al uso reiterado de materias activas con un mismo mecanismo de acción. Las especies de malas hierbas en cereales de invierno incluyen alpistes (*Phalaris* sp.), avena loca (*Avena sterilis*), bromo (*Bromus diandrus*) y vallico (*Lolium rigidum*), entre otras, pero una de las de mayor importancia es la amapola (*Papaver rhoeas*), una papaverácea anual de ciclo biológico muy adaptado al de los cereales a cuyas infestaciones se asocian pérdidas de hasta el 32 % de la cosecha. La nocividad de las infestaciones de amapola reside en la alta persistencia de su banco de semillas, su gran viabilidad y el extenso periodo de tiempo de germinación -desde octubre hasta abril-. La alogamia de esta especie determina que sus poblaciones contengan elevada variabilidad genética que propicia la selección de biotipos resistentes a los herbicidas que se aplican de forma reiterada, como auxinas sintéticas e inhibidores de la acetolactato sintasa (Jiménez Díaz et al., 2019).

Además, la introducción de especies de malas hierbas exóticas invasoras y en algunos casos, resistentes a herbicidas, como *Amaranthus palmeri*, constituye un problema emergente en la agricultura española (Foto 6C) (Torra et al., 2020).

Si bien en este capítulo nos estamos refiriendo a las pérdidas de alimentos debidas a las enfermedades, plagas y malas hierbas, no habría que olvidar los altos valores que alcanza el desperdicio de comida (*food waste*) en el mundo occidental –en ocasiones comparables a las pérdidas anteriormente mencionadas, hasta el punto que la UE ha empezado a tomar medidas para reducirlo drásticamente tal como señala el informe de Caldeira et al. (2019).

A1.4. Importancia de la Sanidad Vegetal en la salubridad alimentaria

Además de la reducción del crecimiento y producción de las cosechas y masas forestales, las enfermedades, plagas y malas hierbas pueden tener un efecto negativo no menos importante, aunque de menor repercusión social hasta fechas recientes, cual es incidir gravemente sobre la salubridad alimentaria de los consumidores del producto cosechado. En el caso de las enfermedades, este hecho resulta de la contaminación de dichos productos con hongos productores de micotoxinas o con patógenos humanos. Este fenómeno es propiciado en ocasiones por la presencia en los alimentos de insectos y ácaros fitófagos que, bien en el almacén o en el propio campo, facilitan la instalación y permanencia de los microorganismos nocivos en las heridas que causan. Recientemente, la FAO ha señalado que el consumo de alimentos contaminados causa globalmente más de 200 enfermedades y afecta a cerca de 600 millones de personas anualmente. No es de extrañar, por lo tanto, el auge que está tomando el concepto de 'One Health' (Salud o Sanidad Única) que propugna la consideración simultánea de la salud humana, veterinaria, vegetal y ambiental en nuestro bienestar (Capua, 2020). En ese concepto se incluyen otros aspectos del sistema alimentario que van más allá de la producción, conservación y transformación de alimentos, tales como el derecho a la alimentación en los países y capas de la población humana más pobres o la necesidad de consumir dietas más sanas en los países más ricos y poblaciones humanas más favorecidas. Es un aforismo mencionado a menudo, que actualmente tenemos en el mundo un 10 % de la población con desnutrición y un 25 % con sobrepeso (von Braun et al., 2021).

A1.4.1. Micotoxinas y micotoxicosis

Las micotoxinas son metabolitos secundarios de variada naturaleza química producidos por hongos taxonómicamente diversos, que constituyen una importante amenaza para la seguridad alimentaria porque: (i) son altamente tóxicos o potentes agentes carcinógenos para personas y animales domésticos a concentraciones de 1-1.000 µg/kg; y (ii) pueden contaminar cosechas básicas como alimentos o

piensos (ej., cacahuete, cebada, centeno, maíz, soja, trigo, etc.) e incluso pastos y forrajes (CAST, 2003; Schmale y Munkvold, 2014).

Los principales hongos productores de micotoxinas son: (i) **especies de *Fusarium* patogénicas** sobre el cultivo de interés (ej., *F. graminearum*, y especies pertenecientes al complejo *Gibberella fujikuroi* anteriormente comprendidas en el epíteto -actualmente invalidado- *F. moniliforme*: *F. fujikuroi*, *F. proliferatum*, *F. verticillioides*, etc.); (ii) **especies no patogénicas del producto contaminado que pertenecen a los géneros *Aspergillus*** (ej., *A. carbonarius*, *A. flavus*, *A. niger*, *A. ochraceus*, *A. parasiticus*), y ***Penicillium*** (ej., *Penicillium verrucosum*); y (iii) **ascomicetos del género *Epichloë*** [ej., *E. baconii*, *E. festucae*, *E. typhina*, etc. -incluyendo el anamorfo *Neotyphodium* (ej., *N. coenophialum*, *N. lolii*, etc.-), que establecen una **simbiosis mutualista endófito con plantas pascícolas** (ej.; *Festuca* spp., *Lolium* spp.) a las que confieren tolerancia contra estreses abióticos y resistencia contra mamíferos herbívoros (Schmale y Munkvold, 2014; Vázquez de Aldana et al., 2015). Las principales micotoxinas producidas por dichas especies fúngicas comprenden **alcaloides, aflatoxinas, fumonisinas, ocratoxinas, tricotecenos, y zearalenona**, que causan **importantes enfermedades (micotoxicosis) en personas** (ej., alucinaciones, edemas, carcinomas, encefalopatías, gangrena, hemorragias intestinales, nefropatías, etc.) y **animales domésticos** (ej., abortos, aspereza en el pelo, deformaciones, desórdenes en la movilidad, diarreas, hemorragias, inapetencia, pérdida de peso, reducción de producción lechera y eficiencia reproductiva, vómitos, etc.) (Schmale y Munkvold, 2014; Vázquez de Aldana et al., 2015).

Los impactos de las micotoxinas sobre la salud de la población humana son de difícil cuantificación, pero a escala global son sin duda los causantes de mayores pérdidas económicas, a través de los costes sanitarios y reducción de productividad laboral, sin considerar la inapreciable valoración de las pérdidas de vidas humanas. En otros contextos, las micotoxinas tienen un **significativo impacto económico que incide sobre todos los componentes de la cadena de provisión de alimentos y piensos** (ej., agricultores, ganaderos, distribuidores, procesadores, etc.) (Schmale y Munkvold, 2014). La FAO ha estimado que, a nivel global, el 25 % de las cosechas agrícolas anuales están contaminadas con micotoxinas, con una **pérdida anual de cerca de 1.000 millones de toneladas** de alimentos y productos alimentarios. Dicho impacto económico comprende: (i) las pérdidas ocasionadas por la reducción de las cosechas debidas a las enfermedades causadas por las especies toxígenas fitopatógenas; (ii) las asociadas a la reducción del valor de las cosechas por la contaminación con micotoxinas; y (iii) las ocasionadas en la productividad y salud animal. Estimaciones realizadas en EE. UU. atribuyeron unas pérdidas anuales de 500 a 1.500 millones de dólares USA a la contaminación de cacahuete y maíz con aflatoxinas, de maíz con fumonisinas, y de trigo con deoxinivalenol (CAST, 2003). **Adicionales a dichas pérdidas están las derivadas de las limitaciones en el comercio internacional por los umbrales de contaminación en las importaciones** (ej., 4 µg/kg en la UE y 20 µg/kg en EE.UU.), y de la **depreciación de subproductos de uso en alimentación animal**. Así, un estudio del Banco Mundial estimó que la regulación sobre aflatoxinas ocasionaba un coste de 750 millones de dólares USA a las exportaciones de cereales y frutos secos de África (Cardwell et al., 2001), y el uso de maíz grano para la obtención de etanol produce un residuo seco de utilidad como pienso para ganado porcino, cuyo valor decrece porque el contenido en micotoxinas del grano se concentra en el residuo durante el proceso de producción de etanol, dando lugar a pérdidas millonarias en EE. UU. (Schmale y Munkvold, 2014).

El estudio de las micotoxinas (micotoxicología) comenzó a principio de la década de 1960 por la muerte en una granja inglesa de 100.000 pavos jóvenes alimentados con harina de cacahuete -denominada entonces "enfermedad X del pavo" y atribuida a la contaminación de dicha harina con aflatoxinas producidas por *A. flavus*-. Pero la creciente sensibilización social respecto de la contaminación de productos agrícolas por micotoxinas, ha impulsado la investigación para desarrollar sistemas de garantía que minimicen la producción de micotoxinas y su incorporación en la cadena alimentaria, el desarrollo

de metodologías de análisis y manipulación para prevenir su introducción en alimentos y piensos, y la legislación para establecer niveles de seguridad en la comercialización.

Sin embargo, la relación entre el consumo de productos vegetales contaminados por metabolitos fúngicos y micotoxicosis forma parte de la Historia de la Fitopatología y está vinculada a una enfermedad del centeno causada por el hongo ascomiceto *Claviceps purpurea* denominada ergotismo (cornezuelo en español). Este hongo se caracteriza por infectar las flores de numerosas gramíneas cultivadas (ej., avena, cebada, centeno, trigo, etc.) y silvestres (ej., *Bromus*, *Festuca*, *Lolium*, *Poa*, etc.), cuyos granos (cariópsides) son reemplazados por un estroma del hongo denominado esclerocio con forma de espolón de gallo -el término ergotismo deriva del francés *ergot*, cuernecillo, espuela-, mediante los cuales sobrevive prolongadamente en el suelo (Foto 6D). En primavera frescas y lluviosas, coincidiendo con la antesis de la planta susceptible, los esclerocios invernantes germinan formando decenas de estromas pedunculados donde se producen y descargan en el aire miles de ascosporas que infectan las flores. La cosecha de cultivos de centeno -y otros cereales- afectados de cornezuelo propicia que los esclerocios puedan permanecer mezclados con el grano, y que la harina obtenida de este contenga los metabolitos del hongo. Los documentos históricos vinculan el ergotismo -una enfermedad que causó decenas de miles de muertos en las zonas cerealistas frías y húmedas de Europa Central que dependían del cultivo de centeno-, con el consumo de pan producido con harina de centeno infestado con esclerocios de *C. purpurea*. Los esclerocios de *C. purpurea* contienen varios alcaloides tóxicos, los más importantes de los cuales son la ergotamina, la hidroximetilamida del ácido lisérgico -precursora de la droga alucinógena LSD-, la ergina y la ergonovina, que, según su prevalencia en la ingesta determinan el desarrollo de las formas gangrenosa y convulsiva del ergotismo (Foto 6E). La ergotamina es un vaso constrictor que determina la gangrena de las extremidades -que acaban por desprenderse del cuerpo- que es precedida con semanas de antelación por fiebre elevada -la enfermedad fue referida también como "fuego sagrado" o "fiebre de san Antonio", en razón del éxito con que los pacientes de la enfermedad eran tratados en un hospital vienés dedicado a este santo-. La ergina y la hidroximetilamida del ácido lisérgico son determinantes del ergotismo convulsivo -que se caracteriza por desórdenes neurológicos (ej., alucinaciones, convulsiones, espasmos musculares, temblores, etc.)-, mientras que la ergonovina causa el aborto espontáneo en mujeres y animales domésticos (Schmale y Munkvold, 2014). La documentación histórica indica que las epidemias de ambas formas de ergotismo asolaron a poblaciones en diversos países del Centro y Este de Europa, desde el año 857 en Alemania -la primera epidemia documentada- hasta mediados del siglo XIX en que se refieren epidemias en Alemania, Francia Inglaterra y Rusia; pero durante el siglo XX se han desarrollado epidemias de ergotismo en la Provenza francesa (1951) y Etiopía (1978).

Las micotoxinas de naturaleza alcaloide también son producidas por especies de *Epichloë* endófitas en gramíneas; entre ellas destaca la ergovalina que es causante de la festucosis que afecta al ganado vacuno y en menor medida al equino y ovino, en los que origina pérdida de peso, disminución de la producción de leche y de la eficiencia reproductiva, y en ciertos casos gangrena en las extremidades. Además, estos hongos producen lolitrenos, entre los cuales el lolitreno B es una neurotoxina que produce en el ganado la toxicosis del raigrás, que causa temblores agudos en el cuello y extremidades y disminución de la función neuromuscular, entre otros síntomas (Vázquez de Aldana et al., 2015).

Unas de las micotoxinas más dañinas y de mayor impacto global son las aflatoxinas, a las que se ha estimado que están expuestas repetidamente más de 4.000 millones de personas de países en desarrollo, contribuyendo a más del 40 % de la carga de enfermedad en dichos países. Las aflatoxinas son producidas fundamentalmente por *A. flavus* y *A. parasiticus*, y comprenden cuatro tipos principales: B1, B2, G1, y G2, cuyos efectos crónicos incluyen anemia, cáncer de hígado, ictericia, supresión del sistema inmune y la muerte. La producción de aflatoxinas por dichos hongos varía según los substratos, siendo cacahuete, maíz, y los frutos de almendro y pistacho los principales cultivos alimentarios contaminados

con aflatoxinas. En condiciones favorables, la concentración de aflatoxinas en dichas semillas y frutos puede variar entre 100 y 1.000×10^{-9} , muy superior al umbral de 20×10^{-9} regulado en muchos países. La contaminación con aflatoxinas de substratos empleados como pienso es económicamente importante para la producción ganadera –como la semilla de algodón para ganado vacuno-. En este último caso, la aflatoxina ingerida o un derivado de ella puede pasar a la leche e intoxicar a terneros amantados con la misma.

Los tricotecenos contaminan cereales de gran importancia económica (ej., avena, cebada, maíz, y trigo) y constituyen el grupo más notable de micotoxinas producidas por especies de *Fusarium*. Estas micotoxinas comprenden más de 150 compuestos químicamente relacionados, entre los cuales son de destacar el deoxinivalenol (DON) –también conocido como vomitoxina por el efecto deletéreo sobre el aparato digestivo de animales monogástricos-, y la micotoxina denominada T-2. Los principales hongos productores de DON son miembros del complejo de especies *F. graminearum* (teleomorfo: *G. zeae*) que infectan cebada, maíz y trigo causando una necrosis distintiva en las espigas y mazorcas de sus huéspedes (cf., Foto 3B, Capítulo A2.). En las personas, el consumo de harina o de otros productos derivados de los granos infectados origina dolor de cabeza, fiebre, náuseas y vómitos. El tricoteceno T-2 se produce en las espigas de cereales de grano infectados por diversas *Fusarium* spp., especialmente *F. culmorum* y *F. tricinctum*. La T-2 es estable a la manipulación y conservación de los granos contaminados, y la ingesta de productos que la contienen causa en las personas una enfermedad letal conocida como *aleukia* alimentaria tóxica (ATA, por *alimentary toxic aleukia*); una enfermedad que fue particularmente grave en Rusia en los años 1940, cuyos síntomas incluyen hemorragias subcutáneas y nasales, degeneración de la médula ósea, diarrea, y eventualmente la muerte.

La infección de maíz por especies del complejo de *F. graminearum* también da lugar a la contaminación de granos y forrajes con la zearalenona, una micotoxina que mimetiza el estrógeno, la hormona secretada por los ovarios, principalmente. La importancia económica de las intoxicaciones que han ocurrido por esta micotoxina conciernen principalmente al ganado porcino, pero también afecta a ovino y vacuno, e incluso al aviar cuando es alimentado con piensos contaminados. En las hembras de cerdo, los efectos clínicos más relevantes incluyen hinchamiento del útero, órganos reproductores y glándulas mamarias, infertilidad, y aborto. Además, la zearalenona ingerida con el pienso contaminado puede pasar a la leche e intoxicar a los cerditos amamantados con ella.

Las fumonisinas se caracterizaron por vez primera a final de los años 1980, como resultado de estudios sobre la causa de epidemias de cáncer esofágico en personas de África y de encefalopatía equina (*equine leukoencephalomalacia*) y edema pulmonar porcino en EE. UU. Este grupo de micotoxinas son producidas por especies del complejo *G. fujikuroi*, especialmente *F. proliferatum* y *F. verticillioides* que causan podredumbre de la mazorca del maíz, y pueden contaminar tanto los granos utilizados para consumo humano o para pienso, como los ensilados de uso ganadero, e incluso los productos de maíz procesados. Las fumonisinas comprenden al menos 28 compuestos químicos diferentes, la mayoría de los cuales constituyen series que se designan con las letras A, B, C, y P, de las cuales la fumonisina B1 es la más común y económicamente importante, seguida por las B2 y B3. Además de las referidas enfermedades en equinos y porcinos, las fumonisinas son de gran impacto en la sanidad humana porque la ingesta de productos contaminados origina cáncer de esófago. La encefalopatía equina se caracteriza por la degeneración de la membrana de las células cerebrales, cuyo contenido libre confiere un aspecto acuoso a la masa cerebral, junto con ceguera, inestabilidad y somnolencia de los animales. En los cerdos, el efecto tóxico de las fumonisinas incluye inapetencia y pérdida de peso, daños en el hígado y degeneración de los pulmones, que resultan encharcados.

La ocratoxinas son producidas por varias especies de *Aspergillus* y *Penicillium* en diversos cultivos, siendo la contaminación con ellas de importancia económica en café, cereales grano, higos, frutos secos

y uva. La contaminación de cereales grano es debida fundamentalmente a *P. verrucosum*, mientras que *A. carbonarius* es el principal agente de contaminaciones con ocratoxinas de uva de mesa, uva pasa, e incluso vino. Dicha especie, junto con *A. ochraceus* y *A. niger* son responsables de contaminaciones con ocratoxinas de café tanto cosechado como procesado; mientras que las que se producen en higos y frutos secos son causadas por infestaciones con *A. ochraceus* y *A. melleus*. Las ocratoxinas se denominan con las letras A, B, y C, siendo la ocratoxina A la forma más económicamente importante. Las ocratoxinas ingeridas con alimentos contaminados pueden ser transferidas a través de la carne, leche y sangre de los animales domésticos, en los que perjudica el desarrollo fetal y origina daños en los riñones. En las personas, la ingesta de alimentos contaminados con ocratoxinas se ha relacionado con una enfermedad renal crónica conocida como la nefropatía crónica de los Balcanes, y con cáncer testicular (Schmale y Munkvold, 2014).

A1.4.2. Las plantas como vectores de patógenos humanos

La influencia de la salubridad de los productos cosechados sobre la seguridad alimentaria se ha visto amplificada durante las últimas décadas con el papel de las plantas como vectores de patógenos humanos, que son diseminados hasta los cultivos desde los reservorios animales y humanos existentes en los agroecosistemas (Barak y Schroeder, 2012). Aunque la posibilidad de que productos vegetales de consumo en fresco puedan ser contaminados con patógenos humanos era conocida desde 1996, este fenómeno adquirió gran relevancia en 2006, cuando en octubre de ese año se produjo en EE. UU. una grave epidemia de trastornos abdominales, hemorragias, vómitos y síndrome ureico hemolítico, asociados con el consumo de espinaca contaminada con la estirpe enterohemorrágica de *Escherichia coli* O157:H7. Esta epidemia sanitaria fue seguida por episodios de salmonelosis por la contaminación de albahaca, brotes de semillas germinadas, lechuga, melón, pimiento, tomate, etc. con *Salmonella enterica*, y de gastroenteritis no bacteriana asociada con calicivirus entéricos (Norovirus) contaminantes de productos frescos (Barak e Ivey, 2011, Ivey y Bark, 2011).

Estudios retrospectivos derivados del impacto social ocasionado por las referidas epidemias, concluyeron que durante 1998-2008 se produjeron en EE. UU. 13.352 brotes, que afectaron a 9,6 millones de personas anualmente. De este número de personas afectadas, el 46 % se atribuyeron al consumo de productos vegetales y el 22 % a verduras frescas (Painter et al., 2013; Scallan et al., 2011). Dicho impacto social motivó a la Sociedad Norteamericana de Fitopatología (APS) a promover la investigación sobre las posibles interacciones entre patógenos vegetales y humanos en los productos cosechados, y a establecer un foro específico (*Focus on Food Safety: Human Pathogens on Plants*) en su revista señera, *Phytopathology*, para facilitar el intercambio de los avances alcanzados en aquella. En la presentación de dicho *Focus*, Brandl y Sundin (2013) señalaron que la contaminación de productos vegetales con patógenos humanos constituye uno de los problemas más importantes que afronta la producción hortícola en la actualidad, por la amenaza que representan para la salud pública, la erosión de la confianza del consumidor y el impacto sobre la viabilidad económica de la industria agroalimentaria. Un ejemplo de ello es la crisis que se produjo en 2011 en el sector hortícola español exportador de pepinos producidos en cultivos protegidos en Almería, cuando una alerta sanitaria en Alemania, por un brote de una enfermedad atribuido a la presencia de la bacteria *E. coli* en pepinos importados de dicha provincia, originó la suspensión de las exportaciones españolas y pérdidas millonarias al sector. Estudios diagnósticos y epidemiológicos subsiguientes a la declaración de la alerta concluyeron, no obstante, que la fuente más probable de dicho brote en Alemania eran las semillas de fenogreco o alholva (*Trigonella foenum-graecum*) de producción ecológica importadas de Egipto (tve.es/noticias/20170824/alemania-indemnizara-dos-empresas-espanolas-culparlas-error-del-brote-coli-2011/1602909.shtml), poniendo de manifiesto la importancia y necesidad de precisar la naturaleza del agente contaminante a nivel subespecífico, y de determinar el tipo molecular de la cepa bacteriana al que verdaderamente está asociado el efecto patológico.

A1.5. Disciplinas que sustentan la Sanidad Vegetal

Como se deduce de lo anteriormente expuesto, la Sanidad Vegetal comprende un área compleja de estudio y profesión agroforestal, que tiene como objetivo general evitar o limitar los efectos negativos sobre los cultivos y masas forestales que originan las enfermedades, plagas y malas hierbas, y con ello: (i) asegurar que aquellos rindan según su potencial genético en el marco de las condiciones ecológicas y físicas determinadas por el lugar de producción (cosecha alcanzable); (ii) propiciar el uso eficiente de los insumos necesarios para la producción (ej., agua, suelo, energía, etc.) de forma sostenible y sin perjuicio para el medioambiente; y (iii) asegurar la salubridad del producto cosechado. Tradicionalmente, dicho estudio se ha llevado a cabo de forma fragmentada e independiente por tres disciplinas nucleares: la Patología Agrícola y Forestal, la Entomología Agrícola y Forestal, y la Malherbología, cada una de las cuales se centra en el estudio de uno de los grupos de agentes nocivos (patógenos, artrópodos fitófagos, y malas hierbas) que inciden negativamente sobre los cultivos y masas forestales, y del fenómeno que causan y determina el malfuncionamiento de estos (enfermedades, plagas, y malas hierbas). Sin embargo, es necesario comprender las diferencias entre los tres grupos de agentes nocivos, sus interacciones mutuas, y las relaciones que cada una de ellos establece con el cultivo o la masa forestal, para diseñar y establecer soluciones globales que den respuesta a los retos planteados a la agricultura y silvicultura actuales.

La estrategia del estudio independiente de las tres disciplinas nucleares en el marco de la Sanidad Vegetal puede ser justificada, posiblemente, por la diversidad y naturaleza de los agentes nocivos –ver más adelante–, así como por las diferencias: (i) en la naturaleza del fenómeno biológico que estos incitan; (ii) en los factores que condicionan su abundancia y en ocasiones provocan su proliferación extraordinaria; y (iii) en las estrategias para su control. Así, en el desarrollo de las enfermedades subyacen procesos infecciosos por microorganismos fitopatógenos cuyo perjuicio en la planta trasciende el detrimento derivado del parasitismo, y su control no es “curativo” generalmente, sino que tiene lugar fundamentalmente mediante acciones de prevención de la infección o de la extensión epidémica del patógeno tras su establecimiento en los cultivos. Casos más complejos los constituyen las enfermedades en las que la diseminación del patógeno es mediada por vectores, en las que el control debe comprender la gestión integrada del patógeno y del vector. Por el contrario, en el desarrollo de las plagas subyace el desarrollo de infestaciones por fitófagos cuyo perjuicio en la planta está generalmente vinculado a su capacidad de consumir parte de sus tejidos, y en menor medida, a interferir en su fisiología para obtener beneficios tróficos o en inocular en ella el patógeno, lo que a menudo le representa ventajas; a diferencia de las enfermedades, el control de las plagas se basa en el manejo de la dinámica de las poblaciones de los fitófagos mediante acciones de intervención sobre ellas. Esas diferencias entre fitopatógenos y fitófagos son a veces cuestión de gradientes y existen excepciones a la excesiva generalización. Un análisis sintético para comprender las similitudes y diferencias en la naturaleza y biología de la enfermedad y la fitofagia, así como de las aproximaciones básicas al control de estas, se puede encontrar en Raffa et al. (2020) y se resume más adelante en este mismo capítulo (cf., Apartado A1.5.2.).

Por otra parte, las malas hierbas establecen infestaciones en los cultivos, compitiendo con estos en el uso de los recursos (ej., agua, fertilizantes, radiación solar, suelo, etc.) o sirviendo como reservorios de agentes fitopatógenos y de artrópodos fitófagos o a veces de especies beneficiosas en el propio cultivo o en sus inmediaciones (cf. Capítulo A2., Apartado A2.2.4.). El manejo de malas hierbas trata de limitar el establecimiento y extensión de estas en detrimento de las plantas cultivadas mediante acciones de prevención o de intervención. El estudio y control de las malas hierbas es la razón de ser de una ciencia reconocida como tal más recientemente, la Malherbología.

A1.5.1. Patología Agrícola y Forestal

Esta disciplina nuclear de la Sanidad Vegetal -también denominada Fitopatología- es la ciencia que trata de la naturaleza, causa, control y aspectos socioeconómicos de las enfermedades de las plantas; y como tal: (i) es una ciencia de aplicación comprometida con la producción agrícola y forestal; e (ii) integradora porque se nutre de conocimientos básicos y técnicos propios de otras disciplinas (ej., Biología Molecular, Bioquímica, Botánica, Fisiología Vegetal, Genética, etc., entre las ciencias básicas; Climatología, Ecología, Matemáticas, Química, etc., entre las Ciencias Físicas y del Medio Ambiente; y Ecofisiología de Cultivos, Edafología, Entomología Agrícola y Forestal, Horticultura y Fruticultura, Ingeniería Rural, Mejora Genética, etc., entre las Ciencias Agrarias; e incluso Economía Agraria, Sociología Agraria, etc. entre las Ciencias Sociales). La enfermedad en plantas, el núcleo central de la ciencia fitopatológica, es generalmente definida como "una desviación del funcionamiento fisiológico o estructura normales de una planta, que represente perjuicio para ella" pero, conceptualmente, la más acertada es la propuesta por Whetzel en 1929 -"la enfermedad en plantas consiste en una serie de procesos fisiológicos perjudiciales, originados por la interacción continua en ella de un agente causal primario, que se manifiesta en sus tejidos y órganos por respuestas patológicas características llamadas síntomas"- porque establece un campo de estudio en el que se pueden diseñar estrategias de investigación para comprender la naturaleza del fenómeno y desarrollar medios y métodos para su control.

La Patología Agrícola y Forestal es una disciplina compleja en razón del enorme número de especies de plantas cultivadas y forestales, y de la de la naturaleza del agente causal primario, -que incluye a microorganismos procariontes (bacterias, espiroplasmas, y fitoplasmas), microorganismos eucariontes (hongos, oomicetos, protozoos, y nematodos), entidades moleculares (virus y viroides), y plantas superiores parásitas- y porque la enfermedad de los cultivos es un fenómeno de poblaciones en cuyo desarrollo subyace la influencia: (i) de las comunidades de microorganismos que conviven con el patógeno en la planta susceptible, en huéspedes alternativos, o en el suelo; (ii) de diversos artrópodos fitófagos como vectores de ciertos patógenos; (iii) de las malas hierbas como huéspedes reservorios en los que aquellos sobreviven y se diversifican; y (iv) del medio ambiente y de las tecnologías agrícolas. La profesión de la Patología Agrícola y Forestal para la Sanidad Vegetal requiere pues que, a través de la docencia y la formación, se posean conocimientos sobre: (i) los agentes causales, incluyendo sus características biológicas, morfológicas y taxonómicas; los protocolos y métodos para su identificación y diagnóstico; y su ecología y ciclo vital; (ii) la epidemiología de las enfermedades y los sistemas que permiten su predicción; (iii) los métodos y medios de lucha para el control de las enfermedades, junto con los dispositivos para su aplicación y las estrategias con que pueden ser combinados para la gestión integrada de aquellas; (iv) la legislación de aplicación en Sanidad Vegetal; y (v) las características y gestión integrada de las enfermedades más importantes en cultivos estratégicos y masas forestales clave (ej., cultivos herbáceos extensivos, hortícolas protegidas y de aire libre, frutales, olivo y vid, etc., y masas forestales de coníferas y de frondosas).

A1.5.2. Entomología Agrícola y Forestal

Esta disciplina nuclear de la Sanidad Vegetal es la ciencia que trata de la naturaleza, causa, control y aspectos socioeconómicos de las plagas de las plantas agrícolas y forestales; y como tal es una ciencia de aplicación comprometida con la producción agrícola y forestal. Los agentes incluidos en esta disciplina son fundamentalmente artrópodos insectos (de ahí el nombre de Entomología dado a la disciplina) y, en mucha menor medida, los ácaros, aunque también otros artrópodos fitófagos, gasterópodos, aves y mamíferos. La consecuencia de la fitofagia de los mencionados grupos de animales es básicamente el daño que puede provocar pérdidas de rendimiento o valor en el cultivo o masa forestal. Buena parte de lo indicado para la Patología Agrícola y Forestal en el apartado anterior acerca de las disciplinas relaciona-

das, los factores que influyen en su incidencia y los conocimientos básicos requeridos para la práctica de la disciplina puede aplicarse a esta. Sin embargo, y de acuerdo con Raffa et al. (2020), algunas diferencias entre los fitopatógenos y los fitófagos han dado a ambas disciplinas unas bases de partida distintas. Para estos últimos autores, las diferencias de biología, ecología y evolución han propiciado **cuatro diferencias fundamentales en las relaciones de los fitófagos y fitopatógenos con las plantas**, si bien hay que reconocer, como se dijo antes, que hay **excepciones en esas diferencias, en particular en enfermedades cuyos vectores son insectos**. Esas cuatro diferencias son las siguientes:

1. **La capacidad de los herbívoros para ligar su comportamiento con el movimiento orientado para la selección del huésped.** Los insectos, y en mucha menor medida los ácaros, pueden moverse a largas distancias y ese desplazamiento es gobernado por la visión y el quimiotropismo para seleccionar las plantas preferidas, y una vez alcanzadas estas pueden moverse dentro y entre ellas andando con sus patas. Los fitopatógenos, en comparación, son desplazados a escalas menores en los ecosistemas y dependen más de factores abióticos externos como el viento o la lluvia –salvo en el caso de la diseminación por el vector–. En estos últimos, aunque sus propágulos poseen una capacidad quimiorreceptora, esta opera a distancias mucho menores que en los insectos. En definitiva, **los insectos tienen una capacidad más refinada de selección de sus plantas huésped.**
2. **La menor habilidad de los fitófagos para eludir la detección del ataque por la planta.** Las plantas poseen unos mecanismos altamente sofisticados para detectar la presencia y actividad de sus fitófagos. Frente a esos mecanismos, muchos patógenos pueden usar variados procedimientos para evitarlos o silenciarlos, de manera que **el éxito del ataque depende de la velocidad relativa con que la planta y el patógeno ponen en marcha esos procesos.** Los insectos masticadores tienen menos oportunidades para ocultar su ataque a la planta, ya que su acción es el “grosero” consumo de los tejidos de aquella y, además, el insecto precisa de la ayuda de microorganismos simbioses que pueden ser utilizados por la planta huésped para la pronta detección del ataque. En contraste con los masticadores, se ha demostrado que los insectos chupadores homópteros segregan en la saliva efectores que contrarrestan las defensas de las plantas, de forma similar, y con acción similar a los efectores de hongos y bacterias. En general, **las adaptaciones co-evolutivas entre plantas y patógenos más comunes toman la forma de una mayor capacidad de detección en las plantas** frente a un sigilo y subterfugios microbianos cada vez más complejos, mientras que la co-evolución planta-fitófago a menudo toma la forma de nuevas toxinas vegetales frente a las correspondientes vías de detoxificación.
3. **Tolerancia de las plantas frente a patógenos y fitófagos.** Por más que la fitofagia a veces tiene consecuencias dramáticas para las plantas, **sólo raramente inciden en su capacidad adaptativa (*fitness*).** El consumo de tejidos, aunque irreversible, tiene que ser muy acusado para que la planta muera o incluso para que se produzcan efectos subletales. Por el contrario, los fitopatógenos causan enfermedad en la planta, que es una causa continua de perjuicio para las células y tejidos, y por tanto los patógenos afectan en mayor medida a la capacidad adaptativa de la planta.
4. **Grado de regulación de arriba a abajo (*top-down*) de las densidades de población.** En la mayor parte de fitófagos, su densidad de población es regulada por la acción de sus depredadores, parasitoides y entomopatógenos (denominados enemigos naturales en conjunto), cuya actividad y eficiencia puede depender o no de la planta huésped del fitófago. En cambio, se conocen muchos menos casos en que las poblaciones de los patógenos se regulan en gran medida por la acción de sus enemigos naturales o antagonistas, aunque son bien conocidos en algunos casos, como el micoparásito *Trichoderma* spp. Por otra parte, si bien algunos de esos micoparásitos operan mediante mecanismos sofisticados de orientación hacia el huésped, lo hacen a escalas espaciales reducidas. Una posible consecuencia de la **mayor intervención de los enemigos naturales en la regulación de las poblacio-**

nes de fitófagos en comparación con los fitopatógenos, es que en el primer caso la presión selectiva de las plantas sobre los primeros es más difusa que en el caso de los segundos.

A la influencia de las diferencias en la relación con la planta huésped mencionadas arriba, se añaden las de otras diferencias en la biología de los fitófagos y fitopatógenos y otros factores ambientales. Por ejemplo, los microorganismos fitopatógenos son más rápidos en desarrollarse y el número de descendientes en sus generaciones es más elevado en comparación con los fitófagos y por tanto, en principio, pueden tener procesos de adaptación más rápidos. Por otra parte, los fitopatógenos pueden experimentar cambios genéticos y epigenéticos sobre una misma planta, lo que les confiere la oportunidad de superar los mecanismos de defensa de aquella, mientras que los insectos fitófagos se desplazan entre plantas. Otra diferencia entre ambos tipos de organismos nocivos proviene de los sistemas de reproducción; mientras que los fitófagos suelen necesitar desplazarse para encontrar el otro sexo para aparearse y reproducirse, los fitopatógenos tienen variados mecanismos de reproducción y además forman estructuras especializadas que les permiten permanecer viables durante largos periodos de tiempo (incluso años). Por último, mencionemos que los artrópodos fitófagos se asocian a menudo con simbiosis que les facilitan varias funciones vitales, tales como la superación de la defensa de la planta huésped, la adquisición de determinados nutrientes, la protección frente a enemigos naturales, y la percepción y señalización por feromonas. Aunque los fitopatógenos también pueden albergar simbiosis, su variedad es mucho menor y con un número muy inferior de funciones, de manera que la relación de aquellos con la planta es de naturaleza más bipartita.

Finalmente, Raffa et al. (2020) hacen ver que mientras las mencionadas diferencias entre los organismos nocivos de los cultivos agrícolas y masas forestales no han estimulado históricamente la colaboración de patólogos y entomólogos, el acercamiento en la investigación y la praxis en Sanidad Vegetal puede enriquecer el conocimiento científico de ambos, al contrastar las estrategias de fitopatógenos y fitófagos para explotar ese recurso común que es el vegetal cultivado o la especie forestal. En el campo del uso de la resistencia de la planta huésped como método de control de enfermedades y plagas, ya se han dado algunos ejemplos de avances en el conocimiento de la relación planta-fitófago basados en el conocimiento previo de la relación de esa planta con un fitopatógeno. Además, también conviene resaltar que, en la praxis, fitófagos y patógenos coexisten con frecuencia en un cultivo –y en una planta– de manera que para optimizar la gestión de la sanidad del mismo es necesario armonizar las estrategias y métodos de control específicos de cada uno de ellos.

A1.5.3. Malherbología

Esta otra disciplina nuclear de la Sanidad Vegetal se ocupa de las malas hierbas. En su sentido más amplio, entenderemos las malas hierbas como cualquier planta que tiene un impacto negativo sobre los valores sociales y económicos y sobre el medioambiente, debilita la seguridad alimentaria global, la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y también la salud humana (Neve et al., 2018). Tal como hemos señalado más arriba en este capítulo, sin medidas de protección adecuadas, las malas hierbas son los organismos que más pérdidas de cosecha pueden causar y las pérdidas potenciales a nivel global se han estimado en un 34% de la producción (Oerke 2006). Dado el contenido de esta obra, estamos centrando las consecuencias negativas de las malas hierbas en los ecosistemas agrícolas y forestales, pero no deberíamos olvidar su incidencia en ecosistemas naturales y en el bienestar general de la humanidad, al igual que hemos comentado para los otros agentes nocivos propios de la Sanidad Vegetal.

La mala hierba es una especie vegetal que se encuentra en lugares, cantidades y momentos indeseados. Esta definición tiene la ventaja de subrayar que el carácter de mala hierba es circunstancial y no

siempre asociado a la especie vegetal en sí misma, tal como también lo habíamos indicado para otros agentes nocivos de la Sanidad Vegetal. Así, la mala hierba **compite con el cultivo por los recursos compartidos por ambos o constituye un refugio para fitófagos o fitopatógenos del cultivo** en épocas sin especies cultivadas huésped, pero su papel en los campos de cultivo, en sus alrededores o en el paisaje agrícola puede ser incluso beneficioso para el cultivo. La consideración de un marco amplio a la hora de tomar decisiones sobre las malas hierbas tiene la ventaja de contemplar los servicios ecosistémicos de las especies de plantas distintas a la cultivada en el ecosistema agrícola y forestal, además del negativo ya señalado. Así, podemos recordar **la aportación de especies vegetales no cultivadas en los campos como refugio para enemigos naturales y polinizadores, o como protectoras del suelo frente a la erosión y conservación de su estructura o suministradores de otros servicios en el caso de las cubiertas vegetales**; al igual que lo habíamos indicado cuando tratamos otros tipos de agentes nocivos, la diversificación de los agroecosistemas con especies vegetales distintas a la cultivada constituye una parte importante de la investigación dentro de la Malherbología.

No es extraño, por lo tanto, que a la hora de discutir las prioridades que debería tener la investigación en Malherbología en el futuro inmediato, los autores antes citados (Neve et al., 2018) pongan la multidisciplinaridad en un lugar preferente y de nuevo se alude a la Agroecología como un marco apto para esa multidisciplinaridad, al igual que lo hemos dicho de manera matizada para las otras disciplinas nucleares de la Sanidad Vegetal. No podemos olvidar la gran cantidad de fitófagos y fitopatógenos de cultivos que encuentran en las especies vegetales dentro de los campos o en sus márgenes un lugar de refugio para cuando las especies cultivadas no están en los campos o son protegidas con variados métodos de control. En ese papel podemos incluir la flora de barbechos que permanecen en los paisajes agrícolas durante varios meses.

Esta amplitud de papeles de la flora arvense en relación con los ecosistemas agro-forestales debería **apoyar todavía más la necesidad de una aproximación multidisciplinar a su estudio**. Sin embargo, otros hechos no han colaborado en esa aproximación y probablemente la fuerte dependencia del control de malas hierbas del uso de herbicidas ha sido una de las causas principales. La búsqueda de distintos mecanismos de acción de los herbicidas ha propiciado la preferencia por los estudios fisiológicos de las malas hierbas frente a su ecología en los paisajes agro-forestales. Al mismo tiempo, esa dependencia de los herbicidas ha ocasionado que muchas poblaciones de malas hierbas hayan desarrollado resistencia a los herbicidas, habiéndose descrito hasta la fecha a nivel mundial, más de 500 casos únicos de resistencia en 267 especies (Heap, 2022), y demostrado en consecuencia la alta capacidad evolutiva de esos agentes de modo que les ha situado como especies modelo para el estudio general de la adaptabilidad vegetal. Probablemente, el estudio de esa capacidad evolutiva y de sus consecuencias nos ayudarán a planear métodos más durables de manejo de malas hierbas.

En el campo de los métodos de manejo de malas hierbas para reducir su incidencia negativa en el rendimiento y calidad de las cosechas, hay que hacer notar las diferencias de los caminos seguidos por la Malherbología, como así también lo anotamos para la Fitopatología y la Entomología Agrícola y Forestal. Las interacciones bióticas en las que las malas hierbas participan en los agroecosistemas han dado lugar a varias técnicas de manejo de las mismas, que se pueden clasificar en: **control químico (herbicidas), mecánico (labores) y cultural (ej. rotaciones de cultivos o fechas de siembra)**. Sin embargo, las herramientas químicas han eclipsado a las demás en el último siglo y, todavía hoy, hay enormes lagunas en el conocimiento de los mecanismos de competencia entre la planta cultivada y la mala hierba. La alta eficacia del control químico de malas hierbas también ha propiciado que la mejora genética de cultivos haya priorizado aspectos productivos o parámetros de calidad, a costa de caracteres relacionados con la capacidad competitiva, por lo que han sido muy escasas las aportaciones de la resistencia vegetal en la

planta cultivada a la acción de la mala hierba. Asimismo, ya indicamos en el capítulo correspondiente (cf., Capítulo C4., Apartado C4.4.) el escaso desarrollo del control biológico de malas hierbas mediante artrópodos fitófagos o fitopatógenos, probablemente debido a los riesgos de esa técnica para la planta cultivada. En cambio, se ha desarrollado notablemente la tecnología de la maquinaria con visión y de los sistemas de posicionamiento global, avances ambos que permiten con precisión notable la distinción entre la planta cultivada y la mala hierba (cf. Capítulo C2). De esta manera se está logrando mejorar la eficacia de la escarda con métodos químicos o mecánicos y disminuir sus aspectos negativos (Westwood et al., 2018).

A1.5.4. Hacia una concepción holística de la Sanidad Vegetal: una Medicina de los Vegetales

Es oportuno resaltar que mientras los agentes nocivos y sus efectos negativos sobre la producción vegetal y forestal ocurren de forma conjunta sobre cultivos y masas forestales, el conocimiento y estudio de dichos agentes y efectos están segregados en tres disciplinas científicas independientes y disjuntas, separación que se manifiesta incluso en las formas con que sus estudiosos se agregan constituyendo sociedades científicas para compartir los avances en su conocimientos sobre ellas –en España la Sociedad Española de Entomología Aplicada (SEEA), la Sociedad Española de Fitopatología (SEF) y la Sociedad Española de Malherbología (SEMh)-. Posiblemente, dicha separación contribuye a la deficiente percepción global de la Sanidad Vegetal -que ha tratado de contrarrestar la declaración de 2020 como Año Internacional por la ONU (cf., Apartado A1.1.2.)- por una sociedad habituada a que los problemas de la salud en personas y animales sean estudiados y controlados por profesionales de una sola disciplina científica, la Medicina Humana y la Medicina Veterinaria, respectivamente.

Esta falta de unicidad en el abordaje científico-técnico y profesional de los fenómenos parasitarios que reducen la cantidad y calidad de las cosechas agrícolas, y amenazan la estabilidad de las masas forestales, ha sido objeto de reflexión por diversos expertos de la docencia e investigación fitosanitaria a nivel internacional desde hace décadas. Pioneros en dicha tesitura fueron destacados fitopatólogos como Tammen y Wood (1977) y Merrill (1979) que, preocupados por el alejamiento que se venía produciendo entre los avances de la investigación fitopatológica y la aplicación práctica de sus resultados, indicaron la necesidad de una actividad profesional en materia de Sanidad Vegetal comparable a la profesión veterinaria en la Sanidad Animal, a fin de asegurar que los nuevos conocimientos y tecnologías proporcionados por la investigación fitopatológica alcanzaran aplicación práctica en el control de las enfermedades. Estas inquietudes cristalizaron con la labor pionera del Prof. George Agrios, que introdujo el término Medicina de los Vegetales (*Plant Medicine*) y fundó el primer programa de postgrado en Medicina de los Vegetales en la Universidad de Florida (EE. UU.) en 1993. Pocos años después, Browning (1998) reclamó una visión holística de este concepto para incluir al conjunto de agentes nocivos que inciden sobre la Sanidad Vegetal, así como la extensión del programa de Agrios de forma generalizada en las universidades norteamericanas, a fin de consolidar una formación multidisciplinar de postgrado en Medicina de los Vegetales, cuyos titulados "...sirvan a los cultivos de plantas como los doctores en Medicina Veterinaria sirven a los animales domésticos" (Browning, 1998).

En línea con la propuesta de Browning, Tjamos (2010; 2016) considera que la necesidad de un concepto holístico para la protección eficiente de las cosechas y masas forestales de los efectos negativos de todos los agentes nocivos, sería resuelta de manera más adecuada mediante una titulación universitaria de grado basada en una ciencia multidisciplinar que denomina *Phytriaty* ("Fitiatría", palabra griega traducible como Medicina de los Vegetales) o "Fitomedicina" (*Phytomedicin*). Según dicho autor (2016), esta titulación debe tener una estructura nuclear que integre el conocimiento sobre todos los aspectos básicos y aplicados concernientes a los agentes nocivos que causan detrimento del crecimiento y

producción de cultivos y masas forestales, así como sobre el desarrollo de los fenómenos que ocasionan dicho detrimento, su diagnóstico, factores que lo determinan, y los métodos, medios y estrategias para su control. Dicha estructura nuclear estaría complementada con el estudio de disciplinas agronómicas básicas que permitieran a los profesionales titulados en Medicina de los Vegetales afrontar la problemática fitosanitaria en los cultivos, y realizar recomendaciones para su control en condiciones de campo con mayor eficiencia que la que proporciona la formación generalista y limitada de que constan las actuales titulaciones, que tienen como disciplinas nucleares las que conciernen la producción agrícola o forestal y conocimientos muy limitados sobre las tres disciplinas nucleares de la Sanidad Vegetal: Patología Agrícola y Forestal, Entomología Agrícola y Forestal, y Malherbología (Tjamos, 2016). Aproximar al lector de este libro al concepto de Medicina de los Vegetales ha sido uno de los objetivos de los que hemos escrito y colaborado para elaborar el texto que Vd., querido lector, está leyendo.

A1.6. Bibliografía

- AEMET. 2020. <https://aemetblog.es/2020/05/18/influencia-de-las-variables-meteorologicas-en-el-desarrollo-y-migracion-de-la-langosta-del-desierto/> (consultado 9.2.2022).
- Ainsworth, G.C. 1981. Introduction to the History of Plant Pathology. Cambridge Univ. Press. Londres.
- Anagnostakis, S.L. 1988. *Cryphonectria parasitica*, cause of chestnut blight. Adv. Plant Pathol. 6: 123-136.
- Bailey-Serres, J., Parker, J.E., Ainsworth, E.A., Oldroyd, G.E.D., y Schroeder, J.I. 2019. Genetic strategies for improving crop yields. Nature 575: 109-118.
- Barak, J., e lvey, M.L. 2011. Research funded by USDA-NIFA in the area of human pathogen-plant interactions. Phytopathol. News 45(March): 40-41.
- Barak, J.D., y Schroeder, B.K. 2012. Interrelationships of food safety and plant pathology: The life cycle of human pathogens on plants. Annu. Rev. Phytopathol. 50: 241-66.
- Bové, J.M. 2014. Huanglongbing or yellow shoot, a disease of Gondwanan origin: Will it destroy citrus worldwide? Phytoparasitica 42: 579-583. doi. 10.1007/s12600-014-0415-4.
- Brandl, M.T., y Sundin, G.W. 2013. Focus on food safety: human pathogens on plants. Phytopathology 103: 304-305.
- Bremmer, J., Riemens, M., y Reinders, M. 2021. The future of crop protection in Europe. Scientific Foresight Unit (STOA). European Parliamentary Research Service.
- Browning, J.A. 1998. One phytopathologist's growth through IPM to holistic plant health. Annu. Rev. Phytopathol. 36: 1-24.
- Caldeira, C., De Laurentiis, V., y Sala, S., 2019. Assessment of food waste prevention actions: development of an evaluation framework to assess the performance of food waste prevention actions, EUR 29901 EN; Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; 2019, ISBN 978-92-76-12388-0, doi:10.2760/9773, JRC118276.
- Capua, I. 2020. Circular Health: Empowering the One Health Revolution. Bocconi University Press. Milano. 106 pp.
- Cambra, M., Gorris, M.T., Marroquín, C., Román, M.P., Olmos, A., Martínez, M.C., Hermoso de Mendoza, A., López, A., y Navarro, L. 2000. Incidence and epidemiology of Citrus tristeza virus in the Valencian Community of Spain. Virus Res. 71: 85-95.
- Cardwell, K.F., Desjardins, A., Henry, S.H., Munkvold, G., y Robens, S. 2001. Mycotoxins: the cost of achieving food security and food quality. APSnet Feature Story. APS Press. St. Paul. MN.
- CAST (Council for Agricultural Science and Technology). 2003. Mycotoxins: Risks in Plant, Animal, and Human Systems. Task force report, no. 139. Council for Agricultural Science and Technology. Ames, Iowa. USA.
- Cheatham, M.R., Rouse, M.N., Esker, P.D., Ignacio, S., Pradel, W., Raymundo, R., Sparks, A.H., Forbes, G.A., Gordon, T.R., y Garrett, K. A. 2009. Beyond yield: Plant disease in the context of ecosystem services. Phytopathology 99: 1228-1236.
- Coker, T., Rozsypálek, J., Edwards, A., Harwood, T. P., Butfoy, L., y Buggs, R.J.A. 2019. Estimating mortality rates of European ash (*Fraxinus excelsior*) under the ash dieback (*Hymenoscyphus fraxineus*) epidemic. Plants, People, Planet 1: 48-58. <https://doi.org/10.1002/ppp3.11>.
- Cramer, H.H. 1967. Defensa Vegetal y Cosecha Mundial. Pflanzenschutz-Nachrichten Bayer 20: 1-555.
- EPP0. 2022. '*Candidatus Liberibacter asiaticus*'. EPP0 datasheets on pests recommended for regulation. Disponible online. <https://gd.eppo.int>.
- FAO. 2020a. Langosta del desierto. <http://www.fao.org/3/i6152en/i6152en.pdf> (consultado 9.2.2022)
- FAO. 2020b. El recrudecimiento de la plaga de langosta del desierto sigue poniendo en jaque la seguridad alimentaria del Cuerno de África y el Yemen, pese a los intensos esfuer-

- zos. <https://www.fao.org/home/es/2020>, Roma. (consultado 9.2.2022).
- Fargette, D., Konaté, G., Fauquet, C. Muller, E., Peterschmitt, M., y Thresh, J.M. 2006. Molecular ecology and emergence of tropical plant viruses. *Annu. Rev. Phytopathol.* 44: 235-60.
- Freer-Smith, P., y Webber, J.F. 2017. Tree pests and diseases: the threat to biodiversity and the delivery of ecosystem services. *Biodivers. Conserv.* 26: 3167-3181. <https://doi.org/10.1007/s10531-015-1019-0>.
- Grünwald, N.J., Garbelotto, M., Goss, E.M., Heungens, K., y Prospero, S. 2012. Emergence of the sudden oak death pathogen *Phytophthora ramorum*. *Trends Microbiol.* 20: 131-138.
- Heap, I. 2022. The International Herbicide-Resistant Weed Database. Online. Thursday, June 30, 2022. Available in www.weedscience.org
- Hill, L., Jones, G., Atkinson, N., Hector, A., Hemery, G., y Brown, N. 2019. The £15 billion cost of ash dieback in Britain. *Current Biol.* 29: R315-R316. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.03.033>.
- Ivey, M.L., y Bark, J. 2011. The public policy board is actively engaged in food safety. *Phytopathol. News* 45 (January): 9.
- Jiménez Díaz, R.M. 2009. La protección del rendimiento: Programas IPM para armonizar el control de enfermedades y los compromisos de sostenibilidad agrícola. Págs. 163-182, en: Jaime Lamo de Espinosa, ed. El Nuevo Sistema Agroalimentario Global. Mediterráneo Económico 15. Fundación CAJAMAR. El Ejido (Almería).
- Jiménez-Díaz, R.M. 2019. La verticilosis del olivo: algunas enseñanzas de las que aprender tras 40 años de historia. *Agricultura.* 1027. Abril: 58-64.
- Jiménez-Díaz, R.M., Cirulli, M., Bubici, G., Jiménez-Gasco, M.M., Antoniou, P.P., y Tjamos, E.C., 2012. Verticillium wilt, a major threat to olive production: Current status and future prospects for its management. *Plant Dis.* 96: 304-329.
- Jiménez Díaz, R.M., Castillo Castillo, P., García-Arenal, F., García Marí, F. Montesinos Seguí, E., y Recasens Guinjuan, J. 2019. Enfermedades, plagas y malas hierbas que constituyen problemas de carácter estratégico en sectores productivos y masas forestales claves para la economía española. Págs. 317-386, en: R. M. Jiménez Díaz y M.M. López González, eds. Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España. UCOPress. Editorial Universidad de Córdoba. Córdoba.
- Lamo de Espinosa, J. 2009. Presentación y reflexiones en una coyuntura singular. Págs. 13-20, en: J. Lamo de Espinosa, ed. El Nuevo Sistema Alimentario en una Crisis Global. Mediterráneo Económico 15. Cajamar. El Ejido (Almería).
- Lamo de Espinosa, J. 2012. La Sanidad Vegetal: Una cuestión crítica para el progreso de la agricultura española y mundial. Conferencia Inaugural. Encuentro de los Profesionales en Sanidad Vegetal: Necesidades de Formación Especializada en Sanidad Vegetal. Análisis y Debate. Valencia 12-13 de marzo de 2012.
- Levin, A.G., Lavee, S., y Tsror (Lahkim), L. 2003. Epidemiology of *Verticillium dahliae* on olive (cv. Picual) and its effect on yield under saline conditions. *Plant Pathol.* 52: 212-218.
- López, M.M., Murillo, J., Montesinos, E., y Palacio-Bielsa, A. (Eds.). 2018. Enfermedades de Plantas Causadas por Bacterias. Sociedad Española de Fitopatología y Bubok Publishing S.L. Madrid. 789 pp.
- Malmstrom, C.M., Hughes, C.C., Newton, L.A., y Stoner, C.J. 2005. Virus infection in remnant native bunchgrasses from invaded California grasslands *New Phytol.* 168: 217-230.
- Merrill, W. 1979. The doctor of plant medicine. Págs. 385-387, en: 9th Int. Congr. Plant Prot. Proc. Symp. I Plant Prot. Fundam. Asp.
- Neve, P., Barney, J.N., Buckley, Y., Cousens, R.D., y otros 25 autores. 2018. Reviewing research priorities in weed ecology, evolution and management: a horizon scan. *Weed Res.* 58: 250-258.
- Oerke, E.C., Dehne, H.W., Schönbeck, F., y Weber, A. 1994. *Crop Production and Crop Protection*. Elsevier. Amsterdam.
- Oerke, E.C., y Dehne, H.W. 2004. Safeguarding production losses in major crops and the role of crop protection. *Crop Prot.* 23: 275-285.
- Oerke, E.C., 2006. Crop losses to pests. *J. Agric. Sci.* 144: 31-43.
- ONU. 2019. World Population Prospects 2019: Highlights. ST/ESA/SER.A/423. United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division. population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf.
- Painter, J.A., Hoekstra, R.M., Ayers, T., Tauxe, R.V., Braden, C.R., Angulo, F.J., y Griffin, P.M. 2013. Attribution of food-borne illnesses, hospitalizations, and deaths to food commodities by using outbreak data, United States, 1998-2008. *Emerg. Infec. Dis.* 19: 407-415.
- Pinstrup-Andersen, P. 2001. The future world food situation and the role of plant diseases. *The Plant Health Instructor*. DOI: 10.1094/PHI-I-2001-0425-01.
- Ploetz, R.C. (Ed.). 1990. *Fusarium Wilt of Banana*. APS Press. St. Paul. MN.
- Quesada-Moraga, E., y C. Santiago-Álvarez. 2000. Temperature related effects on embryonic development of the Mediterranean locust, *Dociostaurus maroccanus*. *Physiol. Entomol.* 25: 191-195.
- Rabbinge, R. 1993. The ecological background of food production. Págs. 2-29, en: Ciba Foundation, ed. *Crop Protection and Sustainable Agriculture*. Ciba Symposium 177. Wiley. Chichester.
- Raffa, K.F., Bonnelle, P., y Orrock, J.L. 2020. Why do entomologists and plant pathologists approach trophic relationships so differently? Identifying biological distinctions to foster synthesis. *New Phytol.* 225: 609-620.
- Rao, G., y Reddy, M. 2020. Overview of yield losses due to plant viruses. Págs. 531-562, en: L. Awasthi, ed. *Applied Plant Virology*. AP editorial. En 10.1016/B978-0-12-818654-1.00038-4.
- Ray, D.K., Mueller, N.D., West, P.C., y Foley, J.A. 2013. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PLoS ONE* 8, e66428.

- Ruiz de la Hermosa, T., Recio, C., y Osca, J.M. 2022. Detección de zonas propicias para la puesta y eclosión de la langosta mediterránea (*Dociostaurus maroccanus*) a partir de imágenes Sentinel-2. *Phytoma* 335: 50-55.
- Santiago-Álvarez, C., Quesada-Moraga, E., y Hernández-Crespo, P. 2003. Diapause termination and postdiapause development on the Mediterranean locust *Dociostaurus maroccanus* under field conditions. *J. Appl. Entomol.* 127: 369-373.
- Santini, A., Liebhold, A., Migliorini, D., y Woodward, S. 2018. Tracing the role of human civilization in the globalization of plant pathogens. *The ISME J.* 12: 647-652. <https://doi.org/10.1038/s41396-017-0013-9>.
- Sastry, K.S., y Zitter, T.A. 2014. Management of virus and viroid diseases of crops in the tropics. En: *Plant Virus and Viroid Diseases in the Tropics*. Springer. Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7820-7_2.
- Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S.J., Esker, P., McRoberts, N., y Nelson, A. 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecol. & Evol.* 3: 430-439. www.nature.com/natecolevol.
- Scallan, E., Hoekstra, R.M., Angulo, F.J., Tauxe, R.V., Widdowson, M.A., Roy, S.L., Jones, J.L., y Griffin, P.M. 2011. Foodborne illness acquired in the United States—major pathogens. *Emerg. Infect. Dis.* 17: 7-15.
- Schmale, D.G., y Munkvold, G.P. 2014. Mycotoxins in crops: a threat to human and domestic animal health. *The Plant Health Instructor*. APS Press. St. Paul. MN.
- Sumpsi, J.M. 2009. La crisis alimentaria global. Págs. 29-45, en: J. Lamo de Espinosa, ed. *El Nuevo Sistema Alimentario en una Crisis Global*. Mediterráneo Económico 15. Cajamar. El Ejido (Almería).
- Tammen, J.F., y Wood, F.A. 1977. Education for the practitioner. Págs. 393-410, en: J.G. Horsfall y E.B. Cowlin, eds. *Plant Disease: An Advanced Treatise*. Vol. I. How Disease is Managed. Academic Press. Nueva York.
- Tjamos, E.C. 2010. Establishing a new science in universities. *Phytopathol. News* 64 (May).
- Tjamos, E.C. 2016. The introduction of Phytiatry (Plant medicine) in universities as a distinct science, is a primary necessity for food security and modernization of global agriculture. Págs. 305-321, en: P. Chowdappa, P. Sharma, D. Singh, y A.K. Misra, eds. *Perspectives of Plant Pathology in the Genomic Era*. Today & Tomorrow's Printers and Publishers. Nueva Delhi.
- Torra, J., Royo-Esnal, A., Romano, Y., Osuna, M.D., León, R.G., y Recasens, J. 2020. *Amaranthus palmeri* a new invasive weed in Spain with herbicide resistant biotypes. *Agronomy* 10 (7): 993. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070993>.
- Vázquez de Aldana, B.R., Soto-Barajas, M.C., y Zabalgoitia, I. 2015. Hongos endófitos *Epichloë* en pastos de la Península Ibérica. *Pastos* 45: 6-18.
- von Braun, J., Afsana, K., Fresco, L.O., y Hassan, M. 2021. Food systems: seven priorities to end hunger and protect the planet. *Nature* 597: 28-30.
- Westwood, J.H., Charudattan, R., Duke, S.O., Fennimore, S.A., Marrone P., Slaughter, D.C., Swanton C., y Zollinger, R. 2018. Weed management in 2050: Perspectives on the future of Weed Science. *Weed Sci.* 66: 275-285. doi:10.1017/wsc.2017.78

A. Agricultura y Sanidad Vegetal

A2. Capítulo A2. Retos de la Sanidad Vegetal a nivel global y en España

A2.1. Persistencia de la magnitud de las pérdidas globales de cosecha ocasionadas por enfermedades, plagas, y malas hierbas

Las sucesivas estimaciones realizadas en los estudios científicos que se incluyen en el Apartado A1.3.2. del Capítulo A1. indican que las pérdidas globales de cosecha ocasionadas por enfermedades, plagas y malas hierbas se han mantenido estancadas en torno a un tercio de la cosecha alcanzable durante los últimos 50 años, a pesar de los avances en el conocimiento y las nuevas tecnologías para el control de aquellas que se han producido en dicho periodo de tiempo y de la aplicación de las medidas necesarias para ello. Este hecho paradigmático ha generado honda preocupación en el ámbito internacional de la Sanidad Vegetal, y los estudios y debates que se han suscitado para comprender su naturaleza han concluido que a la persistencia de dichas pérdidas globales han debido contribuir de forma determinante la reemergencia (resurgencia) y emergencia de nuevas enfermedades, plagas y malas hierbas (Anderson et al., 2004; Fisher et al., 2012; Giraud et al., 2010; McDonald y Stukenbrock, 2016; Subbarao et al., 2015).

A2.1.1. La reemergencia de enfermedades, plagas, y malas hierbas: un indicador de la interacción entre las innovaciones tecnológicas en la agroindustria y silvicultura actuales, y la Sanidad Vegetal

Como problemas fitosanitarios reemergentes se definen aquellos que se habían venido controlando eficientemente y por ello habían dejado de tener repercusión importante sobre las cosechas, pero en los que la incidencia de nuevos factores recientes ha determinado que resurjan, desarrollando epidemias de enfermedades y aumentos de poblaciones de artrópodos fitófagos devastadores y malas hierbas de impacto económico y social. Entre tales factores son de destacar: (i) las innovaciones en las tecnologías agrícolas motores de la mejora de productividad en la agricultura moderna -sin menosprecio de la influencia de las variaciones medioambientales-, que si bien dan lugar a avances sin precedentes en los rendimientos, también tienen el potencial de incrementar la vulnerabilidad de los cultivos a sus agentes nocivos; y (ii) los cambios en el valor de mercado de los productos afectados por los organismos nocivos -por ejemplo, el aumento del precio de un producto en el mercado da lugar a que se tolere menos cantidad de organismo nocivo o se intensifique el cultivo para incrementar su rendimiento (factor que se cita más abajo) o, simplemente, a veces se publicita más el problema y es incluido en listas de organismos nocivos de control prioritario. La medida en que dichos factores influyen sobre la reemergencia de los problemas fitosanitarios varía según la naturaleza de estos y no se corresponde con el orden en que se relacionan arriba. Todos estos factores asociados a las reemergencias se estudian en los siguientes apartados.

A2.1.1.1. Innovaciones en las tecnologías agrícolas y reemergencias de problemas fitosanitarios

Estas innovaciones incluyen: (i) la homogeneidad genética de los cultivos y del despliegue geográfico de los mismos; (ii) el tráfico de material vegetal que propicia la distribución de variantes de los agentes

nocivos de superior virulencia; y (iii) la intensificación agrícola, entre otros factores. La extensión con que dichas innovaciones influyen sobre la reemergencia de los problemas fitosanitarios varía según la naturaleza de estos y no se corresponde con el orden en que se relacionan arriba.

A2.1.1.1.1. La homogeneidad genética de los cultivos

El uso de cultivares genéticamente homogéneos, a veces incluso en régimen de monocultivo, ha sido considerado a menudo un rasgo indispensable en la agricultura moderna, máxime cuando la homogeneidad se ha referido a caracteres beneficiosos para aumentar el rendimiento. Sin embargo, pronto se pusieron de manifiesto los variados efectos negativos de la homogeneidad genética en variados aspectos, entre los cuales destaca su efecto en la mayor incidencia de enfermedades, y en menor extensión de plagas.

El impacto negativo de la reemergencia de enfermedades sobre las cosechas y su relación con innovaciones tecnológicas fue primeramente puesto de manifiesto en 1970, en EE. UU., por las epidemias de la necrosis de la hoja del maíz causada por la raza T del hongo *Bipolaris maydis* (sinónimo: *Helminthosporium maydis*, teleomorfo *Cochliobolus heterostrophus*); pero la significación fitopatológica de dichas reemergencias se acentuó desde principios de la década de 1990 y sus efectos han tenido lugar en países desarrollados, afectando a cultivos importantes para la alimentación y la agroindustria (ej., maíz, olivo, patata, tomate, trigo). Todo ello es indicador de: (i) la fragilidad de la producción agrícola ante condiciones favorables para enfermedades graves -aún en países donde supuestamente se dispone del mejor conocimiento y tecnologías para dicha producción-; y (ii) la necesidad de estudio y capacitación profesional continuados en Sanidad Vegetal, porque el desarrollo de las reemergencias está en buena parte vinculado al dinamismo tecnológico que auspicia el progreso de la producción agrícola.

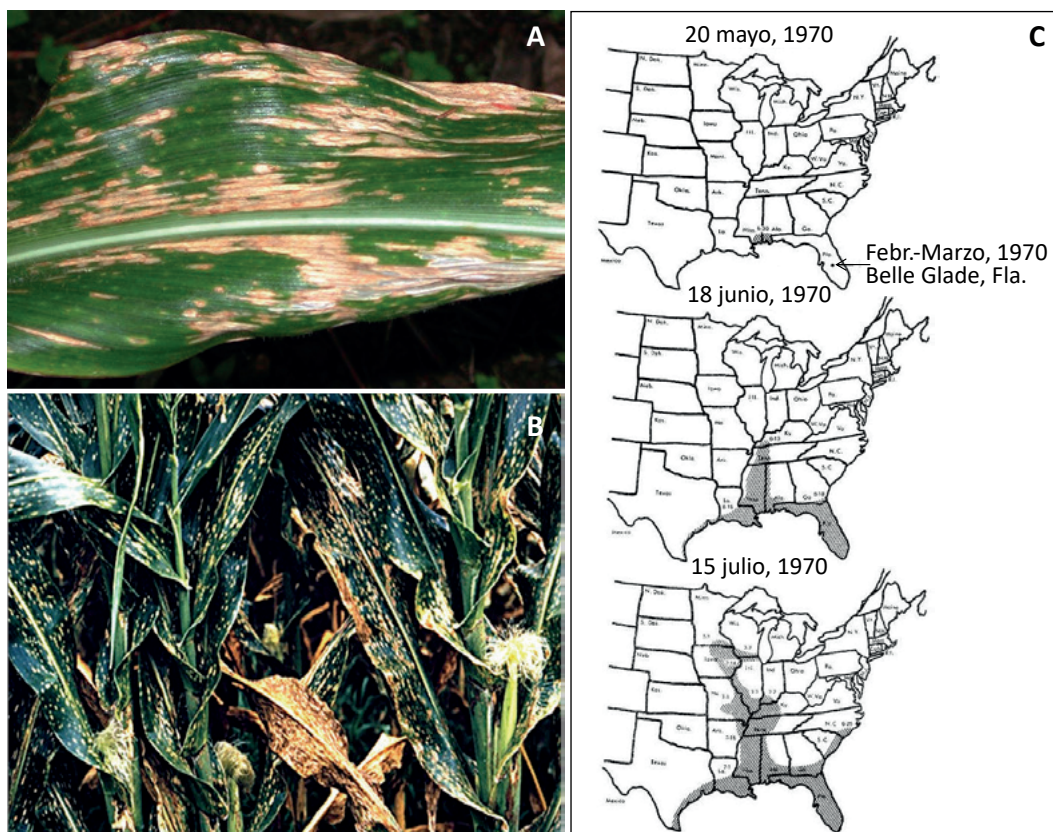
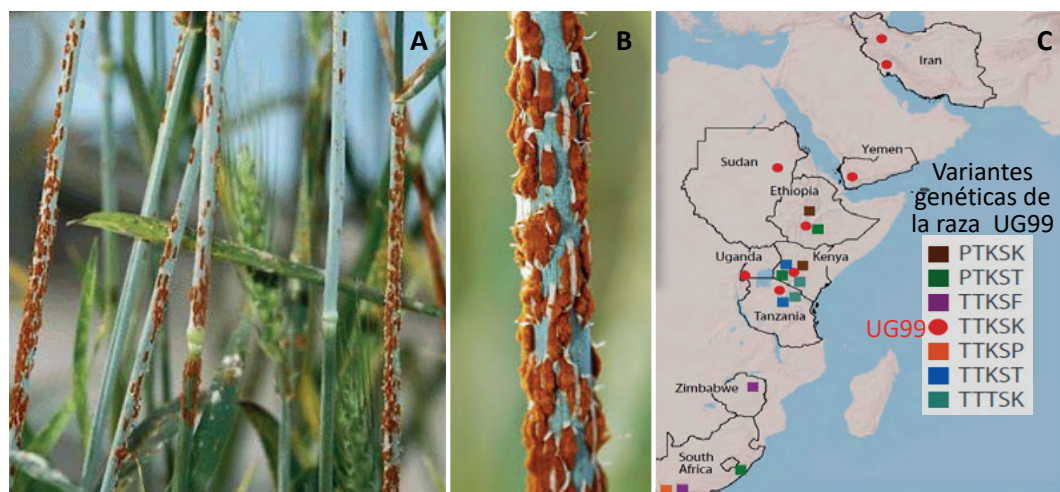


Foto 1. Influencia de la homogeneidad genética de los cultivos en la reemergencia de enfermedades. **A, B.** Necrosis de la hoja del maíz causada por la raza T del hongo *Bipolaris maydis*: lesiones necróticas extensa (A), y vista de cultivo afectado (B) (Cortesía de H.D. Thurston); **C.** Expansión geográfica de la necrosis de la hoja del maíz en EE. UU. en el año 1970, desde el Estado de Florida en el sur hasta el Estado de Wisconsin en el norte, en el periodo 20 de mayo a 18 de julio (Adaptado de Bruns, H.A. 2017. Southern corn leaf blight: A story worth retelling. Agronomy J. 109: 1-7.

Dicha necrosis de la hoja del maíz es ejemplo histórico de la influencia de la homogeneidad genética de los cultivos en la reemergencia de enfermedades. A mediados de la década de 1960, el descubrimiento de que un tipo de citoplasma (denominado Tms, de *Texas male sterility*) determinaba androesterilidad en maíz revolucionó la producción de cultivares híbridos de este en EE. UU., y propició que cerca del 85 % del maíz híbrido cultivado en este país en 1970 compartiera el citoplasma Tms. Ese mismo año, la necrosis de la hoja asoló los cultivos de maíz con citoplasma Tms en el centro y sur de EE. UU., causando pérdidas superiores al 50 % de la cosecha alcanzable valoradas en 1.090 millones de dólares USA (Foto 1) (Ullstrup, 1972). La responsable de tal desastre fue la raza T de *B. maydis*, así denominada porque está específicamente adaptada para causar enfermedad grave en plantas con el citoplasma Tms, pero no en plantas con citoplasma normal (N) no androestéril. La investigación fitopatológica demostró que la raza T existía con anterioridad al uso del citoplasma Tms en las zonas afectadas, pero que hasta entonces la enfermedad había tenido escasa importancia porque los cultivares de maíz que se habían utilizado en ellas tenían citoplasma N. Irónicamente, una indudable mejora tecnológica promovió la homogeneidad genética de extensas áreas de maíz, y al tiempo epidemias severas en ellas por el desarrollo de una estirpe del patógeno específicamente adaptada al genotipo vegetal predominante. La devastación causada por la raza T de *B. maydis* propició un intenso debate sobre la vulnerabilidad estratégica del maíz en la Academia Nacional de Ciencias Norteamericana, cuyas recomendaciones para diversificar las fuentes de citoplasma androestéril fueron acertadamente asumidas por la administración pública y la agroindustria en los EE. UU., en un ejemplo envidiable de crédito social a la investigación y a la ciencia agronómica.

Foto 2. Influencia de la variación genética de los patógenos en la reemergencia de enfermedades. **A, B.** Gravedad de los síntomas de la roya negra del tallo del trigo causada por la raza UG99 de *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*: vista general de un cultivo afectado (A), y detalle de uredinios de la roya en un tallo de trigo (B); **C.** Expansión geográfica de variantes genéticas de la raza UG99 desde Uganda hacia el norte y el sur de la costa este africana (Adaptado de Singh et al. 2011. Annu. Rev. Phytopathol. 49: 465-481).



Casi 30 años después, la fragilidad que confiere la homogeneidad genética de los cultivos frente a la variación genética de los patógenos ha sido ilustrada de nuevo con un caso de resonancia mundial similar al antes descrito, en un ejemplo más de que la tozuda naturaleza responde a los cambios que determinan las innovaciones tecnológicas cuando estas influyen sobre las interacciones entre patógenos y plantas. En 1998, una gran extensión de cultivos de trigo en Uganda que compartían los mismos genes de resistencia a *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* (el agente causal de la roya negra del tallo), fue devastada tras la aparición de una nueva raza del hongo patógeno -denominada raza UG99-, cuya capacidad de atacar al 90 % de todos los cultivares de trigo en uso en el mundo determinó que fuese considerada una de las mayores amenazas para la producción global de trigo y el aseguramiento de alimentos en la actualidad (Foto 2A,B) (Singh et al., 2011). Además, tras la primera detección de la raza UG99 se han identificado hasta siete variantes de ella en un único linaje clonal, que varían en virulencia sobre cinco genes de resistencia (*Sr21*, *Sr24*, *Sr31* y *Sr36*). La diseminación de dichas razas a grandes distancias por el viento, y posiblemente por intervención humana, ha propiciado que se extiendan desde Uganda a países limítrofes en el Este de África, así como a Irán, Sudán, Sudáfrica, Yemen y Zimbabwe

(Foto 2C). En el año 2017, la FAO y la revista Nature comunicaron que las nuevas razas virulentas de *P. graminis* f. sp. *tritici* se habían extendido a la Cuenca Mediterránea y otras áreas trigueras en Europa, donde constituyen actualmente una seria amenaza para la producción cerealista en ellas.

A2.1.1.1.2. La introducción de estirpes exóticas más virulentas o de vectores más eficientes de los patógenos en los lugares de producción

Uno de los primeros y más notables ejemplos de la influencia de la introducción de estirpes exóticas sobre la reemergencia de enfermedades devastadoras, fueron las sucesivas introducciones de biotipos exóticos de *Phytophthora infestans* (el agente causal del mildiu de la patata) altamente virulentos sobre cultivares de patata (cf., Foto 1A, Capítulo A1.) y tomate con resistencia parcial a las estirpes nativas y resistentes al fungicida metalaxyl (ej., los linajes clonales US-7 y US-8), que tuvieron lugar durante el periodo 1993-1997 en plántulas y frutos de tomate con infecciones latentes importados de Méjico -nótese que la importación de tubérculos de patata estaba prohibida en EE. UU. Los linajes exóticos introducidos se diseminaron rápida y extensamente, originando epidemias de mildiu devastadoras en las zonas de cultivo de patata de los EE. UU. que ocasionaron cuantiosas pérdidas directas (ej., reducción de 80-85 % de la cosecha) o indirectas (ej., incremento de 30 millones de dólares USA en el coste de tratamientos fungicidas para el control de la enfermedad (Fry y Goodwin, 1997).

Similarmente, la rápida y extensa diseminación de insectos vectores de ciertos virus y bacterias desde las áreas en que son nativos a nuevas zonas, han determinado la ocurrencia de epidemias severas de virosis y bacteriosis de vegetales, tres ejemplos de los cuales se describen a continuación.

El incremento de la incidencia y gravedad de la tristeza de los cítricos (causada por el virus CTV) en Argentina, Brasil, Florida y Venezuela fue consecuencia de la introducción en estos países del pulgón marrón de los cítricos (*Toxoptera citricida*), que es altamente eficiente en la transmisión de las estirpes *seedling yellows* y *stem pitting* muy virulentas del CTV presentes en las zonas de producción, pero que habían permanecido indetectables porque son transmitidas de forma muy poco eficiente por otros pulgones vectores (Halbert et al., 2004; Rocha-Pena et al., 1995).

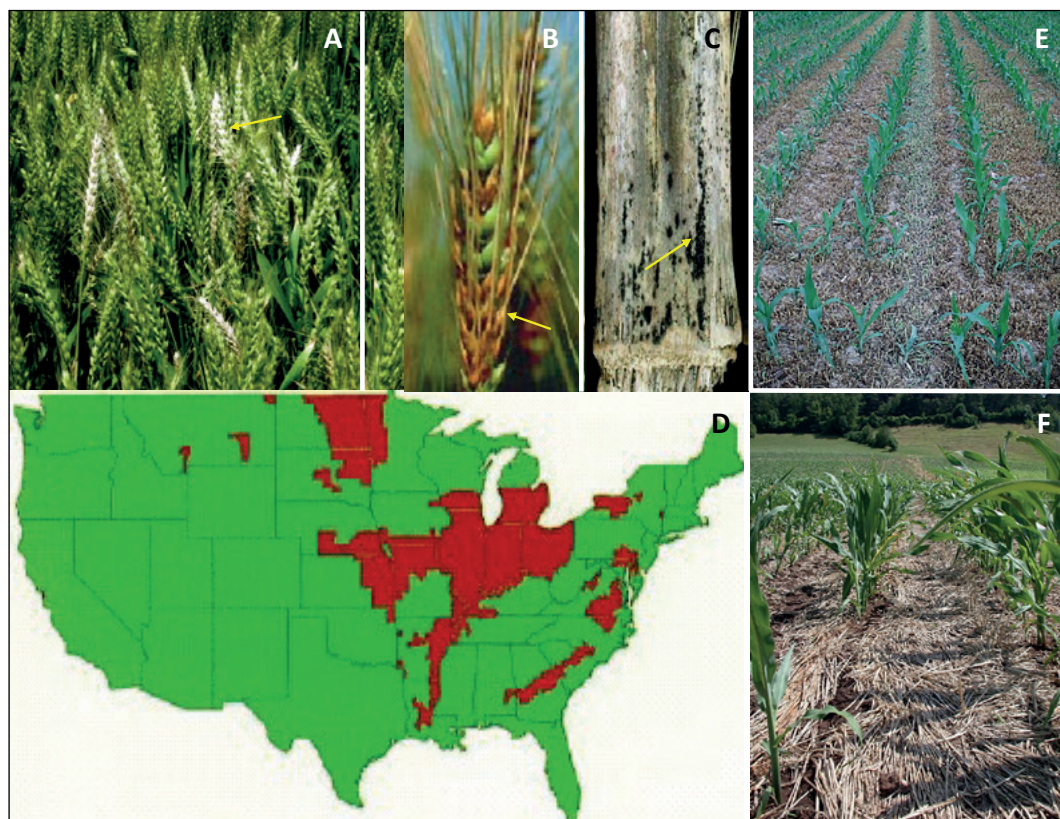
La introducción de *Homalodisca vitripennis* (sinónimo: *H. coagulata*) desde Méjico a California incrementó en esta última la incidencia y gravedad de la enfermedad de Pierce de la vid -causada por la bacteria *Xylella fastidiosa* subsp. *fastidiosa*-, por las importantes repercusiones de esta especie vectora en la epidemiología de la enfermedad. Mientras que el vector autóctono *Graphocephala atropunctata* se alimenta preferentemente de tejidos foliares, y transmite la bacteria solo durante la primavera porque los adultos mueren a principios de junio, *H. vitripennis* se alimenta de, y puede transmitir el patógeno a, tejidos leñosos durante la fase de reposo vegetativo de la vid en invierno. Esta capacidad, unida a su mayor movilidad, convirtió a dicha especie en un vector mucho más eficiente que facilitó el desarrollo de epidemias más tempranas y explosivas y una mayor abundancia de inóculo, así como el que se produjeran importantes daños por *X. fastidiosa* en almendro en dicho Estado (Almeida et al., 2005).

A2.1.1.1.3. La intensificación agrícola y las nuevas prácticas culturales

En el curso de las últimas décadas se han venido produciendo cambios en las estrategias de producción agrícola para la mejora de la productividad, que pueden repercutir sobre las interacciones entre las plantas y sus organismos nocivos y, consecuentemente, tienen el potencial de propiciar la reemergencia de enfermedades y plagas que habían dejado de causar problemas severos. Ejemplos de tales cambios son la extensión del monocultivo o la simplificación del paisaje agrícola, la práctica del mínimo o no laboreo, la intensificación de la densidad y estructura de las plantaciones, la intensificación de las rotaciones, el uso de cubiertas vegetales, la extensión del regadío, la mecanización de la poda y la cosecha, la fertilización intensiva, etc.

Casos paradigmáticos de enfermedades y plagas reemergentes asociadas a cambios derivados de la intensificación agrícola, y de la importancia de sus efectos cuando su desarrollo es propiciado por la conjunción de varios de ellos, son la necrosis de la espiga de cebada y trigo causada por el hongo *Fusarium graminearum sensu stricto* -uno de los estados anamórficos comprendidos en el complejo de especies *Gibberella zeae*-, la verticilosis del olivo causada por *V. dahliae* (cf., Apartado A1.2.2.1.1.) y algunas virosis y plagas de cereales.

Foto 3. Influencia de la intensificación agrícola y nuevas prácticas de cultivo en la reemergencia de enfermedades (A-D) y plagas (E, F). **A, B.** Vista general de un cultivo de trigo afectado de la necrosis de la espiga (flecha) causada por el hongo *Fusarium graminearum sensu stricto* (A), y detalle de una espiga de cebada con espiguillas necrosadas (B) (flecha); **C.** Restos de tallo de trigo afectado de necrosis de la espiga con peritecios del estado sexual *Gibberella zeae* (flecha); **D.** Expansión geográfica de la enfermedad en la franja cerealista de los EE. UU. asociada a las prácticas de monocultivo y no laboreo (Adaptado de McMullen et al., 1997); **E.** Cultivo de maíz crecido en suelo no labrado; **F.** Marras de planta de maíz causadas por gusanos del suelo debido a la práctica de no laboreo.



A2.1.1.1.3.1. Influencia del monocultivo y del no laboreo

En el periodo entre 1991 y 1995, las epidemias de necrosis de la espiga asolaron 4-6 millones de ha de cebada, trigo blando y trigo duro de primavera en 4-11 estados de los EE. UU., según años, originando pérdidas de 25 a 45 % de la cosecha valoradas en más de 1.000 millones de dólares USA (Foto 3A-D) (McMullen et al., 1997). Según los expertos, la magnitud de la devastación causada por esta enfermedad se debió a la confluencia de factores muy favorables para el desarrollo del hongo causante de la misma, incluyendo: (i) la progresiva acumulación de inóculo del patógeno en restos de cultivos afectados anteriores que quedaron sobre el suelo por el monocultivo y prácticas de no-laboreo; (ii) la utilización de cultivares susceptibles de cebada y trigo, cuya mejora de resistencia había sido desestimada por la escasa incidencia y gravedad de la enfermedad en periodos anteriores; y (iii) un ambiente excepcionalmente húmedo durante los meses de junio y julio del periodo de tiempo referido -en los que la precipitación acumulada duplicó a la normal acaecida en años anteriores-, que facilitó la formación del estado sexual del patógeno y la descarga en el aire de las ascosporas que infectan las espigas (McMullen et al., 1997). La práctica del no-laboreo también puede acentuar la gravedad de plagas causadas por insectos que desarrollan una fase fitófaga en el suelo, como los llamados insectos de suelo. (Foto 3E, F).

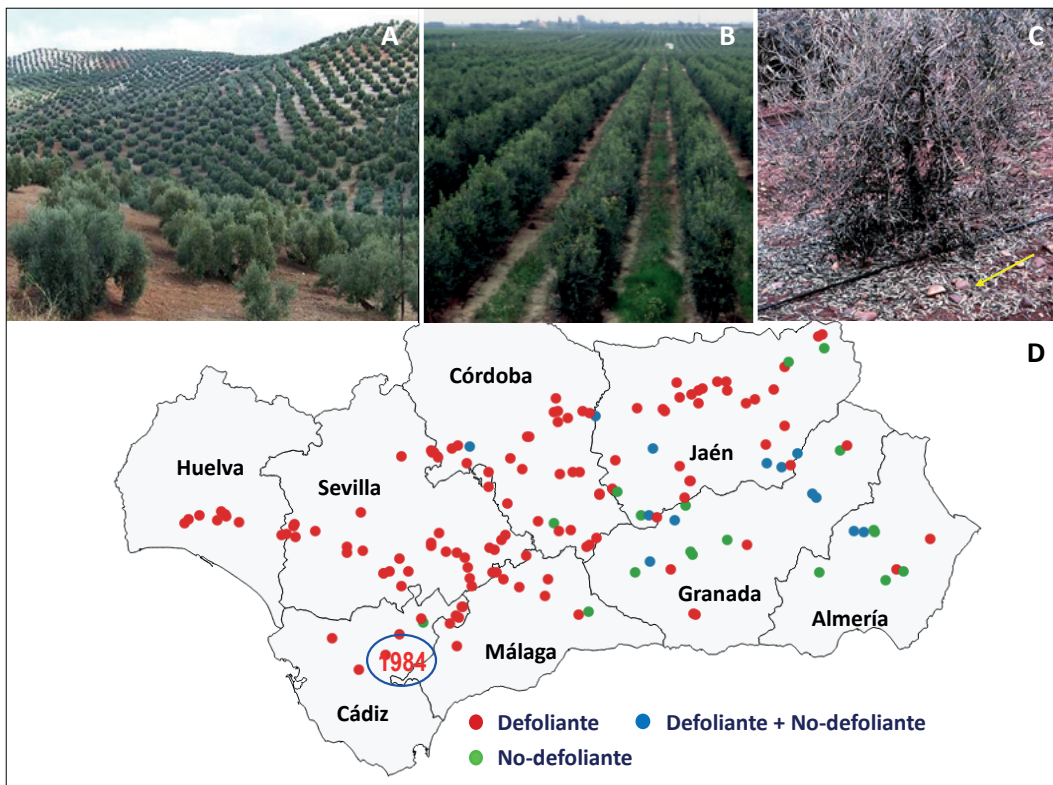


Foto 4. Influencia de la intensificación y estructura de las plantaciones de olivo en la reemergencia de la verticilosis del olivo en Andalucía. **A.** Vista general de una plantación tradicional con una densidad de 150-200 olivos por hectárea; **B.** Vista general de una plantación en seto con una densidad de 1.500 olivos por hectárea; **C.** Olivo 'Arbequina' con defoliación severa (flecha) causada por el patotipo defoliante de *Verticillium dahliae*. **D.** Expansión geográfica del patotipo defoliante de *V. dahliae* (puntos rojos y puntos azules) que fue primeramente detectado en algunos cultivos de algodón en la provincia de Sevilla en 1984 (círculo). Los datos indican una prevalencia de verticilosis del 80,1%, basado en observaciones en 427 olivares elegidos arbitrariamente en 123 municipios en Andalucía (Cortesía de J. A. Navas).

A2.1.1.1.3.2. Influencia de la intensificación y estructura de las plantaciones

La reemergencia de la verticilosis del olivo en Andalucía -causada por *V. dahliae*- también es buen ejemplo de cómo la intensificación en el manejo de los cultivos para la mejora de los rendimientos puede propiciar nuevas amenazas para sectores agrícolas estratégicos. Durante los últimos 15 años, la producción oleícola ha estado inmersa en un proceso de intensificación, basada fundamentalmente en el uso de algunos cultivares de olivo susceptibles a la verticilosis para establecimiento de plantaciones intensivas y superintensivas (1.000-2.000 árboles/ha) de regadío, que ha auspiciado el desarrollo de una industria viverista de olivo sin la adecuada certificación sanitaria (Foto 4A, B). Esta intensificación ha dado lugar a la extensión en toda Andalucía de la enfermedad—que ya era conocida desde 1980 en las provincias de Córdoba, Jaén y Sevilla, pero había sido desestimada por el sector olivarero por su escasa incidencia sobre la producción—. Además, la importancia económica de la enfermedad se ha acentuado por la prevalencia de una nueva estirpe del hongo causal, altamente virulenta y letal en algodón y olivo, que se denomina defoliante (D) porque origina la defoliación intensa de la planta (Foto 4C). Esta nueva estirpe defoliante, que es nativa de los EE. UU. y fue introducida presumiblemente en semillas de algodón infectadas, fue detectada en algunos cultivos de algodón al sur de la provincia de Sevilla en 1984 y en la actualidad se ha extendido en todas las provincias andaluzas, siendo predominante en Jaén, Córdoba y Sevilla, las tres provincias con mayor extensión de olivar en Andalucía (Foto 4D) (Jiménez-Díaz et al., 2012).

La diseminación de la nueva estirpe D de *V. dahliae* en los olivares andaluces ha sido propiciada por el uso de plantas de olivo infectadas no certificadas sanitariamente. De hecho, inspecciones llevadas a cabo por el Servicio de Sanidad Vegetal de la Junta de Andalucía durante los años 2006 y 2007 en 750 viveros de olivo registrados oficialmente, en las que se realizaron análisis diagnósticos moleculares (cf., Capítulo C1., Apartado C1.3.), indicaron que el 15 % de ellos contenían plantas que estaban infectadas por el hongo, pero no mostraban síntomas de verticilosis. Sin duda, estos resultados están relacionados con la normativa de la Unión Europea (UE) para la producción viverista de olivo de calidad

CAC (*Conformitas Agraria Communitatis*), ya que esta sólo es la mínima exigencia de calidad para la comercialización de material vegetal propagativo y se basa en la ausencia de síntomas perceptibles visualmente pero no en la certificación sanitaria analítica, de manera que en absoluto garantiza que las plantas estén libres de *V. dahliae*.

La introducción y expansión de la estirpe D de *V. dahliae* en Andalucía repercute sobremanera sobre el control de la verticilosis del olivo, porque su mayor virulencia supera la resistencia que poseen algunos cultivares contra la estirpe no defoliante que prevalecía con anterioridad. Esta superior virulencia hace necesario el desarrollo de patrones altamente resistentes a la estirpe D si la producción olivarera continúa asentada sobre los cultivares susceptibles Arbequina y Picual, o la obtención o selección de nuevos cultivares resistentes que además satisfagan los requisitos de rendimiento y calidad que reclama el mercado (Jiménez-Díaz et al., 2012). El incremento de la prevalencia e incidencia de la verticilosis del olivo en Andalucía, y en particular la del patotipo D de *V. dahliae*, también ha sido influido por la intensificación del regadío en el olivar andaluz (Jiménez-Díaz et al., 2012). Estudios recientes indican que la extensión de *V. dahliae* en las zonas olivareras ha propiciado que el patógeno infeste el agua de pozos, ríos, y estaciones de bombeo de las comunidades de regantes, y sea depositado por el agua de riego infestada distribuida por los goteros directamente en el sistema radical del árbol, donde se produce la infección. La diseminación de *V. dahliae* por el agua de riego y por las hojas caídas de árboles infectados por el patotipo D, junto con la capacidad de ellas de actuar como fuente de inóculo, constituyen un nuevo paradigma en la epidemiología y control de la verticilosis del olivo e indican que este último no puede ser abordado con la consideración de enfermedad monocíclica con el suelo infestado y/o el material de plantación infectado como únicas fuentes de inóculo (Jiménez-Díaz et al., 2012).

2.1.1.1.3.3. Influencia de la intensificación de las rotaciones

La intensificación de las rotaciones de cereales en la Cuenca Media del Ebro está siendo posible por el aumento de la superficie regada de cultivo extensivo, junto con el aumento de la temperatura debido al Cambio Climático y la disponibilidad de una amplia gama de cultivares de maíz y de cereal de invierno de ciclos diversos que pueden sembrarse en distintos momentos del año. En estas circunstancias, es cada vez más variable la época de cosechar el maíz a lo largo del otoño, tras la cual se siembra el cereal de invierno, cuya cosecha más o menos adelantada en la primavera facilita que se pueda sembrar maíz de nuevo. De la intensificación de las rotaciones de cereales se deriva el aumento, y en ocasiones disminución, de la incidencia de algunas plagas y enfermedades de cereales de invierno y verano (Albajes et al., 2022). El mosaico de diferentes fenologías de los cereales de invierno y maíz en el paisaje conlleva varias consecuencias que pasamos a exponer de forma resumida.

La siembra tardía de cereales de invierno permite a estos cultivos escapar en buena medida de la inoculación del virus del enanismo amarillo de la cebada (Barley yellow dwarf virus, BYDV) en otoño -el más importante tanto en trigo como en cebada-, al emerger cuando el vuelo de los pulgones vectores ha disminuido sensiblemente. La cantidad de inóculo de BYDV para la infección del maíz en primavera será por ello menor tanto en el cereal de invierno como en las gramíneas del barbecho. Sin embargo, la variada fenología de la maduración del cereal en primavera propicia que la formación de pulgones alados se extienda en esa época, al igual que la inoculación de los virus más importantes del maíz, como son el virus del mosaico enanizante del maíz (Maize dwarf mosaic virus, MDMV) y el virus del mosaico de la caña de azúcar (Sugarcane mosaic virus, SCMV) transmitidos de forma no persistente por pulgones. Incluso es posible que el maíz más temprano sea fuente de inóculo para el maíz sembrado más tardíamente, ya que los estados fenológicos más jóvenes del huésped son preferidos por los pulgones alados y son más susceptibles a la transmisión de ambos virus. Una tercera virosis que afecta a menudo al maíz en el Mediterráneo es el enanismo rugoso del maíz (causado por el Maize rough dwarf virus, MRDV),

transmitido de manera persistente por el cicadélido *Laodelphax striatellus*. Los máximos de vuelo de este cicadélido se producen en el periodo mayo-junio y por tanto coinciden con estadios de desarrollo jóvenes del maíz de siembra tardía, los cuales son más perjudicados que los de siembra temprana. Agrava ese último fenómeno el hecho de que los cereales de invierno y algunas de sus gramíneas adventicias son también huéspedes de dicho virus y por tanto reservorios de inóculo en invierno.

La mencionada intensificación de las rotaciones de cereales también tiene consecuencias para los lepidópteros taladros de maíz, tradicionalmente la plaga más importante de ese cultivo, en particular antes de la introducción del maíz transgénico Bt (cf., Capítulo C4., Apartado C4.2.4). Las fechas tardías de siembra del maíz en esas rotaciones intensivas permiten escapar en buena medida de los primeros vuelos colonizadores de taladros, pero, en contraposición, ofrecen a los mismos la posibilidad de diseminarse a campos de maíz joven, preferidos para hacer la puesta y desarrollar las larvas. Este fenómeno, en combinación con el retraso en la inducción de diapausa por el aumento de temperaturas, incrementa la frecuencia de una tercera generación en los taladros y, por tanto, el aumento de sus densidades de población.

Por último, podemos señalar que la intensificación de las rotaciones de cereales va acompañada en ocasiones de un aumento de la superficie con técnicas de no laboreo, de lo que se desprende, tal como comentamos más arriba, la acumulación sobre el suelo de una mayor cantidad de fuente de inóculo de enfermedades de gramíneas causadas por hongos.

La intensificación agrícola conlleva a menudo la simplificación de los paisajes agrícolas, tanto en especies y cultivares como en la reducción de hábitats naturales o semi-naturales, aparentemente improductivos. Esa simplificación ha sido señalada como una de las causas de la proliferación extraordinaria de determinados organismos nocivos, a través de la disminución de los enemigos naturales de estos, que precisan de una diversidad de recursos y hábitats para su permanencia efectiva en los cultivos, así como de mayor eficiencia en la transmisión al aumentar las probabilidades de encontrar un huésped desde una fuente de inóculo (Bianchi et al., 2006). Volveremos a la influencia del monocultivo en la remergencia de organismos nocivos en la agricultura más adelante, cuando nos refiramos a la introducción de determinados cambios en las tecnologías agrícola.

A2.1.1.2. Cambios en la demanda de los mercados

Tal como queda dicho en otros Apartados de esta obra, la toma de decisiones en las actividades para el manejo de enfermedades, plagas y malas hierbas se basa en el objetivo simple, aunque de consecución compleja, de evitar una pérdida económica con medios y métodos de control de coste inferior a esa pérdida. Con ese criterio, la importancia de un agente nocivo viene fuertemente condicionada por el precio -o valor no económico- del producto que se obtenga con la actividad agrícola o forestal. Ello hace que un organismo nocivo pueda pasar desapercibido o reciba escasa atención durante bastante tiempo por parte de quien maneja el cultivo o masa forestal, y reemerja cuando sube su precio o valor. Entre los varios ejemplos que podríamos mencionar sobre ello está el del perforador del corcho, *Coraebus undatus*, un coleóptero dañino que se alimenta del alcornoque y en mucho menor medida de otras quercíneas. La industria del corcho, tradicionalmente dedicada a la producción de tapones para el vino, cava y similares, fue una actividad muy rentable en la cuenca mediterránea en la segunda mitad del siglo XIX y primeras décadas del siglo XX y luego decayó sensiblemente, primero por la ruina del sector vitivinícola provocada por la plaga filoxera (cf., Capítulo A1., Apartados A1.3.1.1. y A1.3.1.2.) y después por la sustitución del corcho por otros materiales en buena parte de los vinos y licores de menor calidad. Más recientemente, sin embargo, el corcho ha vuelto a ser una actividad económica importante para la industria vitivinícola, y secundariamente también como material para la construcción y embellecimiento de locales y viviendas.

En la época de auge de la industria y exportación del corcho en Portugal y España, se recoge en varias publicaciones la incidencia negativa de la mencionada plaga *C. undatus* en la cantidad y calidad del corcho; véase por ejemplo la conferencia pronunciada por el entomólogo Nonell a principios del siglo XX (Nonell, 1915). El ciclo vital del insecto dura 2 años. La hembra de este escarabajo hace la puesta de huevos en las anfractuosidades profundas de la corteza y la larva, al nacer, penetra hasta la capa madre del corcho en donde cava una profunda y larga galería. La larva abandona dicha galería para crear una cámara de pupación en el corcho y una vez desarrollada la pupa a adulto, este sale al exterior para aparearse y buscar la hembra en otro alcornoque para hacer la puesta. La reemergencia de esa plaga en los últimos años, consecuencia de la recuperación económica del corcho, ha propiciado la investigación sobre métodos de control no químicos (no hay insecticidas registrados para ese uso). El uso de trampas moradas a las que se añaden sustancias volátiles atrayentes y un mejor cuidado de los alcornocales son el método más eficaz hoy en día.

A2.1.2. La emergencia de nuevas enfermedades, plagas, y malas hierbas: un elemento clave en la Sanidad Vegetal actual

La persistencia de las pérdidas globales de cosecha antes referida también ha sido atribuida a la aparición de nuevas enfermedades, plagas y malas hierbas denominadas emergentes, en países o zonas antes libres de las mismas. **Enfermedades emergentes son aquellas cuya incidencia y gravedad han aumentado recientemente en uno o varios países, estando a menudo asociadas con agentes nocivos que atacan nuevos cultivos, porque han surgido *ex novo* o han modificado su patogénesis.** Ejemplos de emergencias relevantes para la Sanidad Vegetal a nivel mundial incluyen: (i) bacteriosis [ej., el huanglongbing o brote amarillo de los cítricos causado por tres especies de '*Candidatus Liberibacter*' (cf., Fotos 1C, D, Capítulo A1.), la enfermedad *zebra chip* de la patata causada por '*Ca. L. solanacearum*', la enfermedad de Pierce de la vid, el quemado foliar del almendro y el decaimiento rápido del olivo causadas por subespecies de *X. fastidiosa* (cf., Fotos 2C, D, Capítulo A1.), etc.]; (ii) micosis causadas por hongos y oomicetos [ej., el mal de Panamá de la platanera Cavendish causado por la raza 4 Tropical del hongo *F. oxysporum* f. sp. *cubense* (cf., Foto 2A, Capítulo A1.), la muerte súbita de *Quercus* spp. causada por *Ph. ramorum* (cf., Foto 2B, Capítulo A1.), la necrosis de la espiga del trigo causada por los hongos *Pyricularia oryzae* patotipo Triticum y *P. graminis-tritici* (Foto 5A, B Capítulo A2.), la roya de la soja causada por *Phakospora pachyrizi*, etc.]; (iii) virosis (ej., las causadas en tomate por los virus de la clorosis (ToCV), el mosaico del pepino dulce (PeMV) y el "torrado" (ToTV), y el rizado amarillo de la hoja (TYLCD) –causado por varias especies virales: Tomato yellow leaf curl virus (TYLCV), Tomato yellow leaf curl Sardinia virus (TYLCSV), Tomato yellow leaf curl *Málaga virus* (TYLCMaV), y Tomato yellow leaf curl Axarquía virus (TYLCAxV)- en la Cuenca Mediterránea y países más fríos, como Holanda. La emergencia del TYLCD ha sido influida claramente por la prevalencia de los biotipos B y Q del complejo de 46 especies crípticas de la mosca blanca del tabaco, del algodón o de la batata *Bemisia tabaci*, que transmiten dichos virus con eficiencia diferencial (Hanssen et al., 2010; Malka et al., 2018). Nótese que los cultivos hortícolas y ornamentales están especialmente expuestos a la recepción de vectores exóticos, por las especiales condiciones climáticas de los invernaderos y por el gran comercio mundial de plantas ornamentales y florales enteras; (iv) plagas causadas por los insectos *Anoplophora glabripennis*, *Bactericera cockerelli*, *Spodoptera frugiperda*, *Thaumatotibia leucotreta*, etc.; y (v) infestaciones de malas hierbas como *Amaranthus palmeri* (cf., Foto 5B, Capítulo A1.), entre otras (Bové, 2014; Butler, 2013; Callaway, 2016; Hanssen et al., 2010). En el Capítulo B1. de este libro se estudian de forma pormenorizada los aspectos de la Bioseguridad vegetal, los principales organismos nocivos emergentes o de alto riesgo para la UE, los factores que favorecen la introducción de agentes nocivos exóticos, y las estrategias que se proponen para contrarrestarla.

A2.2. Retos que afronta la Sanidad Vegetal en el siglo XXI

Los Apartados anteriores indican claramente que la Sanidad Vegetal comprende un complejo marco de interacciones a corto y medio plazo entre agentes nocivos parasitarios y no parasitarios con poblaciones de plantas cultivadas o silvestres, que tienen lugar bajo condiciones medioambientales a su vez complejas y variables. Los efectos de dichas interacciones comprometen la seguridad y salubridad alimentaria de la población y la conservación de los recursos agrícolas y forestales, como ya se ha indicado en el capítulo anterior, de manera que la evitación o mitigación de dichos efectos es la meta de la Sanidad Vegetal como macrodisciplina de aplicación en la producción agrícola y forestal. Sin embargo, cada uno de los tres grandes factores interactuantes –los agentes nocivos, los agroecosistemas y el medioambiente– están sujetos a cambios que confieren, junto con el entorno económico y social de la agricultura y silvicultura, dinamismo a la Sanidad Vegetal y determinan desafíos para la consecución de su meta. En términos generales, dichos desafíos resultan, al menos, de cambios en: (i) las formas y sistemas y de producción agro-forestal; (ii) la introducción transfronteriza de agentes exóticos y la emergencia y reemergencia de enfermedades, plagas y malas hierbas; (iii) el medio ambiente (i.e., Cambio Climático); (iv) las tecnologías de aplicación a la producción agrícola y la gestión de la Sanidad Vegetal; (v) los medios y estrategias disponibles para la gestión de enfermedades, plagas y malas hierbas; y (vi) la investigación científico-técnica, la formación, y la transferencia de tecnologías. Los retos para la Sanidad Vegetal que constituyen algunos de dichos cambios se describen a continuación, y además algunos de dichos retos se estudian en extenso en distintos capítulos de este libro.

A2.2.1. Retos derivados de las formas y sistemas de producción agro-forestal

La producción agrícola en la UE y en España están siendo sujetas a importantes cambios estructurales, como consecuencia de la creciente sensibilidad de la población por el medioambiente y la percepción social del mundo rural como ámbito multifuncional en el que la agricultura coexiste con otro tipo de actividades y objetivos relacionados con la cultura, la educación, el ocio, la salud, etc. Todo ello redundando en la UE en normativas legislativas como las Estrategias sobre “Biodiversidad” y “De la granja a la mesa” (*Farm to Fork*) derivadas del Nuevo Pacto Verde Europeo (*European Green Deal*), en las que se establecen condicionalidades y restricciones que inciden sobre los métodos, medios y estrategias para promover la sanidad de los cultivos (Bremmer et al., 2021). Esto determina la necesidad de cambios en la Sanidad Vegetal a través de la investigación, la formación y la transferencia tecnológica, para que la mejora de la eficiencia en la gestión de enfermedades, plagas y malas hierbas contribuya al aseguramiento de la competitividad. Dicho reto y la necesidad de cambios se acentúan por la coexistencia de diferentes formas de agricultura y silvicultura que propicia el “nuevo contexto” agro-medioambiental –desde la agricultura convencional más prevalente hasta la ecológica/organic e incluso agroecológica, pasando por la sostenible, integrada, etc.– ya que el desarrollo de métodos, medios y estrategias para la sanidad de los cultivos se ha venido produciendo fundamentalmente en el marco de la agricultura convencional.

A2.2.2. Retos derivados de la introducción transfronteriza de agentes exóticos y la emergencia y reemergencia de enfermedades, plagas y malas hierbas

La emergencia y reemergencia de enfermedades, plagas y malas hierbas favorecidas por la introducción transnacional de agentes nocivos exóticos (cf., Apartados A1.2.3.1. y A1.2.3.2.) y el Cambio Climático, entre otros factores, suponen un desafío en expansión para la Sanidad Vegetal por su demostrado potencial para ocasionar importantes efectos negativos y por el presumible incremento del ya intenso comercio internacional de plantas y productos vegetales que favorece las nuevas introducciones (Baker et al., 2021) (cf., Capítulo B1.). La continuada amenaza de introducciones de agentes

nocivos exóticos determina retos para: (i) fortalecer la exigencia de certificación fitosanitaria del material vegetal objeto de tránsito internacional y fortalecer los protocolos de inspección que garanticen su efectividad; (ii) desarrollar tecnologías mejoradas para la detección rápida, alerta y monitorización de la diseminación de las introducciones que se puedan producir (cf., Capítulo A1.); (iii) divulgar la legislación nacional e internacional para impedir introducciones y su diseminación; y (iv) elaborar protocolos para la rápida y efectiva erradicación de estas una vez detectadas (Jeger et al., 2021).

A2.2.3. Retos derivados de cambios en el medioambiente: el Cambio Climático

Las interacciones entre sistemas biológicos que subyacen en los fenómenos que inciden sobre la Sanidad Vegetal determinan que estos sean frágiles a los cambios en el medio ambiente, de los cuales el más notorio y actualmente preocupante es el Cambio Climático (cf., Capítulo B2.). De hecho, la información disponible ya indica la importante influencia de este último sobre la prevalencia, incidencia y gravedad de enfermedades y plagas de un amplio marco de cultivos y ecosistemas naturales (Burdon y Zhan, 2020; Quesada-Moraga, 2011). Sin embargo, la multiplicidad de componentes en dichas interacciones que pueden ser influidos por el Cambio Climático (cultivos, artrópodos fitófagos, patógenos, vectores, organismos antagonistas de los agentes nocivos, etc.), hace que **los efectos sobre la Sanidad Vegetal puedan, muy posiblemente, variar según regiones, tipo de agente nocivo, y cultivo**. Además, los efectos sobre el desarrollo de plagas, enfermedades y malas hierbas pueden ser positivos (incremento del riesgo) o negativos (mitigación del riesgo) y repercutir por ello sobre la eficiencia de los medios y métodos de control (Chakraborty y Newton, 2011; Quesada-Moraga, 2011). Por ello, son retos para la Sanidad Vegetal determinar la importancia relativa de los procesos biológicos y la influencia sobre ellos de variaciones climáticas clave, a fin de predecir los impactos del Cambio Climático, así como determinar la efectividad de las estrategias de control que también pueden ser afectadas por dicho Cambio (ej., utilización de cultivares resistentes a los agentes nocivos o de sus antagonistas para el control biológico; cf., Capítulos C3. y C4.).

A2.2.4. Retos derivados de cambios en las tecnologías de aplicación a la producción agrícola y la gestión de la Sanidad Vegetal

Las complejas interacciones que subyacen en las plagas y las enfermedades también determinan que la Sanidad Vegetal sea frágil frente a los cambios que se producen en el manejo de los huéspedes de los agentes nocivos en los agroecosistemas. De hecho, Zadoks (1992) resaltó la vinculación de la necesidad de protección de los cultivos a cambios en el desarrollo de la agricultura (ej., el incremento en el tamaño y la agregación de las parcelas de cultivo; la homogeneidad genética de los cultivos a niveles de especie, cultivar y genotipo; el incremento en la densidad de los cultivos, la mecanización, etc.).

Los devastadores efectos de las reemergencias de plagas y enfermedades asociadas a innovaciones tecnológicas han sido objeto de atención y estudio desde la segunda mitad del siglo XX (cf., Apartado A1.2.3.1.), y **es presumible que reemergencias similares puedan continuarse produciéndose** porque las mejoras de productividad agroforestal necesitarán de innovaciones (cambios) tecnológicas adicionales con potencial de repercutir en los agentes nocivos y/o los fenómenos parasitarios y no-parasitarios. Por ejemplo, la **introducción de nuevos cultivos** puede dar lugar a encuentros con agentes nocivos autóctonos a cuyas interacciones no habían estado sujetos anteriormente, sin soslayar el riesgo adicional de introducciones de agentes exóticos con los que han estado asociados en los lugares de origen, que por no ser específicos pueden incidir sobre cultivos existentes. Similarmente, la **capacidad de numerosos hongos, bacterias y virus fitopatógenos de establecer infecciones en plantas cultivadas no susceptibles o malas hierbas que son asintomáticas (endófitas), o de permanecer latentes en condiciones no favorables para el desarrollo de los síntomas**, hace que: (i) tanto el uso de ellas en cubiertas vegetales

y bandas entre cultivos para mitigar el riesgo de erosión del suelo y favorecer la entomofauna beneficiosa, respectivamente; como (ii) las infestaciones de malas hierbas y su control, tengan **repercusiones negativas importantes en la sanidad de los cultivos** porque dichas plantas ofrecen la oportunidad de servir como reservorios de los agentes nocivos y de propiciar la variabilidad genética en sus poblaciones (Bautista-Jalón et al., 2021; Linde et al., 2016; Malcom et al., 2013). En consecuencia, el estudio de las contingencias en la sanidad de los cultivos derivadas de la aplicación de innovaciones o prácticas culturales agrónomicamente beneficiosas, así como de la influencia de ello sobre la efectividad de las estrategias de control de los agentes nocivos, constituye un reto para la Sanidad Vegetal.

No menos reto que el anterior es el que plantea el uso eficiente de las tecnologías de la información y la agricultura de precisión para la gestión de la sanidad de los cultivos (ej., detección temprana, monitorización de la expansión espacio-temporal de los agentes nocivos, sistemas de toma de decisión para el control de estos, aplicaciones localizadas de productos fitosanitarios, etc.) (Jeger et al., 2021). Dichas posibilidades tecnológicas se estudian en extenso en el Capítulo B2. del presente libro.

A2.2.5. Retos sobre los medios y estrategias para la gestión de enfermedades, plagas, y malas hierbas

Los cambios en las formas de agricultura y en la percepción social de los riesgos medioambientales y del mundo rural también derivan en **retos sobre las estrategias y medios de control de aplicación en la Sanidad Vegetal**. Por ejemplo, los productos fitosanitarios (acaricidas, fungicidas, herbicidas, e insecticidas) han sido y continúan siendo el medio individual de control más importante para la protección de los cultivos; sin embargo, la reducción de su uso derivada de la sensibilidad social ante los riesgos para la salud y el medioambiente y la normativa de la UE derivada del Nuevo Pacto Verde plantean el reto de medios y estrategias de control alternativos y efectivos (cf., Capítulo B3.). Adicionalmente a este último se encuentran los retos de: (i) **minimizar dichos riesgos mediante sustancias activas fitosanitarias más específicas y tecnologías de tratamientos de precisión**, que ya se han demostrado eficientes en la reducción de impactos negativos; (ii) **maximizar la vida media efectiva de las sustancias específicas mediante estrategias de aplicación que mitiguen el desarrollo de resistencias a ellas**; y (iii) **desarrollar nuevas sustancias activas efectivas en la protección de las plantas, basadas en el conocimiento de los mecanismos** que subyacen en las interacciones entre los agentes nocivos y sus huéspedes, que tengan impacto mínimo sobre la salud y el medioambiente y escaso riesgo de aparición de resistencias (Bremmer et al., 2021; Jeger et al., 2021). Un reto adicional en el campo de los productos fitosanitarios de mínimo impacto medioambiental es el **desarrollo y aplicación de sustancias inductoras de los mecanismos defensivos innatos de la planta, más allá de los actuales bio-estimulantes** de composición compleja y formulación empírica que adolecen a menudo de eficiencia escasamente reproducible.

Otros ejemplos de medios y estrategias de control que constituyen retos para la Sanidad Vegetal conciernen al **desarrollo y utilización de la resistencia inherente de la planta a los agentes nocivos, y el control biológico mediante organismos antagonistas** de ellos. La utilización de cultivares resistentes es posiblemente el **más ambientalmente respetuoso y económicamente eficiente de los métodos de control**, pero su efectividad se ve comprometida por la fragilidad de las resistencias más efectivas ante la aparición de estirpes de los agentes nocivos virulentas sobre ellas, así como por la dificultad y coste económico del desarrollo de nuevos cultivares mediante la mejora genética convencional empleada mayoritariamente para ello. Sin embargo, la disponibilidad de tecnologías de base molecular (ej., plataformas de secuenciación masiva de alto rendimiento, tecnologías de edición genómica y de silenciamiento génico, etc.) ofrece la **posibilidad de mejoras en las estrategias de identificación de genes de resistencia más efectivos y de modificar el genoma de plantas de forma dirigida y precisa, de manera que se desarrollen resistencias durables** (cf., Capítulo C3.). Asimismo, el riesgo de supera-

ción de las resistencias ya disponibles por nuevas variantes virulentas de los agentes nocivos, puede ser mitigado mediante **estrategias de despliegue espacial y temporal** de aquellas todavía no explotadas, aunque conocidas, que confieren diversidad a los agroecosistemas y reducen la vulnerabilidad de los cultivos a las nuevas variantes.

Similarmente a la utilización de cultivares resistentes, el control biológico mediante macro y microorganismos antagonistas de los agentes nocivos es una de las estrategias más deseadas para obviar los riesgos que determinan los productos fitosanitarios antes referidos, y es clave en la agricultura ecológica u orgánica, así como en la gestión integrada como estrategia fundamental en la preservación de la sanidad de los cultivos y masas forestales. Sin embargo, **la aplicación práctica de dichos organismos antagonistas en la Sanidad Vegetal no ha alcanzado todavía una extensión acorde con dicho deseo**, excepto en determinados cultivos y situaciones, que en términos generales es atribuido a la **inconsistencia y variabilidad de que adolece la efectividad del control**, a la **necesidad de personal formado para su aplicación eficiente y a su coste relativamente elevado** (cf., Capítulo C4.). Aunque concebido como fenómeno simple, el antagonismo que subyace en el control biológico de enfermedades y el control microbiano de plagas concierne un amplio y variado conjunto de mecanismos complejos, cuya mejor comprensión permitirá satisfacer las expectativas de efectividad y aplicación en el control biológico. Alcanzar dicha comprensión y mejorar la efectividad constituyen un reto importante para la Sanidad Vegetal.

A2.2.6. Retos para la investigación científico-técnica, la formación, y la transferencia de tecnologías

La descripción de los retos 1-5 anteriores indica, intuitiva o expresamente, que afrontarlos con éxito necesita de la investigación en diversos aspectos de cada una de las disciplinas que configuran la Sanidad Vegetal. Sin embargo, como concepto integrativo, esta última afronta actualmente retos de mayor magnitud, porque **los cultivos no son afectados por enfermedades, plagas, y malas hierbas de forma individualizada**. Por el contrario, las afecciones pueden incidir conjunta y coincidentemente en cada cultivo, y **la Sanidad Vegetal debe proveer al agricultor con soluciones que protejan la cosecha de las pérdidas que pueden ocasionar todas ellas conjuntamente**. Además, tales soluciones han de ser integradas en los sistemas de producción agrícola, de manera que el concepto de Gestión Integrada de Enfermedades, Plagas y Malas hierbas, generalmente referido como Gestión Integrada de Plagas (GIP) o *Integrated Pest Management* en la bibliografía inglesa (IPM), debe ser **extendido a Gestión Integrada de Cultivos y esta debe ser incluida en la meta de la Sanidad Vegetal** (Bremmer et al., 2021; Jeger et al., 2021) (cf., Capítulo C6.).

En consecuencia, la investigación para promover y mejorar la Sanidad Vegetal debe considerar la interfase entre sus disciplinas nucleares, así como la interfase existente entre ellas y las disciplinas agrícolas y medioambientales, de manera que es un reto para la Sanidad Vegetal que **los abordajes multidisciplinares a nivel de sistema predominen sobre los simples e individuales**, a pesar de los cambios que puedan ser necesarios en los modelos al uso para la financiación de la investigación, así como en los tipos de incentivos y de sistemas de reconocimiento académico que puedan plantear (Jeger et al., 2021). Además, puesto que los resultados de dichos abordajes multidisciplinares han de ser aplicados por los agricultores, es un **reto adicional de la Sanidad Vegetal fortalecer los vínculos entre la investigación y la práctica**, a través de la formación especializada y completa de los técnicos que han de ser vehículo del conocimiento y las tecnologías que se desarrollen, y de sistemas ágiles de transferencia de ambos a los agricultores que resulta vital para la conversión de los sistemas experimentales en sistemas prácticos (Dehne y Schönbeck, 1994; Jeger et al., 2021).

A2.3. Situación actual de la Sanidad Vegetal en España

Las pérdidas de cosecha ocasionadas por enfermedades, plagas y malas hierbas en cultivos clave de la agricultura española (cf., Capítulo A1., Apartado A1.3.2.1.) y las emergencias y reemergencias de ellas que subyacen en su estancamiento (cf. Apartados A2.1.1. y A2.1.2.; Capítulo B1.), junto con las complejidades en el control de los problemas fitosanitarios asociados a nuevos marcos legislativos de la UE derivados del Nuevo Pacto Verde Europeo, han generado inquietud desde hace una década en el sector de la Sanidad Vegetal en España y motivado a la Asociación Española de Sanidad Vegetal (AESaVe) a promover acciones para disponer de una visión realista y crítica del panorama actual de la Sanidad Vegetal en España. Dichas acciones comprenden la elaboración de un Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España (Jiménez Díaz y López González, 2019a) y la celebración -conjuntamente con Phytoma- del “Encuentro Internacional Phytoma-España 2020. Año Internacional de la Sanidad Vegetal (AISV): ciencia y profesión para producir más con menos” (Córdoba, 1-2 de diciembre de 2021). El presente Apartado se basa en las Conclusiones alcanzadas en los referidos eventos, entre las cuales hemos realizado una selección *ad hoc* de aquellas que a nuestro parecer conciernen a aspectos más estratégicos (Albajes et al., 2022; Jiménez Díaz y López González, 2019b).

A2.3.1. La estructura actual del sistema español de la Sanidad Vegetal

Desde el punto de vista del sector público, la Sanidad Vegetal en España se asienta en la actividad de cuatro pilares estructurales fundamentales: (i) la Dirección General de Sanidad de la Producción Agraria del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA); (ii) los Servicios de Sanidad Vegetal de las Comunidades Autónomas (CC. AA.); (iii) las Universidades y Organismos Públicos de Investigación (OPIs), y (iv) las Sociedades Científicas y Profesionales, incluyendo la Sociedad Española de Fitopatología (SEF), la Sociedad Española de Entomología Aplicada (SEEA), la Sociedad Española de Malherbología (SEMh) y la Asociación Española de Sanidad Vegetal (AESaVe).

A2.3.1.1. La Dirección General de Sanidad de la Producción Agraria (DGSPA)

A este organismo concierne la legislación básica y coordinación de acciones en materia de Sanidad Vegetal en España, la representación oficial de esta ante la UE, y la trasposición de las normativas que esta última genera en dicha materia junto con el subsiguiente desarrollo de acciones para su aplicación. La DGSPA afronta como **reto actual la aplicación del nuevo marco legislativo de Sanidad Vegetal de la UE (Reglamento (UE) 2016/2031) (DOUE, 2016), que deroga la legislación anterior -entre otras la Directiva 2000/29/CE- y tiene como objetivo superar las dificultades planteadas en el anterior régimen fitosanitario de la UE.** Con este nuevo marco legislativo se pretende fortalecer y conferir transparencia y sostenibilidad a la nueva normativa con base científica, a fin de unificar la legislación fitosanitaria en los ámbitos de la agricultura, la silvicultura, el medioambiente y el paisaje, para su mejor y más ágil adaptación a los actuales y nuevos riesgos de introducción de agentes nocivos exóticos y el desarrollo de enfermedades, plagas, y malas hierbas emergentes. Para minimizar dichos riesgos de introducciones, también es cometido de la DGSPA realizar las acciones de inspección, erradicación y certificación de importaciones procedentes de países terceros, **que son desarrolladas por los inspectores del MAPA en los Puntos de Inspección Fitosanitaria (PIF).**

La aplicación del nuevo marco legislativo, y la intensificación de las acciones de inspección en los PIF en respuesta al incremento continuado de las introducciones de agentes nocivos exóticos, constituyen nuevos retos para la Sanidad Vegetal y la DGSPA para cuya superación sería aconsejable incrementar la disponibilidad de recursos financieros y humanos adecuadamente especializados. Asimismo, también sería necesaria una mayor interacción con el cuerpo científico-técnico especializado disponible en las Sociedades Científicas y Profesionales, de manera que esta tenga lugar en extensión superior a la

Llevada a cabo hasta ahora con ocasión de la aplicación de las normativas UE ya derogadas y propicie la colaboración de aquellas para la implementación de la nueva normativa.

A2.3.1.2. Los Servicios de Sanidad Vegetal de las CC. AA.

Estos Servicios son responsables de la aplicación efectiva de las acciones derivadas de la legislación sobre Sanidad Vegetal en cada territorio, y en particular de las medidas cuarentenarias, de erradicación y de contención concernientes a la introducción de agentes nocivos exóticos. Actualmente, y con demasiada frecuencia, dichas acciones han de ser llevadas a cabo con recursos limitados, sin la adecuada coordinación inter CC. AA., e incluso sin la necesaria colaboración de otros servicios de las mismas, o de expertos de otros organismos, lo que dificulta la realización de las acciones en los momentos óptimos o con las técnicas más precisas. La realidad de una Sanidad Vegetal en España totalmente descentralizada exige de un esfuerzo considerable de transparencia, información, formación, coordinación y lealtad entre las CC. AA., y de estas con el MAPA y viceversa. Todo ello con la finalidad del mejor control y manejo de los problemas fitosanitarios endémicos y fiable prevención de la introducción de agentes nocivos exóticos que pudieran afectar a ecosistemas agroforestales, y cuya susceptibilidad a los mismos es independiente de fronteras geográficas y políticas. Además, no es menos importante que, en el cumplimiento de dicho cometido, las acciones de dichos Servicios deban ser exclusivamente técnicas, y basadas en criterios científicos y no en consideraciones políticas o partidistas, propiciatorias de decisiones electoralmente rentables solo a corto plazo.

Hasta recientemente, también era responsabilidad de los Servicios de Sanidad Vegetal de las CC. AA. la certificación sanitaria del material vegetal de siembra o plantación, que es la medida de control clave para mitigar el riesgo de diseminación de agentes nocivos y su introducción en países, regiones o fincas libres de ellos. Sin embargo, el Reglamento (UE) 2016/2031 traslada esta responsabilidad a los productores y comerciantes de material vegetal que, por sí solos deben llevar a cabo los procesos de certificación fitosanitaria y emisión del documento (pasaporte fitosanitario) con el que se autoriza el tránsito de dicho material hacia las zonas de producción. Puesto que la certificación efectiva del estado sanitario de dicho material requiere de protocolos de inspección y análisis diagnósticos específicos en reservorios y campos de material base, con el concurso de personal técnico especializado y equipamiento analítico adecuado, la carencia de ambos en sectores viveristas de cultivos estratégicos -como los de forestales frutales, olivo, vid, etc.- puede derivar en la cualificación sanitaria de categoría CAC (*Conformitas Agraria Communitatis*) en lugar de la verdadera certificación. Esta categoría es el mínimo requisito de calidad comercial de material vegetal propagado, basado en la sola evaluación visual de las características morfológicas y ausencia de sintomatología en él, y la utilización de pasaporte fitosanitario vinculada a él ya ha dado lugar a la introducción de agentes nocivos no deseados. Por ello, la aplicación del Reglamento (UE) 2016/2031 en materia de certificación fitosanitaria debería contar con la verificación y contraste analítico suplementario de la actividad propagativa, realizada por parte de los Laboratorios oficiales de Diagnóstico de los Servicios de Sanidad Vegetal.

Durante las últimas décadas se ha producido una reducción considerable de los recursos humanos, económicos y materiales de los Servicios de Sanidad Vegetal de las CC. AA. Esta reducción ha minado la capacidad operativa y la actividad de dichos Servicios, en contradicción con su naturaleza estratégica por el incremento de los problemas fitosanitarios y los riesgos potenciales de otros, junto con las responsabilidades de acción sobre aquellos antes mencionadas. Por ello, la capacidad de actuación y los recursos humanos y materiales de los Servicios de Sanidad Vegetal deben ser potenciados y homogeneizados tanto a nivel del MAPA como autonómico. Además, en la provisión de nuevos recursos humanos, debe ser tenido en cuenta que los actuales procedimientos para la selección del personal técnico e insuficiente formación universitaria en Sanidad Vegetal, no garantizan en general el nivel de especialización profesional requerido para las actuaciones propias de dichos Servicios. Estas limitaciones deberían ser

contrarrestadas mediante un plan sistematizado de formación continua especializada en materia de Sanidad Vegetal dirigido a dicho personal, que podría ser común a todas las CC. AA. y coordinado desde el MAPA con la colaboración de expertos de las Universidades y Centros de Investigación públicos.

Dada la asunción por la UE de varias de las competencias en Sanidad Vegetal antes asumidas por los Estados miembro, varias de las reflexiones hechas en los últimos apartados para el sistema español podrían ser ampliadas a nivel continental, máxime cuando una buena parte de la legislación europea en materias de agricultura, silvicultura y medio natural afectan de lleno a la Sanidad Vegetal.

A2.3.1.3. La Sanidad Vegetal en las Universidades y Organismos Públicos de Investigación (OPIs) en España

Las universidades españolas tienen la responsabilidad y oportunidad de la formación en materia de Sanidad Vegetal, y junto con los OPIs comparten las actividades de I+D para generar los nuevos conocimientos y tecnologías necesarios para hacer frente a los retos que se plantean a aquella (cf. Apartado A2.2.). Ambos aspectos se consideran separadamente a continuación.

A2.3.1.3.1. La formación universitaria en Sanidad Vegetal en España

Las complejidades inherentes a los ecosistemas agroforestales y a los problemas fitosanitarios actuales y potenciales, junto con: (i) el progreso constante de las ciencias y tecnologías que propician su análisis, conocimiento y gestión; (ii) el incremento en la incidencia de agentes nocivos endémicos y exóticos sobre los cultivos; y (iii) las crecientes demandas sociales relativas a la formas de su control, **determinan que los actores de la Sanidad Vegetal deban tener una sólida formación especializada en sus disciplinas nucleares** y conexas para hacer frente a los retos que se plantean en el presente siglo XXI. Sin embargo, un profuso estudio del contenido de la enseñanza universitaria en materias de Sanidad Vegetal puso de manifiesto, que **en franca contradicción con los argumentos antes esgrimidos**, las titulaciones agrarias y forestales de las universidades españolas han experimentado una **inexplicable reducción de la oferta docente en las disciplinas nucleares de la Sanidad Vegetal** que, junto con la diversidad de Grados impartidos, determinan que estos **no proporcionen en la actualidad una formación mínima en Sanidad Vegetal que sea común a todos los egresados** (Albajes et al., 2019). Esta erosión curricular en la formación universitaria y profesional se ha venido produciendo durante las dos últimas décadas, y ha sido **repetidamente denunciada y nunca cuestionada**, y revertirla mediante la especialización en Sanidad Vegetal es ineludible para superar los desafíos que afronta la Sanidad Vegetal en el siglo XXI.

La insuficiente formación especializada en Sanidad Vegetal en razón de la escasa oferta de créditos en los actuales currículos de Grado, **no es complementada: (i) por los posgrados reglados de Ingeniero Agrónomo e Ingeniero de Montes**, en razón de su naturaleza generalista y heterogeneidad entre Universidades; o (ii) **por el doctorado en razón de la excesiva generalidad en la estructura docente de los programas de doctorado** en la mayoría de las universidades españolas y **la falta de concienciación de la necesidad de mejorar la formación en Sanidad Vegetal de los doctorandos** en Ingeniería Agronómica y de Montes; y dicha insuficiencia solo es paliada parcialmente por los posgrados específicos en Sanidad Vegetal en razón del número limitado de ellos, así como de participantes.

La carencia de formación especializada universitaria –extensible a la no universitaria– en Sanidad Vegetal es una importante debilidad sistémica por su incidencia en la compleja cadena de valor de la producción, transformación y consumo de alimentos y otros bienes que procuran la agricultura y las masas forestales. A esta debilidad ha de sumarse la creciente sensibilización de la opinión pública por la salubridad y la seguridad de los alimentos y la protección medioambiental que, junto con la falta de formación en materia de Sanidad Vegetal y de la producción alimentaria en general, **hacen a la opinión pública vulnerable ante la información sesgada y/o imprecisa en dichas materias.**

La debilidad sistémica que determina la insuficiente formación especializada universitaria en Sanidad Vegetal, debería redundar en acciones concretas para crear una oferta concertada de formación continua que propiciara la especialización en Sanidad Vegetal a nivel nacional, así como promover el control de la calidad y rigor de los contenidos que se están ofertando en la actualidad, y el establecimiento de una relación entre la formación universitaria y la formación profesional reglada en materias de Sanidad Vegetal. No obstante, la responsabilidad, procedimientos, destinatarios y financiación de la formación especializada en Sanidad Vegetal adolecen de suficiente consenso en España, si bien la mayor parte de las debilidades en materia de formación especializada en aquella se pueden atribuir a un sistema universitario ineficiente en la enseñanza de las disciplinas nucleares de la Sanidad Vegetal. Dicha ineficiencia concierne tanto a los planes de estudio como a la organización docente, y su permanencia responde a la falta de presión y/o interés sobre el tema por parte de las administraciones públicas con competencias en agricultura y medio natural.

Los efectos de la debilidad que confiere la carencia de formación especializada en Sanidad Vegetal son acentuados por: (i) los cambios normativos en la UE; (ii) los recortes presupuestarios y la burocratización; (iii) el intrusismo profesional en el campo de la formación; y (iv) los factores que desincentivan la inversión para incorporar las innovaciones tecnológicas en las explotaciones agrarias. Sin embargo, el sistema español de Sanidad Vegetal dispone de importantes cualidades, incluyendo: (i) la excelente preparación en el sector de la formación e I+D; (ii) la creciente actividad de asesoría técnica en campo; y (iii) la notable potencia económica en el sector empresarial de insumos, incluyendo los productos fitosanitarios y más recientemente los relativos a productos y técnicas biológicas. Estas cualidades confieren fortaleza al sistema español de Sanidad Vegetal que puede contrarrestar los efectos de las debilidades y ser aprovechadas para mejorar la formación especializada en Sanidad Vegetal en España.

A las carencias y debilidades derivadas de la insuficiente formación universitaria especializada en Sanidad Vegetal, se suma la escasa percepción social de su naturaleza y cometido a nivel internacional, cuya ocurrencia generalizada animó a la Asamblea General de las Naciones Unidas a declarar el 2020 Año Internacional de la Sanidad Vegetal (cf., Capítulo A1., Apartado A1.2.). A esta escasa percepción social –y en cierta extensión también institucional- puede contribuir la falta de un cuerpo profesional especializado y único que trate de la sanidad de los cultivos y masas forestales –como ocurre en la Medicina Humana y la Medicina Veterinaria-, en lugar de que dicho tratamiento sea una proyección profesional de las ingenierías agronómica y de montes. Expertos en Sanidad Vegetal reconocidos internacionalmente (ej., Browning, 1998; Tjamos, 2016) vienen llamando la atención en que, dado el estado actual de complejidades e incidencia de enfermedades, plagas y malas hierbas sobre la seguridad y salubridad alimentaria, es necesario reconocer que la Sanidad Vegetal trasciende la limitada formación proporcionada por los currículos de dichas ingenierías, y ha lugar el establecimiento de una profesión en Medicina de los Vegetales basada en una titulación universitaria de grado en ella, que sirva a los cultivos de plantas y masas forestales como la Medicina Veterinaria sirve a la producción animal.

La creación de una nueva titulación de grado con la denominación de Medicina de los Vegetales -o la inclusión de una nueva especialidad con dicha denominación en el currículo de Ingeniería Agronómica o Forestal- no debería constituir dificultad mayor, teniendo en cuenta la profusión de titulaciones de grado en Ingenierías establecidas recientemente en las universidades españolas (Albajes et al., 2019). Además, la vertebración de los profesionales así titulados con los restantes componentes del sistema de la Sanidad Vegetal (ej., entidades certificadoras, laboratorios que operan en el diagnóstico y detección de agentes nocivos, asesores independientes de defensa vegetal o de protección integrada, industrias de los productos fitosanitarios, productos biológicos y de maquinaria de uso agro-forestal, empresas de servicios, editoriales especializadas, etc.), incrementaría la eficiencia en la protección del rendimiento de los cultivos y masas forestales, la salubridad del producto cosechado, y el sostenimiento del medioambiente y los recursos naturales empleados en la producción de alimentos o insumos.

A2.3.1.3.2. La I+D en Sanidad Vegetal en España

La actividad de I+D en Sanidad Vegetal ha estado centrada fundamentalmente en las Escuelas Técnicas Superiores de Ingeniería Agronómica y de Montes, junto con los Centros e Institutos del Área Científico-Técnica de Ciencias Agrarias del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), el Departamento de Protección Vegetal del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA-CSIC), y los Centros e Institutos de I+D de las CC. AA.

En España, la investigación científico-técnica en Sanidad Vegetal ha sido propiciada y financiada, desde hace décadas, por su integración en los programas de investigación del Área Agrícola y Forestal (área AGR-FOR) de los Planes Nacionales de I+D, y por el establecimiento de prioridades a través del programa de Recursos y Tecnologías Agroalimentarias RTA gestionado por el INIA. Estos programas han permitido **potenciar la coordinación entre las distintas CC. AA. con proyectos específicos para resolver de forma conjunta problemas fitosanitarios comunes, y en particular la Gestión Integrada de las enfermedades, plagas y malas hierbas más graves y extendidas en España, así como el control preventivo y/o integrado de los organismos nocivos de nueva introducción.** Sin embargo, tradicionalmente, **la financiación de la investigación científico-técnica en Sanidad Vegetal en España ha sido escasa y además se ha reducido significativamente en la última década, precisamente al tiempo que se han incrementado exponencialmente los problemas fitosanitarios.**

No obstante los numerosos proyectos científico-técnicos desarrollados sobre diversos aspectos de la Sanidad Vegetal española durante las últimas décadas, en España **continúan existiendo importantes problemas fitosanitarios de cultivos estratégicos que inciden gravemente sobre la estabilidad, productividad y rentabilidad de sectores agroforestales clave para la economía española, que son:** (i) de naturaleza compleja y etiología variada; (ii) endémicos, principalmente en cultivos leñosos; o (iii) resultado de introducciones de agentes nocivos exóticos que se establecieron con éxito por la dificultad de su control y/o la ineficiencia de las acciones de erradicación que, en su caso, se llevaron a cabo tras su detección.

Además, sobre la Sanidad Vegetal en España **gravitan amenazas y necesidades adicionales que constituyen desafíos importantes para la I+D en temas fitosanitarios, de los cuales son ejemplo:** (i) agentes nocivos exóticos ya existentes o que potencialmente pueden ser introducidos en nuestro país; (ii) influencia de las modificaciones ambientales asociadas al cambio climático sobre los agentes nocivos exóticos que constituyen amenazas, así como sobre la emergencia, reemergencia, desarrollo y gravedad de las enfermedades, plagas y malas hierbas; (iii) influencia de las modificaciones tecnológicas en los sistemas de producción agroforestal sobre la sanidad de cultivos estratégicos para la economía española; (iv) estrategias para mitigar los efectos de la reducción de productos fitosanitarios autorizados e incrementar su efectividad; (v) mejoras en el desarrollo de resistencias a los agentes nocivos, y en la eficiencia y consistencia de los agentes de control biológico; (vi) estrategias de combinación de dichas resistencias y agentes de control biológico con productos fitosanitarios autorizados y otras medidas de control para la GI de enfermedades, plagas y malas hierbas de cultivos estratégicos; (vii) escasez de proyectos de investigación sobre sanidad de cultivos en la agricultura ecológica (cf. Capítulo B4.) si bien buena parte de las innovaciones en Sanidad Vegetal propiciadas por la investigación son inmediatamente aplicables a la agricultura ecológica; y (viii) la implantación de nuevos cultivos y los cambios en la demanda de los mercados.

Un desafío adicional e importante para la I+D fitosanitaria en España concierne la naturaleza de la Sanidad Vegetal como macrodisciplina de aplicación, y por lo tanto es cometido y responsabilidad de aquella proveer a los agricultores con soluciones prácticas a los problemas fitosanitarios que comprometen su actividad. A tal efecto, la I+D en Sanidad Vegetal **requiere cambios estratégicos en la planificación y diseño de abordajes de la investigación, incluyendo, entre otros:** (i) la priorización de **proyectos ambiciosos, multi- y trans-disciplinares, centrados en torno a sistemas agrarios de particular interés y relaciones mul-**

titríficas existentes en ellos; (ii) realizar **proyectos con planteamientos integrados sobre el conjunto de organismos nocivos de un mismo cultivo** y las interacciones entre organismos nocivos y beneficiosos de los mismos a medio y largo plazo, así como sobre los posibles efectos sinérgicos o antagónicos entre los productos fitosanitarios y los agentes de control biológico utilizados en cada cultivo; (iii) **diversificar las medidas y métodos disponibles para la GI de enfermedades, plagas y malas hierbas**, incorporando las nuevas tecnologías a los sistemas de diagnóstico, seguimiento de poblaciones, toma de decisiones y acciones de control; y (iv) intensificar la **investigación anticipatoria** concerniente a la prevención de las nuevas amenazas asociadas a la introducción de agentes nocivos exóticos, cambio climático, e innovaciones tecnológicas en agricultura, árboles singulares y masas forestales.

El sistema de I+D en Sanidad Vegetal ha experimentado **una importante erosión en las plantillas de investigadores en las instituciones públicas y reducción de la financiación** durante la última década. De hecho, la escasez de que adolecen las plantillas orgánicas en la I+D de las disciplinas nucleares de la Sanidad Vegetal, y la crisis de estabilización de nuevo personal investigador -que en sí mismo no son problemas específicos de esta macrodisciplina en el sistema español- **constituyen unas de las debilidades más significativas de la Sanidad Vegetal en España**. Dichas erosión y reducción deben ser contrarrestadas con un **reforzamiento del sistema de I+D en Sanidad Vegetal** en términos de capital humano y recursos financieros, que debería ser motivo de esfuerzo a nivel institucional con independencia de las oscilaciones presupuestarias.

A2.3.1.3.3. La transferencia de conocimientos y tecnologías (TT) en Sanidad Vegetal en España

La **transferencia efectiva de los conocimientos y tecnologías** desarrollados por la I+D en Sanidad Vegetal -tanto en España como a nivel internacional- a los técnicos y agricultores es **clave para la GI eficiente de enfermedades, plagas y malas hierbas**. La TT agroforestal, incluida la relacionada específicamente con la Sanidad Vegetal, había tenido lugar a través del Servicio de Extensión Agraria (SEA) del MAPA hasta que se realizó su transferencia a las CC. AA. **Dicha transferencia ha llevado asociada en algunos casos una cierta erosión en las actividades de TT** -cuya naturaleza y extensión varían ampliamente entre CC. AA.- a la que se une, salvo excepciones, una **insuficiente coordinación entre los centros responsables de la I+D y los de TT agroforestal en la mayoría de las CC. AA.** -ya que en muchos casos pertenecen a distintas Consejerías o Direcciones Generales con diferentes prioridades-, así como entre los servicios responsables de dicha TT y los Departamentos universitarios y OPIs del gobierno central en los que se abordan temas fitosanitarios. De esta disminución en las actividades de TT agroforestal, y en particular de la falta de especialización en Sanidad Vegetal de los agentes de ella, se resienten la agricultura y silvicultura actuales.

La mencionada disminución de las actividades de TT en materia de Sanidad Vegetal ha sido **mitigada por la creación de otras figuras con una mayor especialización en Sanidad Vegetal que han sustituido parcialmente a los transferidos SEA**: son las asociaciones de agricultores, o cooperativas, que cuentan con un técnico de asesoramiento en aquella materia y que reciben diferentes nombres según la Comunidad Autónoma: ej., las Asociaciones de Defensa Vegetal (ADV) o las Agrupaciones para Tratamientos Integrados en Agricultura (ATRIAS). La financiación de ADVs y ATRIAS corre a cargo de los agricultores o de sus agrupaciones, aunque en varias CC. AA. reciben subvenciones de la administración pública dirigidas al cumplimiento de programas específicos de mejora de la Sanidad Vegetal, o para cumplir con las especificaciones de etiquetas de calidad como las de Producción Integrada o Agricultura Ecológica. **La formación exigible en Sanidad Vegetal de los técnicos de esas asociaciones o agrupaciones está legislada por el MAPA y ha sido denunciada repetidamente por AESaVe como claramente insuficiente.**

No obstante las iniciativas expuestas arriba, las actividades de transferencia en materia de Sanidad Vegetal son aún insuficientes para optimizar la protección de muchos cultivos y masas forestales y ello

constituye una debilidad importante en el sistema español de la Sanidad Vegetal. El sector de la TT de la Sanidad Vegetal es clave, junto con la I+D, para la superación de los desafíos que afronta la Sanidad Vegetal en España en el siglo XXI y, como aquella, debe ser potenciado mediante acciones de carácter institucional. A pesar de las iniciativas anteriormente expuestas, la TT en materia de Sanidad Vegetal es claramente insuficiente si las universidades y los OPIs no se implican en ella en mayor medida de lo que lo hacen. En ese campo, la TT en Sanidad Vegetal se limita a menudo a la publicación de artículos de divulgación y libros técnicos, la edición de boletines de avisos fitosanitarios o la organización de jornadas específicas para esa finalidad. No cabe duda que todas esas actividades son positivas, aunque no suficientes, aun contando con las espectaculares mejoras de los sistemas informáticos de divulgación de los que hoy disfrutamos. Ayudaría a mejorar la TT en Sanidad Vegetal una mayor valoración de esa actividad en los currículos de los investigadores, que complementara los resultados científicos de la I+D al menos en parte de las plantillas de las universidades y OPIs, tal como se lleva a cabo en la mayoría de las universidades y centros de investigación norteamericanos. Además, esa faceta de la actividad de I+D también se debería reflejar en la elección de los objetivos de los proyectos de I+D financiados por las instituciones públicas.

A2.3.1.4. Las Sociedades Científicas y Profesionales en Sanidad Vegetal

Las Sociedades Científicas y Profesionales comprometidas con la Sanidad Vegetal y sus disciplinas nucleares en España (AESaVe, SEEA, SEF y SEMh) son depositarias del mejor conocimiento sobre ciencia y tecnología en dichas materias disponible en nuestro país. Sin embargo, la visibilidad social de dichas Sociedades y su participación a nivel institucional en los temas estratégicos que conciernen a la Sanidad Vegetal es aún insuficiente, cuando no nula. Y esta carencia no parece ser contrarrestada suficientemente, salvo excepciones, por los Colegios Profesionales en los que se integran los profesionales de las Ingenierías Agronómica y Forestal, y de la Biología, que desarrollan actividades relacionadas con la Sanidad Vegetal.

La insuficiente visibilidad social, y la desestimación del potencial de conocimientos de que son depositarias las Sociedades Científicas y Profesionales españolas de la Sanidad Vegetal, así como la falta de coordinación entre las mismas y su incapacidad práctica para transmitir en la última década una versión holística de la gestión de la Sanidad Vegetal de los distintos cultivos y no solo de organismos nocivos aislados, han determinado una escasa participación en el establecimiento y desarrollo de normativas que inciden sobre la práctica de la Sanidad Vegetal, o de la formación universitaria de los profesionales que han de llevarla a cabo. Con ello se ha desaprovechado la oportunidad de que el cuerpo científico-profesional de dichas sociedades proporcionara a las administraciones públicas, tanto a la central como a las autonómicas, argumentos con base científica de utilidad para la articulación, negociación o puesta en marcha de las normativas, a través de foros de reflexión y análisis, objetivos, independientes, y basados en el conocimiento.

A2.4. Bibliografía

- Albajes, R., Recasens Guinjuan, J., y Jiménez Díaz, R.M. 2019. Formación universitaria y no universitaria en Sanidad Vegetal. Págs. 103-138, en: R. M. Jiménez Díaz y M.M. López González, eds. Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España. UCOPress. Editorial Universidad de Córdoba. Córdoba.
- Albajes, R., Pons, X., Cantero-Martínez, C., Achón, M.A., López, C., y Eizaguirre, M. 2022. Intensificación de las rotaciones de cereales en la Cuenca del Ebro: efectos en la incidencia de plagas y virosis. *Phytoma España* 335: 36-42.
- Almeida, R.P.P., Winston, C., Hill, B.L., Hashim, J., y Pierce, A.H. 2005. Vector transmission of *Xylella fastidiosa* to dormant grapes. *Plant Dis.* 89: 419-424.
- Anderson, P.K., Cunningham, A.A., Patel, N.G., Morales, F.J., Epstein, P.R., y Daszak, P. 2004. Emerging infectious diseases of plants: pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends Ecol. Evol.* 19: 535-544.
- Baker, R.E., Mahmud, A.S., Miller, I.F., Rajeev, M., Rasambainarivo, F., Rice, B.L., Takahashi, S., Tatem, A.J., Wagner, C.E., et al. 2021. Infectious disease in an era of global change. *Nature Rev. Microbiol.* www.nature.com/nrmicro.
- Bautista-Jalón, L.S., Frenkel, O., Tsrer (Lahkim), L., Malcolm, G.M., Gugino, B.K., Lebiush, S., Hazanovsky, M., Milgroom, M.G., y Jiménez-Gasco, M.M. 2021. Genetic differentiation of *Verticillium dahliae* populations recovered from symptomatic and asymptomatic hosts. *Phytopathology* 111: 149-159. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-20-0230-FI>.
- Bianchi, F.J.J.A., Booij, C.J.H., y Tscharrntke, T. 2006. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: A review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proc Biol Sci* 273: 1715-1727.
- Bové, J.M. 2014. Huanglongbing or yellow shoot, a disease of Gondwanan origin: Will it destroy citrus worldwide? *Phytoparasitica* 42: 579-583. doi. 10.1007/s12600-014-0415-4.
- Bremmer, J., Riemens, M., y Reinders, M. 2021. The future of crop protection in Europe. Scientific Foresight Unit (STOA). European Parliamentary Research Service.
- Browning, J.A. 1998. One phytopathologist's growth through IPM to holistic plant health. *Annu. Rev. Phytopathol.* 36: 1-24.
- Burdon, J.J., y Zhan, J. 2020. Climate change and disease in plant communities. *PLoS Biol.* 8: e3000949.
- Butler, D. 2013. Fungus threatens top banana. *Nature* 504: 195-196.
- Callaway, E. 2016. Devastating wheat fungus appears in Asia for first time. *Nature* 532: 421-422.
- Chakraborty, S., y Newton, A.C. 2011. Climate change, plant diseases and food security: an overview. *Plant Pathol.* 60: 2-14.
- Dehne, H.W., y Schönbeck, F. 1994. Crop protection-past and present. Págs. 45-75, en: E.C. Oerke, H.W. Dehne, F. Schönbeck, y A. Weber, eds. *Crop Production and Crop Protection*. Elsevier.
- DOUE. 2016. Reglamento (UE) 2016/2031 del Parlamento y del Consejo del 26 de Octubre relativo a las medidas de protección contra plagas vegetales. Diario Oficial de la Unión Europea núm. L317/4, de 23 de noviembre de 2016.
- Fisher, M.C., Henk, D.A., Briggs, C.J., Brownstein; J.S., Madoff, L.C., McCraw, S.L., y Gurr, S.J. 2012. Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health. *Nature* 484: 186-194.
- Fry, W.E., y Goodwin, S.B. 1997. Re-emergence of potato and tomato late blight in the United States. *Plant Dis.* 81: 1349-1357.
- Giraud, T., Gladieux, P, y Gravilets, S. 2010. Linking the emergence of fungal plant diseases with ecological speciation. *Trends Ecol. Evol.* 25:387-395.
- Halbert, S.E., Genc, H., Cevik, B., Brown, L.G., Rosales, I.M., Manjunath, K.L., Pomerinke, M., Davison, D.A., Lee, R.F., y Niblett, C.L. 2004. Distribution and characterization of *Citrus tristeza virus* in south Florida following establishment of *Toxoptera citricida*. *Plant Dis.* 88: 935-941.
- Hanssen, I.M., Lapidot, M., y Thomma, B.P.H.J. 2010. Emerging viral diseases of tomato crops. *Mol. Plant-Microb. Interac.* 23: 539-548.
- Jeger, M., Beresford, R., Bock, C., Brown, N., Fox, A., Newton, A., Vicent, A., Xu, X., y Yuen, J., 2021. Global challenges facing plant pathology: multidisciplinary approaches to meet the food security and environmental challenges in the mid-twenty-first century. *CABI Agric. Biosci.* 2: 20.
- Jiménez-Díaz, R.M., Cirulli, M., Bubici, G., Jiménez-Gasco, L.M., Antoniou, P.P., y Tjamos, E.C., 2012. Verticillium wilt, a major threat to olive production: Current status and future prospects for its management. *Plant Dis.* 96: 304-329.
- Jiménez-Díaz, R.M., y López González, M.M. (Eds.). 2019a. Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España. UCOPress. Editorial Universidad de Córdoba. Córdoba.
- Jiménez-Díaz, R.M., y López González, M.M. 2019b. Conclusiones generales y propuestas de acción. Págs. 677-692, en: R. M. Jiménez Díaz y M.M. López González, eds. Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España: UCOPress. Editorial Universidad de Córdoba. Córdoba.
- Linde, C.C., Smith, L.M., y Peakall, R. 2016. Weedy hosts, as ancillary hosts, pose disproportionate risk for virulent pathogen transfer to crops. *BMC Evol. Biol.* 16: 101. doi. [org/10.1186/s12862-016-0680-6](https://doi.org/10.1186/s12862-016-0680-6).
- Malka, O. Santos-García, D., Feldmesser, E., Sharon, E., Krause-Sakate, R., Delatte, H., van Brunschot, S., Patel, M.,

- Visendi, P., Mugerwa, H., Seal, S., Colvin, J., y Morinet, S. 2018. Species-complex diversification and host-plant associations in *Bemisia tabaci*: A plant-defence, detoxification perspective revealed by RNA-Seq analyses. *Mol. Ecol.* 27: 4241-4256.
- McDonald, B.A., y Stukenbrock, E.H. 2016. Rapid emergence of pathogens in agro-ecosystems: global threats to agricultural sustainability and food security. *Phil. Trans. R. Soc. B* 371: 20160026. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2016.0026>.
- McMullen, M.P., Jones, R., y Gallenberg, D. 1997. Scab of wheat and barley: A re-emerging disease of devastating impact. *Plant Dis.* 81: 1340-1348.
- Nonell, J. 1915. Conferencia sobre las enfermedades de los alcornocales por el ingeniero agrónomo D. Jaime Nonell. *Boletín de la Cámara Oficial del Sindicato Agrícola*, Año VIII, número extraordinario. Arenys de Mar (Barcelona).
- Quesada-Moraga, E. 2011. Plagas de insectos y cambio climático. *Phytoma España* 232: 21-31.
- Rocha-Pena, M.R., Lee, R.F., Lastra, R., Niblett, C.L., Ochoa-Corona, F.M., Garnsey, S.M., y Yokomi, R.K. 1995. *Citrus tristeza virus* and its aphid vector *Toxoptera citricida*: Threats to citrus production in the Caribbean, and Central and North America. *Plant Dis.* 79: 437-445.
- Singh, R.P., Hodson, D.P., Huerta-Espino, J., Jin, Y., Bhavani, S., Njau, P., Herrera-Foessel, S., Singh, P.K., Singh, S., y Govindan, V. 2011. The emergence of UG99 races of the stem rust fungus is a threat to world wheat production. *Annu. Rev. Phytopathol.* 49: 465-481.
- Subbarao, K.V., Sundin, G.W., y Klosterman, S.J. 2015. Focus issues articles on emerging and re-emerging plant diseases. *Phytopathology* 105: 852-854.
- Tjamos, E.C. 2016. The introduction of Phytiatry (Plant medicine) in Universities as a distinct science, is a primary necessity for food security and modernization of global agriculture. Págs. 305-321, en: P. Chowdappa, P. Sharma, D. Singh, y A.K. Misra, eds. *Perspectives of Plant Pathology in the Genomic Era*. Today & Tomorrow's Printers and Publishers. Nueva Delhi.
- Ullstrup, A. 1972. The impacts of the southern corn leaf blight epidemics of 1970-1971. *Annu. Rev. Phytopathol.* 10: 37-50.
- Zadoks, J.C. 1992. Crop protection: why and how. Págs. 48-60, en: Ciba Foundation, ed. *Crop Protection and Sustainable Agriculture*. Ciba Symposium 177. Wiley. Chichester.

An aerial photograph of agricultural fields, showing a grid-like pattern of crops and roads. A large, bold, black letter 'B' is superimposed on the right side of the image.

B

RETOS PARA LA SANIDAD VEGETAL EN LA PRÓXIMA DÉCADA

B. Retos para la Sanidad Vegetal en la próxima década

B.1. Capítulo B1. Organismos nocivos exóticos y Bioseguridad Vegetal

B1.1. Problemas causados por los organismos nocivos exóticos

Una buena parte de los actuales artrópodos fitófagos, agentes fitopatógenos y malas hierbas de los ecosistemas agrícolas, forestales y naturales actuales **no son autóctonos de las zonas afectadas, sino organismos exóticos** (o alóctonos) que han sido introducidos de forma accidental, intencionada o natural desde otras áreas geográficas, más o menos alejadas, a través de muy diversas vías. Como consecuencia, buena parte de estos organismos exóticos están causando nuevos problemas fitosanitarios, algunos de ellos con serias repercusiones económicas y ambientales, en particular en la biodiversidad. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estima que hasta el 40 % de la producción mundial de cultivos se pierde anualmente a causa de las plagas (*sensu lato, s. l.*). Según recientes estimaciones de la FAO, cada año las enfermedades de las plantas le cuestan a la economía global más de 220 mil millones de dólares USA y los artrópodos fitófagos al menos 70 mil millones (FAO, 2021). Es de suponer, por otra parte, que **esos costes van a ir en aumento dado el imparable y creciente comercio global de alimentos y de otros productos agrícolas y forestales**, así como el incremento de los desplazamientos de pasajeros y las migraciones humanas. Además, dichas pérdidas son particularmente graves en lugares deprimidos de continentes donde se dispone de menor capacidad tecnológica para mitigar sus consecuencias. Aun siendo elevadas las cantidades antes mencionadas, las consecuencias económicas y sociales de las restricciones del comercio de alimentos y productos forestales asociados a las medidas regulatorias son todavía más graves en aquellos sectores de la agricultura y la silvicultura cuyos márgenes de beneficio son de por sí muy bajos.

Las consecuencias reales de las introducciones de organismos exóticos son todavía más difíciles de calcular si incluimos también su impacto en ecosistemas naturales o seminaturales. Una cantidad relevante de especies en dichos ecosistemas se ha visto afectada muy negativamente, dando lugar a su desaparición o a una presencia insignificante, de modo que los propios ecosistemas y sus funciones se han visto alterados radicalmente (Vilà et al., 2010). Por todo ello, la FAO ha considerado el problema causado por los organismos nocivos exóticos en la alimentación y medio natural de la suficiente importancia como para **editar textos para la educación y toma de conciencia de los niños y jóvenes de todo el mundo** (FAO, 2020).

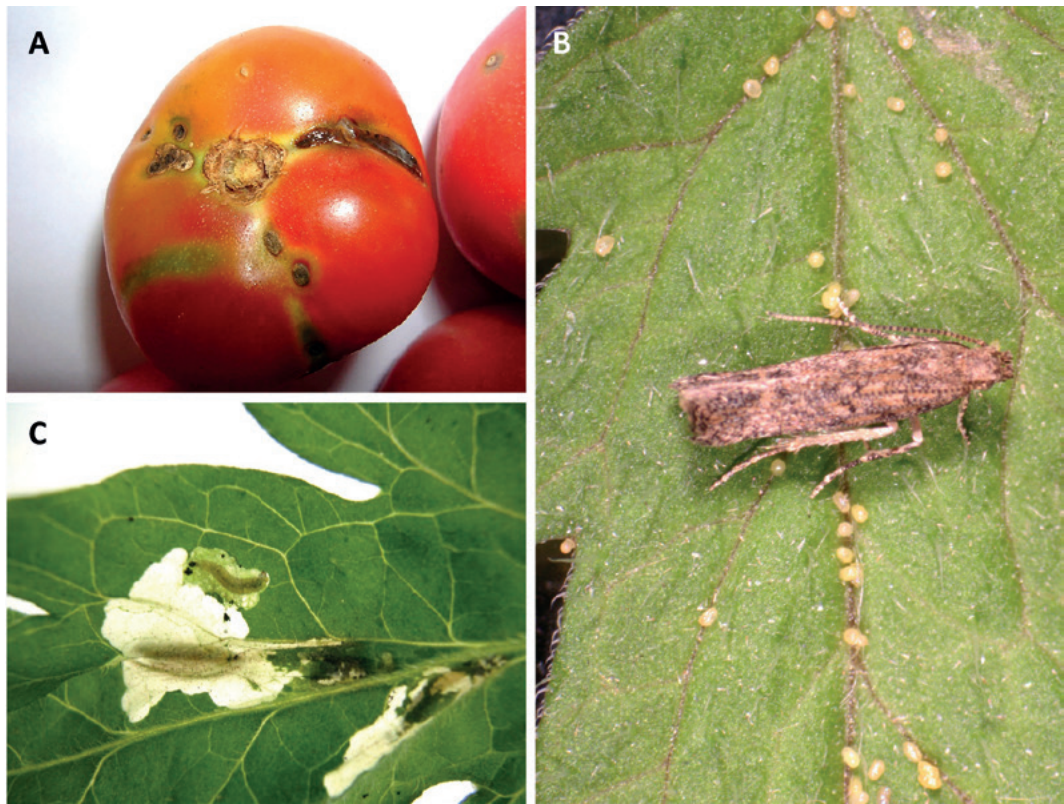
Las importaciones antes mencionadas han tenido lugar en la Unión Europea (UE), sin que las inspecciones del material vegetal en el país europeo de entrada o primer destino hayan sido suficientemente rigurosas, porque por encima de los riesgos de introducir nuevos organismos nocivos han primado los beneficios obtenidos con el rápido comercio de productos para alimentación, o de material vegetal para viveros o plantaciones. Una vez en la UE, el material vegetal introducido puede pasar por múltiples manos antes de llegar al destino definitivo y de que los nuevos organismos

nocivos se encuentren con especies vegetales susceptibles y condiciones ambientales favorables para su supervivencia y desarrollo. Ese mismo material vegetal carente de síntomas, pero potencialmente infectado con patógenos o contaminado con artrópodos fitófagos o semillas de malas hierbas, ha podido llegar a España provisto de un pasaporte fitosanitario que se ha expedido en otro país de la UE, sin un análisis fiable, o directamente, tras la sola inspección visual. Todo esto lleva sucediendo desde hace décadas en aras de la rapidez del transporte de un material perecedero y de la urgencia de su comercialización. A este respecto, es obligado tener en cuenta que **ni los certificados fitosanitarios de países terceros, ni el pasaporte fitosanitario de la UE pueden garantizar, *per se*, la sanidad del material vegetal, porque en la mayoría de los casos estos documentos se extienden únicamente de acuerdo con observaciones visuales.**

La mayoría de los patógenos desarrollan durante su ciclo vital **infecciones latentes o fases asintomáticas** que son de naturaleza epifita -en la que se encuentran sobre la superficie de los órganos de la planta-, o endófitas -en la que viven en el interior de los mismos, en los espacios intercelulares o tejidos vasculares-, sin que se observen síntomas. De forma similar, algunos artrópodos fitófagos también escapan a las inspecciones visuales en determinadas fases de su ciclo vital. Por ello, al ser transportadas a otras áreas, las plantas, semillas o madera de todo tipo, incluidos los embalajes de ese material que los albergan, pueden contribuir a la introducción de nuevos organismos de riesgo, no presentes en ellas anteriormente. Las continuadas importaciones de todo tipo de nuevo material vegetal -que en algunos casos contienen organismos nocivos de alto riesgo para los cultivos europeos- desde sus países de origen, generalmente de otros continentes, hasta mercados, viveros, plantaciones, etc. de la UE, constituyen un grave problema. Un metaanálisis global de las emergencias de enfermedades ocurridas durante el periodo 1996-2002, y estudios subsiguientes que incluyeron a estas junto con plagas y malas hierbas, concluyeron que **el elemento conductor fundamental de dichas emergencias es la introducción de agentes nocivos exóticos**, o de estirpes más virulentas de las ya conocidas, en las zonas de producción agroforestal (Anderson et al., 2004; IUFRO Montesclaros Declaration 2011, <http://www.iufro.org/>; Kamoun et al., 2019; Recasens et al., 2020; Spence et al., 2020). De hecho, el **incremento de tales introducciones durante las dos últimas décadas** y las devastadoras consecuencias que han traído consigo, han generado honda preocupación en todos los sectores relacionados con la Sanidad Vegetal y la producción agroforestal (Fisher et al., 2012; Kamoun et al., 2019; McDonald y Stukenbrock, 2016); y la conclusión más generalizada es que dicho incremento está **estrechamente relacionado con la intensificación del comercio internacional de plantas y productos vegetales** (Iannone et al., 2021).

A título de ejemplo, podemos decir que las importaciones de flor cortada, plantas, coníferas y bulbos en la UE procedentes de países africanos, de América Central y del este de Asia, variaron entre 414.000 y 414.580 t durante el decenio 2004-2014. Solo en el quinquenio 2010-2014, se importaron varias decenas de miles de plantas en maceta de muy distintas especies, procedentes de países terceros debido a su bajo coste, pero sin las necesarias garantías fitosanitarias. Sirva también de ejemplo el caso de Costa Rica, desde donde se importaron más de 124.000 t de diversas especies de plantas en dicho periodo y las cantidades inferiores, pero también de varios miles de toneladas, importadas de China, Guatemala, Honduras, Kenia, Sri Lanka, Taiwan, El Salvador y otros países. Solo en España se importaron 35.000 t de plantas vivas de países de la UE y extra-UE en el año 2015. Estos datos podrían explicar que desde 2010 **se hayan descrito en nuestro país 228 especies no registradas previamente de agentes fitopatógenos exóticos** -incluyendo 175 hongos y oomicetos, 16 bacterias, 31 virus y viroides y seis nematodos fitoparásitos, según la información amablemente proporcionada por especialistas de la Sociedad Española de Fitopatología en 2022.

Foto 1. La polilla del tomate y otras solanáceas, *Tuta absoluta*, introducida en España a principios del siglo XXI, ejemplo de plaga exótica que interfirió los programas bien establecidos de gestión integrada en cultivos de invernadero. **A.** Daños en fruto de tomate; **B.** Adulto del insecto; **C.** Orugas en hoja de tomate.



Muchos de los organismos nocivos inciden gravemente sobre la producción de cultivos leñosos ya establecidos -como cítricos, frutales de pepita y hueso, y vid-, plantas hortícolas -p. ej., el tomate, con numerosas plagas introducidas como es el caso de *Tuta absoluta* (Foto 1), lepidóptero originario de Sudamérica-, y también plantas ornamentales y de flor cortada, o cultivos que se encuentran en expansión -como caqui, kiwi y mango- así como de varias especies forestales de *Pinus*.

Todas estas introducciones se unen a una amplia lista de agentes nocivos exóticos que constituyen amenazas potenciales para sectores estratégicos de la agricultura española, que no se han detectado todavía y que se describen en el Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España (López et al., 2019).

El aumento en las últimas tres décadas de la introducción de agentes nocivos exóticos en la agricultura, silvicultura y ecosistemas naturales y seminaturales de todo el mundo, y en particular de la UE, se puede explicar por un conjunto de causas, entre las cuales cabe resaltar: (i) el incremento del comercio mundial de alimentos y de material vegetal importado; (ii) la frecuentemente nula formación e información, y por tanto de conocimientos, tanto a nivel público como privado, sobre los artrópodos fitófagos, los agentes fitopatógenos, y malas hierbas o plantas invasoras introducidos, y los riesgos de las importaciones de material vegetal; (iii) el interés económico de la rápida introducción ilegal de nuevos cultivares, especialmente de plantas leñosas, sin pasar por los controles fitosanitarios obligatorios; (iv) la carencia de controles fitosanitarios analíticos de las importaciones que proceden de países con organismos nocivos no presentes en la UE, mediante métodos rápidos y sensibles aplicables directamente en frontera tras las inspecciones y muestreos estadísticamente representativos que son de obligado cumplimiento; (v) la incidencia creciente del cambio climático, que modifica el área de distribución y el hábitat de muchos agentes nocivos y promueve sucesos climáticos que aumentan la probabilidad de grandes migraciones de ellos y de sus huéspedes; (vi) la intensificación de la agricultura y silvicultura con un alto grado de

homogeneización de cultivares y paisajes; y (vii) la utilización de nuevos cultivos o cultivares, o la plantación de nuevas especies forestales importadas, que no es un factor nuevo si consideramos que los cultivos principales en el mundo son exóticos en las zonas de mayor producción. No obstante, los nuevos usos de la agricultura, tales como el secuestro de CO₂ o la producción de biocombustibles, pueden acentuar la tendencia en el uso de nuevos cultivos, tanto en suelo agrícola como no agrícola. A las causas citadas ha de sumarse el incremento del turismo internacional y la escasa o nula información de los pasajeros sobre los riesgos de la introducción de organismos nocivos -unido a la falta de inspección de las posibles introducciones mediante sus equipajes-, cuyo papel en la introducción de agentes exóticos en plantas o productos vegetales ha sido resaltado recientemente (Pace et al., 2022).

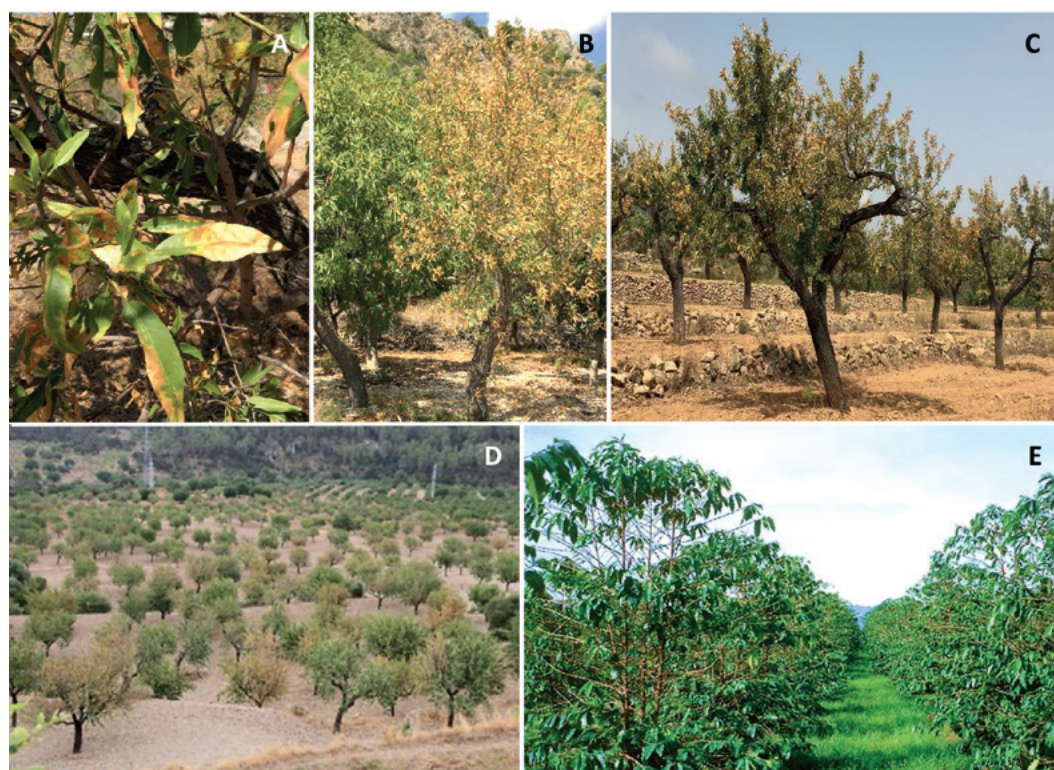
La cantidad de especies de artrópodos fitófagos, agentes fitopatógenos y malas hierbas que se establecen en nuevos hábitats y regiones es muy relevante tanto por su magnitud como por su imprevisibilidad. A veces, estos agentes nocivos experimentan un crecimiento poblacional mucho mayor que en sus regiones de origen, causando pérdidas más graves por la ausencia de enemigos naturales y antagonistas en los nuevos hábitats, condiciones climáticas y de cultivo más favorables para su establecimiento y propagación, y/o elevada susceptibilidad de las especies y cultivares locales. En muchos casos de nuevas introducciones de organismos nocivos, a menudo al principio se ignora la etiología de los síntomas observados e incluso el nombre de los nuevos organismos, y tanto las características de ellos como la epidemiología de las enfermedades o la dinámica poblacional de las plagas que causan, como las estrategias para la gestión integrada de ellas que permitan disminuir su incidencia, suelen ser desconocidas para el agricultor o silvicultor local.

Un ejemplo reciente de este tipo de casos es el de la gravedad de los problemas causados por la cepa ST53 de la bacteria *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca*, que fue introducida en los olivares de Apulia (sur de Italia) con plantas ornamentales importadas de Costa Rica sin control fitosanitario (porque no lo exigía entonces la legislación de la UE) en fecha no bien determinada. Pero dicho patógeno no fue identificado en esa zona de Italia hasta 2013, cuando ya había varios miles de ha de olivar afectadas por unos síntomas hasta entonces desconocidos en la zona y en Europa, que se denominaron síndrome del desecamiento rápido del olivo. Esta bacteria era muy conocida y había sido muy estudiada en el continente americano, donde infecta a muchas especies vegetales, pero muy poco al olivo. Por tratarse de un huésped no previamente investigado y de una bacteria no identificada hasta entonces en Europa, el diagnóstico de los síntomas no fue inmediato y ello favoreció que la cepa se diseminara con rapidez favorecida por sus insectos vectores. En definitiva, una cepa muy virulenta en olivo de *X. fastidiosa* subsp. *pauca* encontró en Apulia unas condiciones medioambientales y de cultivo extremadamente favorables, poblaciones abundantes de un vector como *Philaenus spumarius* -también poco estudiado en el continente americano- que es extremadamente eficiente en la transmisión de la bacteria y el monocultivo extenso de cultivares de olivo muy susceptibles, entre otros factores muy propicios (Saponari et al., 2019). Se dieron pues todas las condiciones para la tormenta perfecta, y a pesar de que desde entonces se han ensayado muchas posibles soluciones, estas no han tenido éxito y la zona sur de Apulia ha contabilizado desde 2013 más de 22 millones de olivos afectados por el síndrome del desecamiento rápido, en una extensión cercana a las 54.000 ha. Ello está causando una tragedia fitopatológica que ha trascendido a todos los investigadores en Sanidad Vegetal, a los políticos y al público europeo e incluso internacional, por lo que representa la súbita aparición de una enfermedad de muy difícil control que está implicando la pérdida irremediable de olivares que suponen un patrimonio nacional no solo económico, sino también cultural, histórico y paisajístico y que ha afectado de forma dramática a la economía de la región (cf., Foto 2D, Capítulo A1., Apartado A1.3.1.1.4.) (Landa et al., 2017; Saponari et al., 2019).

La situación en los olivares italianos motivó la rápida activación de todas las alarmas en la UE, y se puso en marcha en un tiempo récord una nueva legislación que propició, entre otras acciones, que se estableciera la obligatoriedad de: (i) realizar inspecciones de las importaciones; (ii) la prohibición de importar ciertas plantas de algunos países terceros; y (iii) realizar prospecciones de *X. fastidiosa* en los Estados miembros, que dieron lugar a detecciones de la bacteria en Alemania, Francia y Portugal en distintas fechas, y más recientemente también en otro país mediterráneo como Israel.

En 2016 se notificó la primera detección de *X. fastidiosa* en España, en las Islas Baleares, que en 2022 ya albergaban cuatro tipos de cepas genéticamente distintas infectando a 28 especies de plantas, entre ellas al 81 % de los almendros de las Islas, que fueron declaradas "zona infectada" con un protocolo de contención para evitar la diseminación de dicha bacteria. Sorprendentemente, las últimas investigaciones sugieren que *X. fastidiosa* llegó a las Baleares en los años 1990, posiblemente en plantas de cultivares de almendro importadas desde California, aunque dicha bacteria no se detectara hasta 2016.

Foto 2. Problemas causados por los organismos exóticos nocivos. A-D. Almendros afectados por la quemadura foliar causada por la bacteria *Xylella fastidiosa* en Alicante; **A.** Síntomas foliares; **B.** Almendro sano (izda.) y con síntomas de muerte dorada (dcha.); **C.** Grupo de almendros afectados en una plantación; **D.** Vista general de una plantación gravemente afectada (Cortesía de J. A. Navas); **E.** Cafetal defoliado por la roya causada por el hongo *Hemileia vastatrix* (Cortesía de H.D. Thurston).



Al año siguiente, se identificaron miles de casos en la Comunidad Valenciana -sobre todo en plantaciones de almendro tradicional de secano en Alicante, donde la bacteria llevaba también varios años instalada en dicha especie, aunque se desconoce la fecha y también la causa de su introducción en la zona (Foto 2A-D). En 2022 ya se había identificado *X. fastidiosa* en más de 20 especies de cultivo y forestales en esta Comunidad Autónoma y se había delimitado un área demarcada que incluía más de 130 municipios de la provincia de Alicante y tres de la de Valencia (<https://agroambient.gva.es/documents/163214705/163847802/Zona+Demarcada+por+Xylella+fastidiosa+en+la+Comunitat+Valenciana+2022-03-24.pdf/3a361a3d-169b-a669-8ba7-72fefe035661?t=1648207196137>). En las prospecciones se identificaron varios vectores y se constató que la bacteria se había continuado extendiendo desde 2017.

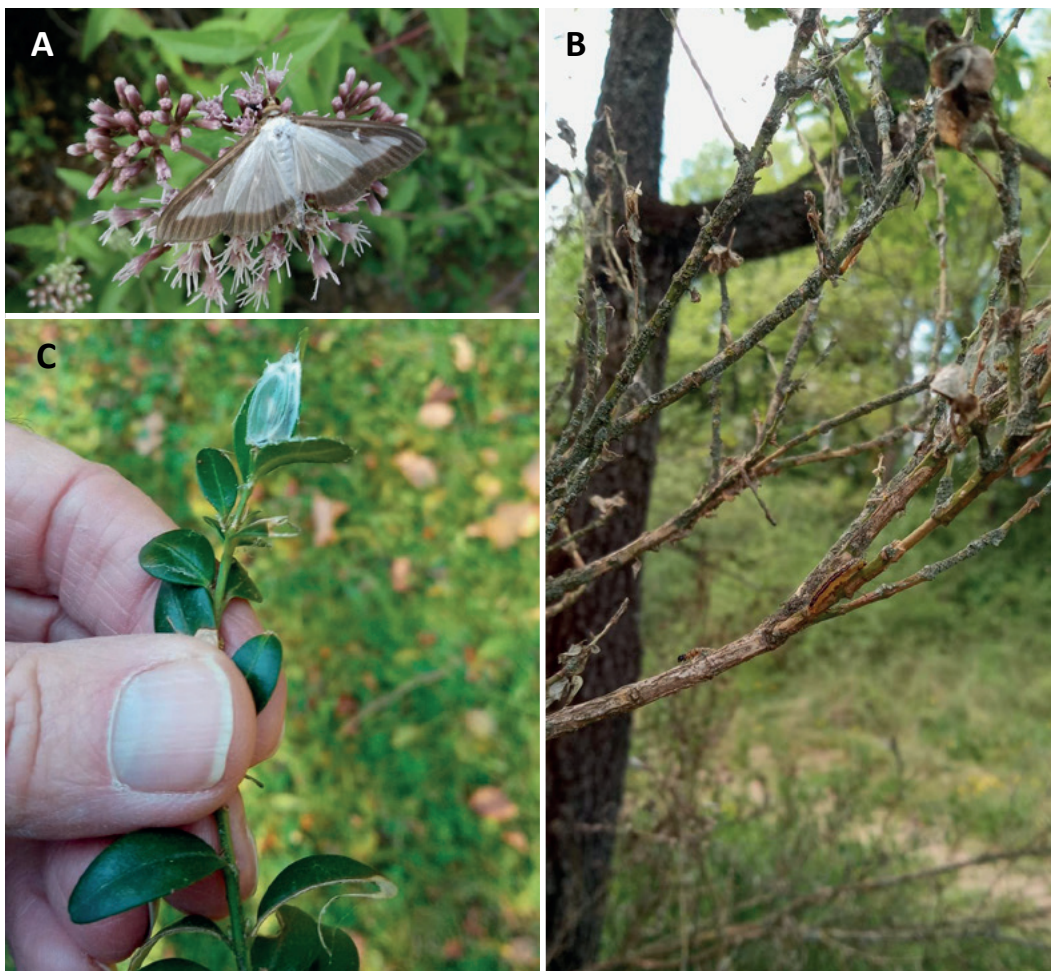


Foto 3. La polilla del boj, *Cydalima perspectalis*, plaga invasora en ecosistemas forestales de Europa. **A.** Adulto; **B.** Planta de boj muerta por orugas del lepidóptero; **C.** Capullo del lepidóptero en un brote de boj (Cortesía de M. Eizaguirre).

Entre los artrópodos caben destacar las recientes introducciones de *Diabrotica* en maíz en 2021 cuyas consecuencias todavía están por observar (Foto 5B, C), y de la polilla, *Cydalima perspectalis*, detectada por primera vez en España en 2013 y que ya ha causado daños devastadores en parques, jardines y bosques naturales de boj (Foto 3) (López y Eizaguirre, 2019).

En otros casos, la introducción de un agente nocivo exótico tuvo lugar en países con escaso nivel de investigación científica y recursos, y su presencia afectó a productos de interés comercial global. Ejemplo de ello es la roya del café causada por el hongo *Hemileia vastatrix*, que devastó extensas aéreas de café cultivadas en Sri Lanka y otros países asiáticos a partir de 1869, y que desde 1970 invadió las regiones cafetaleras de la región Centroamericana, el Caribe, México y Perú (Foto 2E). Un brote muy severo que se inició en 2012 afectó gravemente la caficultura en Centroamérica, con prevalencias del 25 al 70 % en El Salvador, Guatemala, Honduras y Nicaragua, países en los que más de 1,3 millones de personas dependían del cultivo. La estabilidad de la oferta de café *premium* y de comercio justo en América Central se vio gravemente afectada y reducida. Como ejemplo, solo en Guatemala más de 120.000 pequeños agricultores se vieron afectados por el aumento de los costes de producción debido a los fungicidas necesarios para controlar la roya, y muchos quedaron en la pobreza total debido a la falta de ingresos del café y se vieron obligados a emigrar. Los rendimientos del café se redujeron entre 16 y 31 % en América Central y del Sur, y como consecuencia se perdieron los ingresos de los agricultores de muchas zonas de monocultivo y la estabilidad del producto básico en la exportación de la región se vio amenazada por esa enfermedad.

B1.2. Dificultades del control de los organismos nocivos exóticos

El control de las enfermedades, plagas y malas hierbas causadas por los diversos tipos de agentes nocivos (cf., Capítulo A1., Apartado 1.5.), sean exóticos o nativos -que a menudo es referido por la naturaleza del método o medidas empleadas para ello (control biológico, control físico, control químico, etc.)-, requiere la identificación exacta de aquellos (cf., Capítulo C1.) y se asienta sobre principios basados en la epidemiología de las enfermedades y la dinámica poblacional de los artrópodos fitófagos y las malas hierbas (cf., Capítulo C5.) mediante: (i) reducción de la cantidad y/o eficiencia del agente nocivo disponible para el inicio de la afección; y (ii) reducción de la tasa de incremento de la población del agente en el cultivo del huésped afectado. En el caso de las enfermedades, Whetzel (1929) fue uno de los primeros estudiosos de la Fitopatología en concebir que todas las medidas de control se podían ajustar a cuatro principios fundamentales, que denominó exclusión (a), erradicación (b), protección (c) y resistencia (d), y que años más tarde serían complementados con otros dos, evasión o escape (e) y terapia (f), por un subcomité de Fitopatología de la Academia Nacional de Ciencias de EE. UU. (Anónimo, 1968). Estos seis principios -que se definen más abajo y son aplicables en términos generales al control de plagas y malas hierbas- permiten racionalizar la aplicación de las medidas de control de los organismos exóticos por: (i) su efecto sobre la cantidad inicial y/o eficiencia del agente nocivo (a, b, d, e, f) o sobre la tasa de incremento de su población (c, d, e); (ii) su efecto directo o indirecto sobre el agente nocivo (a, b, e) o sobre el huésped (c, d, f); y (iii) su incidencia en las distintas fases del ciclo vital del agente nocivo. Años más tarde, Maloy (1993) propuso que sobre dicha estructura de principios -que explicitan cómo operan sobre el agente nocivo-, se pueden superponer: (i) las estrategias de control que exponen las acciones para implementar los principios; (ii) los medios o tecnologías con las cuales llevar a cabo las estrategias; y (iii) las formas en que dichas tecnologías son puestas en práctica.

Los principios y estrategias descritos anteriormente son pilares de la Gestión Integrada (GI) de las enfermedades, plagas y malas hierbas que afectan a los cultivos en el campo (cf., Capítulo C6.), y también son de aplicación para la GI de los organismos nocivos exóticos. Sin embargo, las estrategias a adoptar para estos últimos plantean mayores dificultades e incógnitas que las de los organismos nocivos autóctonos, ya que vienen condicionadas por aspectos que en el caso de los exóticos a veces no son bien conocidos en sus zonas de origen y mucho menos en las de reciente introducción. Estos aspectos incluyen: (i) las características de su ciclo biológico; (ii) la influencia de las condiciones medioambientales sobre este último; (iii) las fuentes y los reservorios donde persisten las estructuras de los mismos (inóculo); (iv) los medios por los que se diseminan; y (v) la dinámica con la que progresan sus poblaciones. Además, todas las estrategias son también muy dependientes de las herramientas de lucha disponibles en cada país (medidas regulatorias, sustancias activas autorizadas, condiciones más o menos favorables, eficiencia de los tratamientos, etc.).

B1.2.1. Estrategias y medidas de exclusión

La exclusión tiene por objeto impedir la entrada o establecimiento de un organismo nocivo en un área geográfica libre de él, sea esta un país, una región o una finca. Las estrategias para ponerla en práctica incluyen: (i) medidas regulatorias (legislativas) mediante las cuales se prohíbe o restringe la importación de material vegetal potencialmente portador de agentes exóticos de áreas donde prevalece (cuarentena), como se describe en B1.3. para las de la UE; (ii) la interceptación de los organismos nocivos mediante la inspección sanitaria del material vegetal en el punto de salida en origen y/o entrada a la nueva área (aduana, aeropuerto, puerto, etc.); y (iii) la eliminación de dichos organismos en los puntos de origen o de entrada mediante tratamientos físicos o químicos que aseguren su destrucción en los sustratos o material vegetal, o la certificación sanitaria de este último que lo acredite libre de aquellos (Maloy, 1993).

El establecimiento de medidas que limitan la introducción de los organismos nocivos exóticos en nuevas áreas, en especial a través del material vegetal de propagación (semillas, plántones, yemas para injertos, productos vegetales frescos, etc.), es necesario y su cumplimiento debe ser controlado. Por ejemplo, en la UE se requiere el pasaporte fitosanitario para el movimiento intra-UE de las especies vegetales que figuran en una lista oficial de especies susceptibles a determinados organismos nocivos que se consideran de cuarentena o regulados. Esta medida se aplica con el fin de evitar la nueva introducción de agentes causantes de problemas fitosanitarios devastadores en países o zonas protegidas libres de tales organismos, tanto de los presentes en algunas zonas, como de los totalmente ausentes del territorio de la UE. Dicho pasaporte tiene como objetivo garantizar la exclusión de artrópodos fitófagos y de patógenos mediante prácticas adecuadas de producción y el control del material vegetal propagativo. Las malas hierbas no están todavía reguladas en la UE.

En la UE, las medidas de exclusión se basan en el certificado sanitario, que es el exigido a las importaciones procedentes de países terceros, así como la prohibición completa de introducción en el caso de ciertas especies de plantas. El sistema se basa en las inspecciones en origen realizadas por el país exportador que emite dicho certificado. Las inspecciones en los puntos de entrada en la UE son solo para monitorizar si el sistema funciona adecuadamente. Si hay un determinado número de interceptaciones, se considera que el sistema ha fallado y la UE envía una misión de inspectores al país de origen para localizar los fallos del mismo.

El uso de material vegetal propagativo libre de organismos nocivos exóticos es esencial. Así, las plantas de semilleros, los estolones de fresa, los plántones de cultivos leñosos (frutales, olivo, vid y frutos rojos), y los esquejes y plantas de semilla o procedentes de multiplicación vegetativa de ornamentales, constituyen un medio de diseminación de organismos nocivos a grandes distancias y a nivel global, y son la vía preferente de introducción de organismos exóticos. Las semillas son también importantes agentes de diseminación de un gran número de hongos, oomicetos, bacterias y numerosos virus, debido a que son el medio de multiplicación utilizado preferentemente en la mayoría de cultivos hortícolas, que son infectados por los mismos. Otros materiales de propagación, como bulbos, rizomas y tubérculos, también son vehículo de diseminación de numerosos organismos fitopatógenos que infectan plantas que se reproducen mediante estos medios, como la patata de siembra o las bulbosas ornamentales. No hay que olvidar tampoco, la importancia que pueden tener otros productos vegetales como la madera, virutas de madera, embalajes etc. que pueden ser el vehículo para la diseminación de varios organismos nocivos exóticos considerados actualmente plagas prioritarias en la UE.

Aunque las inspecciones, muestreos y análisis de laboratorio (cf., Capítulo C1.) contribuyen a minimizar los riesgos de introducción de organismos exóticos, subsisten varios problemas no resueltos. Entre estos son de destacar: (i) que el material vegetal asintomático puede ser portador de infecciones latentes con bajas poblaciones de inóculo no detectable en inspecciones visuales, e incluso mediante algunas técnicas de limitada sensibilidad; y (ii) que numerosas bacterias pueden estar en un estado fisiológico denominado viable no cultivable (VNC), que se induce bajo determinados tipos de estrés y en el que no se detecta crecimiento mediante técnicas convencionales de cultivo. En el estado VNC, el patógeno puede "resucitar" bajo condiciones agroclimáticas favorables u otras situaciones en el lugar de destino del material vegetal infectado y llegar a originar de nuevo la enfermedad.

Por todo ello, algunos países exigen protocolos específicos de exportación para evitar la entrada de ciertos organismos nocivos en su territorio, como la exportación de cítricos desde la UE a China, Corea del Sur o EE. UU., y la de fruta de hueso a Canadá o Sudáfrica, entre otros. Estos protocolos exigen, en ocasiones, la existencia de un registro de las parcelas cuya fruta vaya destinada a la exportación, el monitoreo de ciertas

plagas y enfermedades, así como la adopción de medidas obligatorias de control de algunas plagas y enfermedades en dichas zonas. En España, todas estas tareas son supervisadas por los servicios oficiales de las Comunidades Autónomas (CC. AA.), bien directamente o a través de entidades auditoras privadas previamente autorizadas. Así, por ejemplo, para permitir la exportación de mandarinas clementinas a EE. UU., las cautelas respecto a la mosca mediterránea de la fruta (*Ceratitis capitata*) (cf., Foto 3B; Capítulo A1., Apartado A1.3.1.2.) exigen: (i) tener previamente inscritas las parcelas de cultivo; (ii) llevar un cuaderno de campo; (iii) tener colocados mosqueros para monitorizar los niveles de población del insecto; (iv) realizar tratamientos fitosanitarios si se superan ciertos niveles de capturas del insecto; (v) garantizar la trazabilidad; y (vi) realizar un tratamiento de frío entre 2 y 3 °C durante una serie de días, porque se ha demostrado efectivo para que las posibles introducciones no lleven huevos o larvas vivos de dicha plaga (Lance et al., 2014). Todas estas medidas son impuestas por el país importador y se fijan rigurosos controles efectuados por inspectores estadounidenses, tanto en origen como en destino.

B1.2.2. Estrategias y medidas de erradicación

La erradicación consiste en la eliminación o reducción de las estructuras de los agentes nocivos ya existentes en un área geográfica, con medidas aplicadas sobre el sustrato donde residen (fuente de inóculo). Para llevarla a cabo, es necesario disponer de información que se obtiene mediante la vigilancia epidemiológica, un proceso que persigue la obtención de información fitosanitaria oportuna y confiable. Según la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (IPPC), la vigilancia se define como “un proceso oficial que recopila y registra datos sobre la presencia o ausencia de plagas (s. l.) mediante prospecciones, monitoreo u otros procedimientos” (FAO, 2019). En la UE, Sánchez et al. (2021) analizaron los datos disponibles en EUROPHYT (2019) sobre los costes de los programas de vigilancia entre 2016-2018 para los Estados miembros, que fueron de casi 55 millones de euros, de los cuales la UE cofinanció aproximadamente un 55 %. Este gasto incluye las actividades de muestreo en campo (examen visual, toma de muestras y utilización de trampas), los análisis de laboratorio, y otras actividades para ciertos organismos nocivos de alto riesgo. Para ello, la UE ha preparado un paquete de herramientas que incluye: (i) las directrices para la planificación de prospecciones de plagas cuarentenarias; (ii) las fichas técnicas de plagas; y (iii) las directrices específicas para la planificación de prospecciones de tres organismos piloto (*X. fastidiosa*, *Phyllosticta citricarpa*, y *Agilus planipennis*).

Las medidas de erradicación pueden ser: (i) de naturaleza cultural, como el arranque y la destrucción de las plantas afectadas en la inspección de parcelas o viveros, de huéspedes alternantes o alternativos, de partes afectadas de una planta mediante poda, de restos infestados de cultivos anteriores, o las rotaciones de cultivos; (ii) de naturaleza física (ej., solarización del suelo) o química (ej., tratamientos fungicidas de las semillas, fumigación del suelo); o (iii) de naturaleza biológica (ej., aplicación de antagonistas o parasitoides; enmiendas orgánicas y otros) (cf., Capítulo C4.).

En el caso de los organismos nocivos exóticos, las estrategias y medidas de erradicación son las más drásticas y se aconsejan siempre para los considerados de alto riesgo. Una vez confirmada por vez primera la presencia en un territorio o país de algún organismo de cuarentena citado en la legislación, se debe proceder a la destrucción inmediata del material vegetal infectado, de la forma más rápida y adecuada, según indica la normativa de la UE. No obstante, es necesario tener en cuenta que las acciones de erradicación directa de las plantas solo son efectivas si se aplican en los primeros momentos tras la detección y cuando son pocas las plantas afectadas, es escaso el número de focos, y se actúa con rapidez, o si se produce la interceptación en frontera de un material importado que se rechaza antes de ser comercializado en el país tras la inspección, debido al incumplimiento de las reglamentaciones fitosanitarias.

La erradicación se debe realizar siempre basada en criterios científicos y técnicos, y teniendo en cuenta las características específicas de cada foco y de la zona a proteger, que pueden aconsejar una erradicación selectiva y no generalizada, limitada en ciertos casos a las plantas afectadas si son escasas y con síntomas muy iniciales. Esta estrategia de erradicación se ha mostrado efectiva en el caso de enfermedades no transmitidas por vectores y en condiciones no muy favorables para el patógeno (Palacio-Bielsa et al., 2012), y en artrópodos de poca movilidad y relativamente específicos de planta huésped. Por el contrario, las acciones de erradicación pueden ser excesivamente costosas si se toman sin un conocimiento real de los focos *in situ* y de las características biológicas y ecológicas de cada organismo a erradicar, y dejan de ser efectivas una vez que el organismo nocivo exótico se ha establecido en una zona excesivamente amplia, que hay que definir en cada caso concreto.

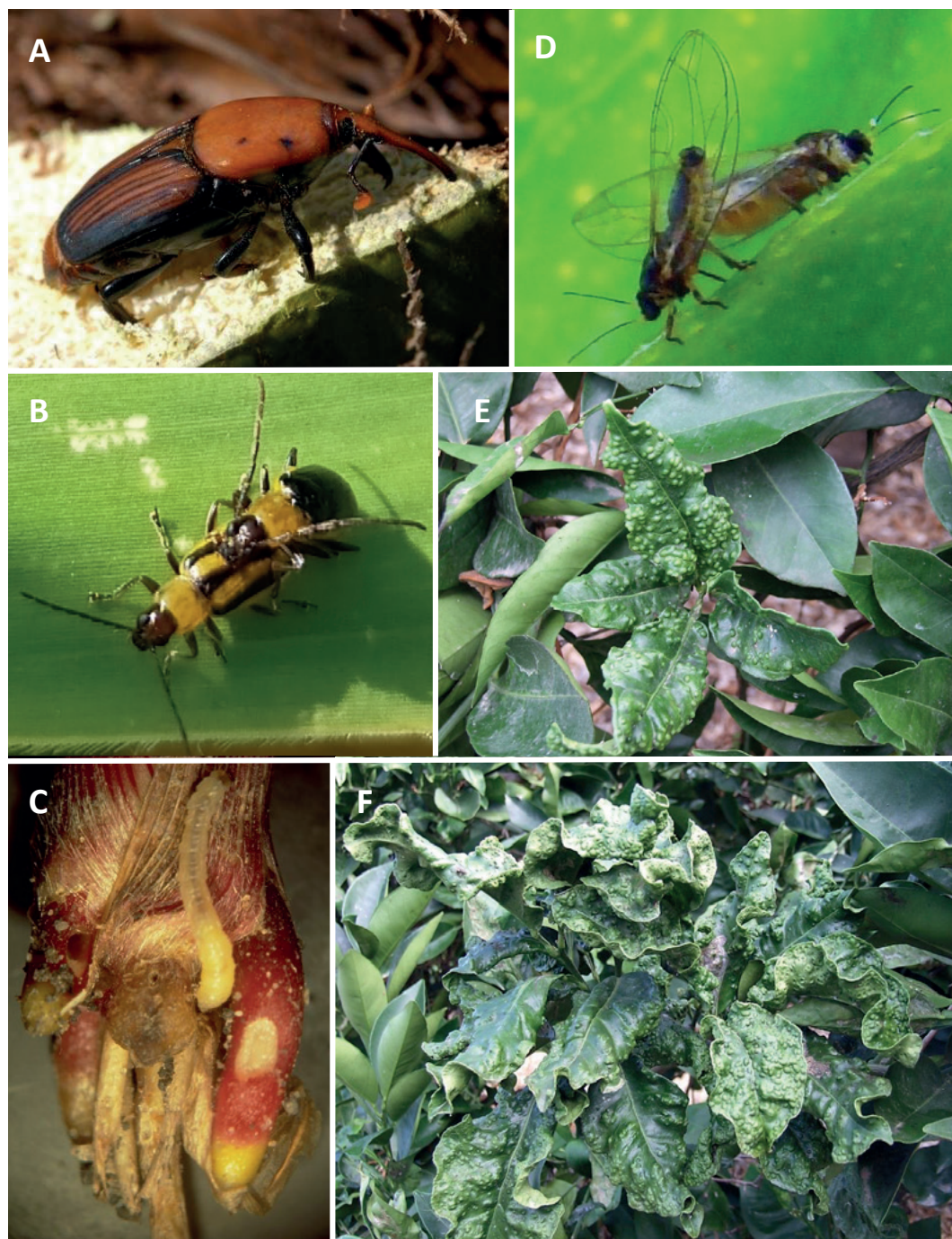


Foto 4. Erradicación de agentes exóticos nocivos. **A.** Erradicación de la bacteria *Erwinia amylovora* en una plantación de peral afectada por fuego bacteriano en Aragón (Cortesía de M.A. Cambra); **B-C.** Erradicación de *Xylella fastidiosa* en una plantación de almendro afectada de quemado foliar en Alicante [Cortesía de V. Dalmau (B)], y de olivo afectado de decaimiento rápido en Apulia (Italia) [Cortesía de F. Nigro (C)].

Además, los investigadores especialistas en sociología reconocen que una erradicación efectiva solo se puede lograr si todas las partes interesadas, incluyendo la opinión pública, cooperan y contribuyen a través de interacciones positivas. Esto pasa necesariamente por una divulgación y educación correcta y eficaz. De hecho, en algunos programas de erradicación de plagas se ha dedicado hasta un tercio del presupuesto a acciones de comunicación (Vicent y Blasco, 2017). Al menos en España, y basándonos en experiencias previas de erradicación eficaz como la del fuego bacteriano en los años iniciales tras su detección en España, de 1995 a 2009, lo más necesario para el éxito y la rapidez de la erradicación es una compensación económica rápida y adecuada al agricultor o viverista por los arranques de las plantaciones o viveros (López et al., 2019; Palacio-Bielsa et al., 2012), que además también resulta imprescindible para la aceptación de la erradicación por la opinión pública y los medios de comunicación (Foto 4). Otras medidas que también se utilizan en los programas de erradicación, que siempre deben ser planteados de forma integrada y a medio o incluso largo plazo, son los métodos culturales

de reducción o eliminación de inóculo, la rotación de cultivos, las trampas para artrópodos plagas o para vectores de agentes fitopatógenos, el control biológico, los suelos supresores de enfermedades, métodos físicos como la solarización, etc.

Foto 5. Medidas de contención de agentes exóticos nocivos. **A.** Picudo rojo de las palmeras (*Rhynchophorus ferrugineus*); **B, C.** *Diabrotica virgifera* en maíz: adulto (B) y larva y daños en raíces (C); **D-F.** Prospecciones de *Trioza erytreae*, vector de 'Candidatus Liberibacter africanus' (agente causal del huanglongbing de los cítricos) en España: adultos (D) (Cortesía de F. Siverio); y síntomas causados por el insecto en cítricos en Pontevedra (E, F).



B1.2.3. Medidas de contención

En España, la política fitosanitaria frente a ciertas plagas y enfermedades causadas por agentes exóticos pasó de tener como principal objetivo la eliminación de los organismos nocivos, a las actuales políticas y actuaciones de contención que se aplican hasta que las poblaciones de aquellos superan unos umbrales económicos que puedan justificar la adopción de una medida fitosanitaria (biológica, cultural, química, o tecnológica), teniendo en cuenta su posible impacto sobre el aplicador, el consumidor y el

medio ambiente (Coscollá, 2004). Hay numerosas plagas y enfermedades causadas por agentes exóticos, que tras la primera detección de estos en nuestro territorio requirieron la adopción de medidas de erradicación primero, y en los que, tras el fracaso de las mismas fue aconsejable pasar a las de contención después. Un ejemplo es el del picudo rojo de las palmeras (*Rhynchophorus ferrugineus*) (Foto 5A), cuyas larvas perforan galerías de más de un metro de longitud en los troncos de las plantas huésped, comprometiendo la vida de estas y convirtiendo a *R. ferrugineus* en una plaga que puede ser difícil de detectar con una simple inspección visual. Las plantas huésped pertenecen fundamentalmente a la familia de las palmeras, que sufren amarilleamiento y marchitamiento y eventualmente la muerte del pie afectado. En España la plaga se detectó por vez primera en 1994 en palmeras importadas, y constituye una grave amenaza para las especies nativas *Chamaerops humilis* (palmito) y especialmente para *Phoenix canariensis* (palmera de Canarias) provocando importantes pérdidas económicas en los cultivos de palmito y en la jardinería ornamental de palmeras. También la diabrotica del maíz (*Diabrotica virgifera*) (Foto 5B, C), una especie proveniente de América Central y Méjico, ya instalada en maíces de algunos países del este europeo y que apareció en España con cierta abundancia en un foco cercano a Lleida en 2021, pero en 2022 la incidencia ha sido prácticamente nula (X. Pons, comunicación personal).

En masas forestales, destaca la chinche americana de las piñas (*Leptoglossus occidentalis*) que es una especie originaria del oeste de Norteamérica. En Europa fue detectada en Italia en 1999. En España se citó por vez primera en Barcelona en 2003 y en Portugal en 2010. *L. occidentalis* se considera una plaga forestal de coníferas (*Pinus strobus*, *P. resinosa*, *P. sylvestris*, *P. nigra* y *P. mugo*) en las que se alimenta de acículas jóvenes y conos en formación causando una reducción de la fertilidad y de la producción de piñones. Actualmente se considera la plaga más importante del pino piñonero en producción.

Entre las enfermedades causadas por agentes fitopatógenos sometidos a contención conviene señalar el fuego bacteriano de las rosáceas (*Erwinia amylovora*), la flavescencia dorada de la vid ('*Candidatus Phytoplasma vitis*'), y más recientemente el nematodo de la madera del pino (*Bursaphelenchus xylophilus*), la psila africana de los cítricos (*Trioza erytrae*, vectora de '*Candidatus Liberibacter africanus*' el agente causal del huanglongbing) (Foto 5D-F) y *X. fastidiosa*. Dichas medidas requieren frecuentes prospecciones que son ejecutadas por las CC. AA. con la colaboración financiera del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, y en ocasiones también de la UE (Giné et al., 2019).

B1.2.4. Medidas de evasión

Las medidas de evasión o escape pretenden evitar las condiciones que favorecen el desarrollo de las enfermedades, plagas y malas hierbas, y, por lo tanto, en el caso de los organismos nocivos exóticos están directamente relacionadas con el conocimiento en profundidad de su ciclo biológico y de sus posibles reservorios en las condiciones locales, así como de la gestión o manejo integrado de cada cultivo (cf., Capítulo C6.).

Las medidas de evasión de los organismos nocivos exóticos pretenden asegurar la utilización de material vegetal de reproducción y cultivos libres de ellos, y se basan en una aproximación holística de cada problema, con bases científicas y tras evaluación de los factores favorables para dichos organismos. A tal fin, es necesario tener en cuenta la elección del lugar de siembra o plantación con las condiciones climáticas menos favorables para el desarrollo de las poblaciones del organismo nocivo, el retraso o avance de la fecha de siembra, evitar lugares donde el organismo nocivo está o ha estado presente, etc. (ej., suelos infestados o zonas endémicas), usar cubiertas de malla de plantas individuales, o cultivo bajo invernaderos o recintos protegidos de vectores, etc. (cf., Capítulo C6.). Estas últimas prácticas son muy eficaces y deberían ser más utilizadas en el sector de la producción viverista de frutales y ornamentales, así como en el de producción de semillas, para evitar la contaminación por bacterias, hongos, oomicetos,

virus y viroides fitopatógenos que son diseminados por vectores, y /o por lluvia, viento y otros fenómenos meteorológicos, etc.

B1.3. Nueva clasificación de plagas reguladas en la UE

Los listados de organismos nocivos de la Directiva 2000/29/CE (DOCE, 2000) y de otras plagas (*s. l.*) reguladas definidas en las legislaciones de la UE eran muy numerosos y en ocasiones complejos, pero desde hace pocos años el nuevo Reglamento (UE) 2016/2031 (DOUE, 2016) permite aclarar el estatus de los organismos regulados en la legislación actual y describe el nuevo marco regulatorio europeo. En el mismo, se establece un sistema de prohibiciones, una lista de organismos según su nivel de riesgo, un sistema de certificado fitosanitario obligatorio (distinto al pasaporte intra-UE) y otros aspectos. La UE ha modificado la legislación hacia un sistema más restrictivo que el anterior, en el que por defecto todo estaba admitido y solo se especificaba qué era lo prohibido.

Las dos categorías principales de organismos regulados son las plagas cuarentenarias y las plagas reguladas no cuarentenarias (*s. l.*), incluyendo en plagas (*s. l.*) tanto las enfermedades como las plagas causadas por artrópodos fitófagos. Además, la UE ha publicado los Reglamentos de Ejecución (UE) 2019/2072 y 2021/2285, después de que la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) haya reevaluado un elevado número de artrópodos fitófagos y agentes patógenos para actualizar su situación fitosanitaria, de acuerdo con los avances técnicos y conocimientos científicos más recientes. Esta reevaluación se ha realizado en colaboración con la Organización Europea y Mediterránea para la Protección de las Plantas (EPPO, <https://www.eppo.int/>) y los países miembros de la UE, y teniendo en cuenta: (i) las interceptaciones que han tenido lugar en los controles fronterizos realizados por aquellos (EPPO, 2017); (ii) los nuevos brotes aparecidos dentro del territorio de la UE; y (iii) los análisis realizados por grupos de trabajo de la UE. Los reglamentos modificados establecen también los requisitos para distintos temas, como la introducción o el traslado de determinados vegetales para evitar la entrada, el establecimiento y la propagación de organismos regulados, y sustituyen los nombres de algunos artrópodos fitófagos y agentes fitopatógenos para adaptarse a la nomenclatura taxonómica internacionalmente aceptada en la actualidad, empleando por primera vez los códigos unívocos EPPO (DOUE, 2019a, b; DOUE, 2021).

La estrategia preventiva de importación adoptada por dichos Reglamentos representa un paso adelante para la protección del territorio de la UE (MAPA, 2019), porque se introduce un sistema de prevención global gradual y basada en el nivel de riesgo que presentan las diferentes mercancías importadas de países terceros en dicho territorio. Hasta ahora, solo algunos vegetales y productos vegetales tenían que ir acompañados de un certificado fitosanitario y cumplir unos requisitos específicos para su importación en la UE. Con el Reglamento (UE) 2016/2031, el certificado fitosanitario pasa a ser obligatorio para la importación de todos los vegetales, lo que incluye: vegetales destinados a plantación (ya incluidos en el anterior régimen fitosanitario), partes de vegetales, flores y capullos frescos, semillas y frutos con destino a la siembra, etc.

La UE ha mantenido la prohibición que se establecía en la Directiva 2000/29/CE de importar determinados vegetales, productos vegetales y otros materiales procedentes de determinados países terceros. Además, según la evaluación preliminar de riesgos que se ha realizado, se ha concluido que algunos vegetales o productos vegetales presentan un riesgo de transportar organismos nocivos a un nivel no aceptable para la UE y son denominados vegetales de alto riesgo. La importación de vegetales de la lista de alto riesgo estará prohibida hasta que se realice la completa evaluación del riesgo de plagas (*s. l.*) específicas de cada país exportador, y se pueda concluir si el riesgo de su importación es aceptable si se cumplen determinados requisitos.

El nuevo Reglamento (UE) 2016/2031 también introduce requisitos especiales adicionales para la introducción y el traslado de determinados vegetales, productos vegetales y otros materiales por el elevado riesgo de que contengan determinados organismos nocivos. Entre ellos, *v. gr.* los insectos *A. planipennis* -el barrenador esmeralda del fresno, una de las veinte plagas prioritarias de la UE, que se está propagando desde Ucrania y Rusia hacia la UE y Bielorrusia-, la mosca oriental de la fruta *Bactrocera dorsalis* y *B. latifrons*, o la mosca del melocotón *B. zonata*.

El Reglamento 2016/2031 establece cuatro categorías de plagas para la UE: (i) plagas cuarentenarias de la Unión o PCs, que no están presentes en la UE o, si lo están, su extensión es limitada; (ii) plagas prioritarias o PPs, cuyo potencial impacto económico, medioambiental o social sería el más grave; (iii) plagas cuarentenarias para zonas protegidas, que están presentes en el territorio pero ausentes en una zona determinada en la que sí podrían establecerse y de cuya introducción ha de ser protegida; y (iv) plagas reguladas no cuarentenarias o PRNCs, que engloban las plagas ampliamente distribuidas en la UE y transmitidas principalmente a través de vegetales para plantación, cuya presencia tiene un impacto económico inaceptable en la UE, teniendo en cuenta el uso previsto de dichos vegetales, y para las que existen medidas factibles y eficaces para evitar su presencia en los mismos.

B1.3.1. Plagas de cuarentena y plagas prioritarias en la UE

Una plaga (nombre general que en la UE se utiliza tanto para artrópodos fitófagos, como para hongos, oomicetos, bacterias, virus, viroides y nematodos fitopatógenos) puede clasificarse como PC para todo el territorio de la UE (PC-UE) o para un área particular llamada Zona Protegida (PC-ZP). Las PCs corresponden a plagas que están ausentes del territorio, o que están presentes pero que no están ampliamente distribuidas, y es probable que se introduzcan, se establezcan o se propaguen en ese territorio y que tengan un impacto económico, ambiental o social inaceptable. Por lo tanto, se deben tomar medidas muy estrictas para evitar su entrada o propagación en estos territorios.

Como ejemplos de plagas de cuarentena, el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) cita los insectos cerambícidos asiáticos *Anoplophora chinensis* y *A. glabripennis*, organismos muy polífagos y cuyo análisis de riesgo demuestra que es probable que causen daños muy significativos en el patrimonio forestal; o el fitoplasma de la flavescencia dorada de la vid ('Ca. *Phytoplasma vitis*'), enfermedad altamente epidémica que puede causar graves daños en este cultivo (MAPA, 2019).

Con el nuevo Reglamento 2016/2031, las obligaciones de los Estados miembros se han reforzado con la implementación obligatoria de programas plurianuales de vigilancia en toda la UE, que permitan asegurar una mejor prospección de las PCs y detectar su presencia lo antes posible, tras lo cual deberán notificarse inmediatamente de forma oficial y se establecerán medidas de lucha obligatoria con bases científicas para la erradicación de las mismas. Entre 2016 y 2018, Sánchez et al. (2021) señalaron que en la vigilancia epidemiológica de la bacteria *X. fastidiosa* se utilizó el 21,6 % del gasto total de ese concepto, y en la de *Bursaphelenchus xylophilus* (el nematodo de la madera que causa la marchitez del pino) se empleó el 16,8 % del mismo (Foto 6).

Respecto a las medidas de erradicación a adoptar contra las PCs: (i) se investigará y se determinará el origen de la introducción, en particular la trazabilidad de los vegetales infectados hacia delante y hacia atrás; (ii) se establecerá una zona demarcada que constará de una zona infestada y una zona tampón que la rodeará, cuyo tamaño se determinará de conformidad con los principios de gestión del riesgo de plagas (*s. l.*) (necesidad, proporcionalidad, impacto mínimo, no discriminación, y justificación técnica); y (iii) cualquier persona (profesional o particular) que sospeche o advierta la presencia de una PC deberá informar inmediatamente a la autoridad competente.

Foto 6. Marchitez del pino causado por el nematodo de la madera *Bursaphelenchus xylophilus*.

A. *B. xylophilus* en un canal axial de resina de *Pinus densiflora* (Cortesía de Y. Mamiya); **B.** Adulto de *Monochamus* sp., coleóptero vector de *B. xylophilus*;

C. Pinos afectados por la marchitez en Japón (Cortesía de J.E. Palomares); **D.** Vista de un bosque de *Pinus* sp. con pinos de color castaño infectados por *B. xylophilus* en Miryang, Corea del Sur (Cortesía de Green Korea United).



Algunas PCs han sido evaluadas como plagas prioritarias para la UE (PPs) mediante un acto delegado. Son las PCs cuyo impacto económico, ambiental o social potencial se ha evaluado como el más grave para el territorio de la UE. Para establecer el listado de dichas plagas, la UE ha realizado una evaluación basándose en una metodología elaborada por el Centro Común de Investigación de la UE (JRC) y la EFSA (Sánchez et al., 2019). De esta metodología forman parte indicadores compuestos y un análisis basado en múltiples criterios, y en ella se tienen en cuenta la probabilidad de propagación y establecimiento de las plagas evaluadas en el territorio de la Unión y sus consecuencias, así como otros criterios que abarcan las dimensiones económica, social y medioambiental. La mencionada evaluación conjunta concluyó con la identificación de 20 plagas (s. l.) cuyo posible impacto económico, social o medioambiental se considera como el más grave para el territorio de la Unión. Estas plagas PP son: los insectos fitófagos *Agrilus anxius*, *Agrilus planipennis*, *Anastrepha ludens*, *Anoplophora chinensis*, *Anoplophora glabripennis*, *Anthonomus eugenii*, *Aromia bungii*, *Bactericera cockerelli*, *Bactrocera dorsalis*, *Bactrocera zonata*, *Conotrachelus nenuphar*, *Dendrolimus sibiricus*, *Popillia japonica*, *Rhagoletis pomonella*, *Spodoptera frugiperda*, y *Thaumotobia leucotreta*; y los agentes fitopatógenos *Bursaphelenchus xylophilus*, '*Candidatus Liberibacter* spp.' (agente causal del huanglongbing o *greening* de los cítricos), *Phyllosticta citricarpa*, y *Xylella fastidiosa*. Dichas PPs deben ser objeto de medidas adicionales que han de adoptar los Estados miembros, tales como: (i) programas de vigilancia anual; (ii) elaboración de Planes de Contingencia; (iii) realización de ejercicios de simulación para poner en práctica esos planes; y (iv) adopción de un plan de acción en caso de la aparición de un brote. Algunas de estas acciones se han llevado ya a cabo en España, para luchar contra la bacteria *X. fastidiosa* o contra *B. xylophilus*. La incorporación de nuevos organismos nocivos a la lista de PPs es un proceso dinámico, y posteriormente a la publicación de la misma se podrán incorporar otras plagas de alto riesgo.

B1.3.2. Plagas reguladas no cuarentenarias en la UE

Para ser considerada como plaga (s. l.) regulada no cuarentenaria (PRNC) en la UE, esta debe cumplir las siguientes condiciones: (i) estar ampliamente distribuida en el territorio de la UE; (ii) ser transmi-

tida principalmente a través de vegetales destinados a plantación; (iii) causar un impacto económico inaceptable en caso de establecerse en plantaciones desarrolladas con dichos vegetales, teniendo en cuenta el uso previsto de los mismos; y (iv) que existan además medidas factibles y eficientes para evitar su presencia en el material vegetal antes de ser comercializado. Para ciertas PRNCs, se pueden establecer medidas para mantener su presencia por debajo de ciertos umbrales de aceptabilidad establecidos para las plantas destinadas a plantación de que se trate. El listado de estas PRNC está compuesto por plagas que procedían de la Directiva 2000/29/CE, por las sometidas a medidas de emergencia, y por las que figuraban hasta ahora en las Directivas de comercialización de semillas y plantas de vivero (MAPA, 2019).

B1.3.3. Estatus de las malas hierbas y plantas invasoras en España

Tal como se indica en el Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España (López et al., 2019), el estatus legislativo actual de las especies vegetales exóticas invasoras es muy distinto al de los artrópodos fitófagos y agentes fitopatógenos. El MAPA publicó el Catálogo Español de Especies Exóticas Invasoras (Real Decreto 630/2013) (BOE, 2013) y la lista de especies incluida en ese Real Decreto fue modificada y consolidada en 2016, incorporando nuevas especies acordes con las observaciones de expertos. Sin embargo, la inclusión de los sistemas agrícolas como escenarios susceptibles a la invasión por especies de las denominadas malas hierbas no se ha visto reflejado en la definición de especie exótica invasora que se da más adelante en ese mismo Real Decreto: "Especie exótica que se introduce o establece en un ecosistema o hábitat natural o seminatural, y que es un agente de cambio y amenaza para la diversidad biológica nativa, ya sea por su comportamiento invasor, o por el riesgo de contaminación genética".

Es evidente que, en el caso de las malas hierbas, hay un enfoque planteado más como un problema medioambiental que agronómico, que ha llevado a una situación de vacío legislativo en materia de prevención y de actuación frente a la presencia de ciertas especies vegetales alóctonas que han mostrado una clara expansión como malas hierbas en nuestros cultivos (López et al., 2019). A su vez, esta dificultad de visión de las malas hierbas como agentes nocivos no es exclusiva de la legislación española. En los recientes Reglamentos de la UE 2016/2031 y de años siguientes, ninguna especie vegetal con aptitud como mala hierba de los cultivos se ha incluido en el listado de organismos nocivos para los mismos. Todo este conjunto legislativo hace que sea preocupante la situación legal de las especies de malas hierbas (Recasens, 2018). Sin embargo, la EPPO sí actualiza periódicamente su lista de especies vegetales invasoras, y conviene consultarla para prevenir la introducción de las mismas.

Por todo ello, muy pocas malas hierbas están sometidas en la práctica a programas de erradicación. En España, apenas se aplican esas medidas al no figurar en la legislación de la UE, por lo que legalmente no son considerados organismos regulados, lo que supone un problema para su control en distintos cultivos.

B1.4. Las especies exóticas invasoras

Las especies exóticas invasoras son todo tipo de organismos vivos que se introducen en otros territorios y logran adaptarse, establecerse, reproducirse y diseminarse hasta colonizar el entorno, formar nuevas poblaciones y causar graves impactos en la biodiversidad, la salud, la agricultura o la economía. Estas especies se pueden establecer en un ecosistema o hábitat natural o seminatural, son agentes de cambio y serían una amenaza para la diversidad biológica nativa, ya sea por su comportamiento invasor (al desplazar a las especies autóctonas), o por el riesgo de contaminación genética. Los problemas que

pueden ocasionar son: (i) actuar como depredadores impidiendo el desarrollo de las especies nativas; (ii) alterar el hábitat, modificándolo física y químicamente; (iii) competir por el alimento y el espacio; (iv) originar híbridos con las especies nativas; y (v) introducir nuevos parásitos, artrópodos plagas, agentes fitopatógenos, etc.

Las especies exóticas invasoras son la **segunda causa de pérdida de biodiversidad a nivel global** según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), porque constituyen **una de las principales amenazas para la supervivencia de más de 1 millón de especies**, tal y como advierte la Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IP-BES). En España están presentes diversas especies de este tipo correspondientes a varios grupos taxonómicos, lo que llevó al MAPA a publicar el Catálogo Español de Especies Exóticas Invasoras. Las estrategias y métodos para la gestión, control y erradicación se establecen según la especie.

Las especies exóticas en este apartado se refieren a especies animales y excluyen los artrópodos fitófagos y los agentes fitopatógenos y malas hierbas que se han tratado anteriormente en todo el Apartado B1.3. pero también se diseminan por todo el mundo siguiendo las rutas más insospechadas, hasta que se instalan a miles de kilómetros de sus hábitats naturales. Esto **puede ocurrir por la intervención humana –intencional o accidental – y por fenómenos naturales**. Algunas de las formas de diseminación que tienen que ver con actividades humanas son: (i) la compraventa de plantas y animales exóticos -que es la causa principal de su introducción en nuevas áreas-; (ii) el turismo; (iii) la caza y pesca deportiva; y (iv) el transporte y comercio internacional, ya que las bodegas de los aviones, los contenedores de mercancías y las partes externas de los aviones y cascos de los barcos son rincones habituales donde se instalan las especies invasoras.

Científicos expertos en especies exóticas invasoras y organizaciones no gubernamentales (ONGs) ecologistas solicitaron a las Administraciones Públicas españolas que fueran contundentes frente a las **especies invasoras dado el impacto negativo que provocan, que está cifrado en 12.000 millones de euros anuales para la UE** (europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20140415STO44550/poc-las-especies-invasoras-cuestan-a-la-ue-12-000-millones-de-euros-al-ano) y **en 50 millones de euros anuales para España**, estos últimos sólo para la atención de las emergencias que generan, como el taponamiento de canales y tuberías por parte de mejillones o caracoles invasores.

Como ejemplos de algunas especies animales exóticas invasoras introducidas en España recientemente y que tienen efectos negativos directos o indirectos sobre la agricultura y la silvicultura de distintas zonas, se encuentran:

- (i) El mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*). Originario de los mares Caspio y Negro, es un molusco bivalvo con un comportamiento fuertemente invasor. En España se detectó en la cuenca del río Llobregat durante la década de 1980, y a partir de 2001 se ha asistido a su incremento sistemático en toda la cuenca del Ebro y en las del Júcar y Segura. Representa una amenaza para los ecosistemas acuáticos y para su biodiversidad, y ocasiona la **oclusión de tuberías de agua en abastecimientos para poblaciones y especialmente de las tuberías de riego en agricultura, ganadería, industrias, centrales de producción energética, etc.**
- (ii) El caracol manzana (varias especies del género *Pomacea*). Las especies del género *Pomacea* son moluscos gasterópodos, y la mayoría son importantes plagas invasoras muy peligrosas por su voracidad y resistencia a condiciones adversas, que provocan importantes pérdidas y daños en los arrozales. Son de vida anfibia y se consideran **plaga en arroz (*Oryza sativa*) cuya planta ingiere, y por la presencia de densidades masivas de caracoles en campos y medios acuáticos (hasta 100 ejemplares/m²).**

En 2009 se detectó en el Delta del Ebro la especie *Pomacea maculata* (= *P. insularum*), originaria de la cuenca amazónica y considerada como una de las 100 especies invasoras más perjudiciales del mundo. Su biología y etología la hacen muy peligrosa, no sólo por los daños directos que ocasiona en el cultivo, sino también por el riesgo medioambiental que supone. En el delta del Ebro, la especie presente se corresponde con un haplotipo típico de caracoles manzana cultivados, destinados a su comercialización en acuariofilia, actividad ahora prohibida en la U.E.

Las medidas de exclusión son las primeras que se deben implementar para prevenir la introducción e impacto de especies exóticas invasoras en un ecosistema, tanto involuntaria como intencionadamente. Para ello es fundamental contar con un marco legal adecuado y aumentar el control sobre las posibles vías de entrada de organismos exóticos. Si esto fracasa, el siguiente paso es la **detección temprana y la rápida respuesta**: actuar mediante erradicación antes de que la especie en cuestión se torne invasora.

Las herramientas actuales se aplican para el control o erradicación según el contexto y grado de invasión. Se llama **control de especies exóticas** cuando se hace un manejo de la especie llevándola a niveles en los que el daño al ecosistema sea el menor posible. Según el MAPA, **la gestión de estas especies se divide en tres grupos de medidas, independientemente del grupo taxonómico: control físico, químico y biológico.**

El Servicio de Alerta de la EPPO está desarrollando sistemas de detección de nuevas especies de este tipo. Del mismo modo, la FAO ha publicado manuales para la identificación y detección de especies invasoras de artrópodos, nematodos, bacterias, hongos, oomicetos, virus, viroides y plantas en sistemas de cultivo que pueden resultar orientativos (http://www.issg.org/pdf/publications/GISP/Guidelines_Toolkits_BestPractice/Wittenberg&Cock_2001_ES.pdf).

B1.5. La Prevención Integrada de nuevas plagas, enfermedades y malas hierbas de alto riesgo en España

La introducción y/o diseminación de los organismos definidos en la UE como de cuarentena, prioritarios de cuarentena y regulados no cuarentenarios y citados en la legislación (DOUE, 2019a,b) podría causar importantes problemas a la agricultura y masas forestales españolas, ya que, a **los daños directos en los cultivos o masas forestales afectados, se unirían en algunos casos los indirectos derivados de su clasificación como organismos de cuarentena en países terceros y, por lo tanto, crearían dificultades adicionales para la exportación de los huéspedes potenciales**, lo que sería gravísimo para un país exportador de productos agrarios como España. Se trata en todos los casos de problemas frente a los cuales **la mejor estrategia de control es prevenir su introducción**, por lo que se considera imprescindible divulgar información de los síntomas que ocasionan, tanto los organismos de cuarentena como los prioritarios o los regulados, y aplicar métodos de diagnóstico de elevada sensibilidad y especificidad para detectarlos en intercepciones o en los primeros focos que se presenten en viveros, cultivos o masas forestales. Los trabajos realizados en distintos países demuestran que estos organismos pueden originar también infecciones asintomáticas o causar síntomas inespecíficos, que a veces requieren realizar análisis mediante protocolos muy complejos con varias técnicas y protocolos rápidos, precisos y eficientes en laboratorios especializados.

Ante la carencia actual de tratamientos químicos terapéuticos eficientes y autorizados en la UE contra muchos de los organismos de cuarentena, prioritarios o regulados (y/o de sus vectores, en su caso), y **la dificultad y coste de la gestión integrada de los problemas fitosanitarios que causan**, como se ha indicado antes, **la mejor estrategia de control es la prevención**. Para ello es necesario asegurar que el

material vegetal está libre de organismos nocivos, cumpliendo con la legislación de la UE, y muy especialmente en el caso de las importaciones de países extracomunitarios en los que ciertos organismos nocivos de alto riesgo son endémicos. Para prevenir la introducción de estos organismos es fundamental conocer bien los síntomas que causan cada uno de ellos. En el caso de una nueva introducción, una vez detectados los focos afectados, y si no se dispone ya de programas de gestión integrada para ese organismo, es muy importante actuar con contundencia para realizar una rápida erradicación.

Como ocurre con el control de las plagas, enfermedades y malas hierbas causadas por agentes nocivos endémicos en los cultivos (Capítulo C6.), la eficiencia en la prevención de organismos nocivos exóticos se incrementa con la aplicación integrada de todas las medidas y acciones disponibles para ello.

La Prevención Integrada (PI) de artrópodos fitófagos y agentes fitopatógenos exóticos en España requiere:

- a) Desarrollar **análisis de riesgos** para los distintos artrópodos fitófagos, patógenos y malas hierbas que afectan a cada cultivo a nivel mundial y que suponen una amenaza actualmente para los cultivos españoles, - tanto estratégicos como minoritarios, o para las masas forestales - y que no están presentes en territorio nacional, o están en vía de erradicación o sometidos a contención.
- b) Redactar una **legislación española, complementaria a la de la UE**, para aquellos organismos nocivos exóticos no considerados en la legislación comunitaria y prioritarios para España, y **Planes de Contingencia** en los que se incluyan todas las medidas preventivas adecuadas a cada organismo, diseñados en colaboración con expertos científicos nacionales e internacionales, y exigir el cumplimiento riguroso de las mismas a nivel nacional.
- c) **Poner en práctica los programas de inspección, prospección y análisis con bases científicas** aplicados con una mayor vigilancia sobre las vías de acceso de los organismos exóticos de riesgo, y vigilar la aplicación de los protocolos ya disponibles en la EPPO, IPPC (*International Plant Protection Convention* de la FAO) y otros organismos internacionales.
- d) **Crear una Red pública de Alerta Fitosanitaria** para el intercambio de información a nivel nacional sobre estos organismos exóticos. Realizar inspecciones exhaustivas en las importaciones y en las plantaciones y viveros para contrarrestar eventuales riesgos de diseminación.
- e) **Intensificar la divulgación** de los síntomas que causa cada uno de estos organismos nocivos exóticos entre los técnicos, agricultores y comercializadores.
- f) **Asegurar la sanidad del material vegetal producido en España** mediante una verdadera certificación sanitaria, más allá de pasaportes fitosanitarios o de controles en los sistemas de producción viverista basados en observaciones visuales.
- g) Actuar de manera preventiva y prontamente en caso de que sea detectado alguno de los agentes nocivos exóticos, porque es imperativo proceder a su **pronta erradicación mediante eliminación de las plantas afectadas**, y tomar medidas drásticas, con apoyo de la legislación, para evitar que consigan establecerse.
- h) **Incentivar la investigación científico-técnica para mejorar las medidas preventivas a medio y largo plazo** de los organismos exóticos, optimizando sus métodos de diagnóstico, modelizando su epi-

demiología y dinámica poblacional, y desarrollando soluciones innovadoras para su prevención y gestión integrada.

- i) Diseñar planes de prevención y de Contingencia en las condiciones locales de cada C.A., que sean realistas, dinámicos y coordinados entre las CC. AA. y con el MAPA.
- j) Divulgar con rapidez y transparencia la información sobre temas fitosanitarios y cooperar entre todos los sectores implicados, evitando diferencias políticas e ideológicas.
- k) En caso de detección, vigilar la aplicación de forma inmediata de los protocolos de erradicación previstos en la legislación de la UE y los Planes de Contingencia establecidos (y modificados si es necesario, por el MAPA o las CC. AA. afectadas, tras la detección), y acordar mediante la legislación necesaria las indemnizaciones a percibir por los agricultores afectados.
- l) Desarrollar con bases científicas la GI de dichas plagas y enfermedades exóticas en aquellos casos en los que no sea posible la erradicación.

Es importante destacar que, en los últimos años, la legislación de la UE sobre organismos nocivos exóticos se ha apoyado en el conocimiento científico proporcionado por la EFSA o en medidas consensuadas por Paneles EPPO de expertos. A partir de la publicación de esos análisis, la mayoría de los países europeos, entre ellos España, han diseñado Planes de Contingencia para ciertas plagas y enfermedades y sus vectores que son PPs de algunos cultivos estratégicos -pero no para muchas otras cuarentenarias o reguladas, ni para malas hierbas-. Su ejecución con garantías, si se detecta el organismo problema, debe afrontar inmediatamente, en primer lugar, el problema real de la falta de fondos públicos específicos reservados para ello.



Foto 7. Ejemplos de agentes exóticos nocivos que han motivado el cierre temporal de fronteras a importaciones en Estados miembros de la Unión Europea. **A, B.** Síntomas de la infección por la bacteria *Ralstonia solanacearum* en patata de consumo importada; **C.** Síntomas de la infección por la bacteria *Xanthomonas citri* subsp. *citri* y con otras lesiones, en naranjas importadas; **D.** Naranjas infectadas por *Phyllosticta citricarpa* el hongo causante de la mancha negra de los cítricos (Cortesía de A. Vicent).

En la UE existen además mecanismos legales para prevenir casos excepcionales de importaciones, por ejemplo, cuando existe un riesgo evidente de introducción de organismos nocivos exóticos. Así, en la última década, la UE ha ordenado en varias ocasiones el cierre temporal de fronteras de determi-

nados Estados miembros a ciertas importaciones, entre otras: (i) de tubérculos de patata de consumo procedentes de Egipto, tras las frecuentes detecciones en laboratorios de la UE de la bacteria *Ralstonia solanacearum* (Foto 7A, B); o (ii) de cítricos de Sudáfrica y de países sudamericanos por la frecuencia de la detección en los mismos de patógenos no presentes en España, como la bacteria *Xanthomonas citri* subsp. *citri* (Foto 7C) o el hongo *P. citricarpa* (Foto 7D). Esto apoya la importancia de la prevención y de los métodos de diagnóstico para salvaguardar la sanidad de los vegetales en todo el territorio de la UE. Pero muchas veces, este tipo de **decisiones políticas de la UE -a las que se llega tras insistentes solicitudes españolas- se toman demasiado tarde**, ya que son muy discutidas por los países del norte o del este de la UE, porque no tienen los mismos intereses agrícolas que los países mediterráneos o del sur de Europa y que aluden a su falta de riesgo al no cultivar las especies vegetales que se introducen. Sin embargo, estos argumentos no tienen en cuenta la posibilidad de que la libre circulación de productos en la UE propicie la diseminación sin freno de los organismos nocivos exóticos a otros países con cítricos, una vez introducidos.

Otro ejemplo de las dificultades de la puesta en marcha de medidas estrictas de PI en países de la UE, como España, es el de la prevención de entrada de nuevos organismos nocivos de los cítricos, porque en este cultivo el paradigma de la GI de plagas (*s. l.*) se ha visto amenazado en la última década con la irrupción de nuevas plagas, como son el cotonet de Sudáfrica, el trips de las orquídeas o los ácaros del género *Eutetranychus*. En lo que llevamos de siglo XXI se han detectado en la citricultura española más de 16 artrópodos fitófagos y patógenos exóticos, y prevenir su introducción o establecimiento es una gran prioridad. El mayor problema actual lo representa la falsa polilla (*Thaumatotibia leucotreta*), la tercera plaga más destructiva del mundo (EPPO, 2022), solo precedida de *X. fastidiosa* y *P. japonica*, y por ello figura como una de las 20 PC prioritarias de la UE. En 2021, un informe de la EFSA encargado por la UE (EFSA, 2021) confirmó lo que se venía observando y denunciando, y era que el conjunto de estrategias de GI en los cítricos de Sudáfrica para controlarla estaba muy lejos de garantizar la ausencia de la plaga que la normativa EU exige, según se acreditó científicamente. Los rechazos acumulados en los puertos de la UE en 2021 ya sumaban 29 partidas infestadas con dicha polilla (18 de Sudáfrica, 10 de la República de Zimbabwe y una de Israel), lo que sugiere que podría haber habido otras muchas introducciones que habrían pasado desapercibidas. Para evitar el problema es necesario que los países exportadores utilicen un tratamiento de frío que está estandarizado internacionalmente -que es el que exigen otras potencias cítrícolas a las exportaciones españolas de mandarinas clementinas-, que garantiza eliminar cualquier riesgo de introducción. Tras propagarse por toda África y llegar a Israel en 1984, nadie discute ya la capacidad de adaptación de *T. leucotreta* al clima de los países mediterráneos. Se trata de una plaga que en el caso de los cítricos provoca una caída prematura y masiva de los frutos y la aparición de infecciones secundarias. Además, es una plaga muy polífaga porque afecta más de 70 plantas huésped, entre ellas a variados cultivos como pimiento, algodón, aguacate, granado, maíz, melocotonero y nectarino (Gilligan y Epstein, 2014; Gilligan y Passoa, 2014). Es más, según advierte el Plan de Contingencia redactado por el MAPA, la “principal vía de entrada de *T. leucotreta* es la importación de frutos”. Los controles visuales en los puertos de entrada o antes, en los campos de origen, no suponen mayor garantía porque las larvas de *T. leucotreta* se alimentan internamente y la mayoría de huéspedes (frutos) presenta síntomas externos difíciles de identificar.

Para la citricultura española, la entrada de *T. leucotreta* sería una grave amenaza porque se ha evaluado que podría provocar unas mermas medias del 26 % de la producción cítrica, sin que su GI sea posible de forma económica en la actualidad en la UE. Tras más de un lustro reivindicando sin éxito el tratamiento de frío -en un proceso en el que han intervenido todos los actores del sector cítrico, desde la investigación hasta las asociaciones de productores españolas, incluyendo todos los poderes políticos -y con la oposición de los comerciantes holandeses y de los países exportadores como Sudáfrica-, por fin en 2022 se logró el hito de la aprobación por parte de UE de la obligatoriedad de dicho tratamiento de frío a las importaciones de naranjas de todos los países que padecen la falsa polilla.

El tipo de medidas de prevención que se citan en este ejemplo deberían ser aplicadas también a otros productos y plagas, porque la sanidad de las plantas o frutos importados de países terceros no está garantizada, ya que en los países de origen no siempre se realizan los análisis con las técnicas adecuadas y con tamaños de muestra suficientemente representativos. Aunque en los países de destino en la UE se realizan inspecciones tras la importación, estas son más bien un control de calidad del sistema, porque se confía demasiado en la fiabilidad de las inspecciones fitosanitarias que realizan los países de origen. El riesgo de introducir los agentes nocivos exóticos citados es alto, y en muchos casos los daños potenciales pueden ser muy importantes, pero en la UE, y especialmente en España, no existe conciencia de ello -con excepciones como la antes citada de los cítricos- por su desconocimiento generalizado.

Además, los resultados de las interceptaciones de *P. citricarpa* o de *X. fastidiosa* en la última década, son ejemplos que ponen en cuestión la fiabilidad de las certificaciones fitosanitarias de muchos países exportadores de los cinco continentes, -tanto de países del primer mundo (como EE. UU.), como sobre todo del tercer mundo-, porque carecen de un sistema fiable de análisis del material vegetal a exportar o evitan aplicar las técnicas más sensibles. La repercusión negativa de tal falta de fiabilidad puede tener graves consecuencias en los países de destino en la UE, cuando se realizan inspecciones fitosanitarias de intensidad insuficiente en razón del interés comercial o basadas en simples e ineficientes observaciones visuales.

Adicionalmente, el diseño de medidas preventivas y de Planes de Contingencia para agentes nocivos exóticos que supongan amenazas potenciales para los cultivos y masas forestales en España, debe tener en cuenta la lista oficial de dichos organismos de la UE, -pero como esta no recoge todos los casos que son de reciente descripción, o los que pueden tener interés solo para algunos cultivos españoles-, es conveniente consultar también las listas actualizadas de organismos nocivos de la EPPO, ICPP-FAO y de otros entes internacionales relacionados con la Sanidad Vegetal.

Para la detección más efectiva en España de los organismos nocivos exóticos en material vegetal procedente de países terceros, es recomendable llevar a cabo la siguiente secuencia práctica de: (i) análisis, -tras la toma de muestra en los puntos de inspección en frontera- que se debe realizar primero por los Laboratorios Nacionales de Referencia (cf., Capítulo C1.); (ii) amplias prospecciones posteriores (postcontrol) por los Servicios de Sanidad Vegetal de las CC. AA., en las zonas y empresas indicadas por los análisis de riesgo; y (iii) análisis de las muestras indicadas en el punto anterior en laboratorios especializados mediante protocolos oficiales validados y practicados por personal experto.

Cuando falla la prevención de la introducción de organismos nocivos exóticos y también su subsecuente erradicación, se deben aplicar programas de contención efectivos. Sin embargo, la ejecución de estos programas en España debiera estar exenta de conveniencia política o presión de sectores concernidos, y basada exclusivamente en acciones de fundamento científico-técnico y análisis de riesgos para prevenir la diseminación de los organismos a otras CC. AA., o zonas de la misma C.A., libres de los mismos. Puesto que los programas de contención tienen el objetivo de reducir drásticamente el número de plantas que deben ser erradicadas, su instauración debería estar estrechamente coordinada por el MAPA junto con el organismo responsable de cada zona, teniendo en cuenta los resultados de las investigaciones realizadas en España u otros países. Dicha reducción supone una permanencia de inóculo que todavía puede poner en grave peligro a los cultivos de zonas cercanas, y debe ser controlada y auditada por organismos y Comités de expertos. Por ello, es muy necesario realizar una divulgación activa e intensiva al gran público, y especialmente a los políticos, técnicos y agricultores, sobre las distintas amenazas de plagas, enfermedades y malas hierbas para cada cultivo debidas a agentes nocivos exóticos. También es conveniente informar con datos científicos de otros países sobre la necesidad y ventajas de llevar a cabo la erradicación rápida de estos organismos, o en su caso de una contención estricta (si aparecen en

nuevas zonas y cuando los conocimientos científicos lo aconsejen), teniendo en cuenta los peligros de su diseminación a corto, medio y largo plazo, pero sabiendo que lo sucedido en un país o territorio en un determinado momento, no siempre es extrapolable a otras circunstancias.

B1.6. La Bioseguridad, una disciplina global

Esta situación de nuevos problemas en la Sanidad Vegetal se comparte en alto grado con la Sanidad Animal, la Humana y la Medioambiental, lo que está conllevando la necesidad de su análisis y remediación globales (Ristaino et al., 2020; 2021). Podría decirse, por tanto, que la **Bioseguridad Vegetal enlaza con la Animal, la Humana y la Medioambiental**, dando lugar al concepto de Bioseguridad intersectorial, de forma paralela al concepto de salud única o circular (*One Health* o *Circular Health* en inglés) que se menciona en otros lugares del presente Libro. Debemos insistir de nuevo que solo el enfoque integrado del problema puede conducir a plantear y aplicar soluciones efectivas y sostenibles a largo plazo, tal como ha resultado evidente y está de sobra demostrado en la gestión de la reciente pandemia humana creada por la diseminación del nuevo coronavirus SARS-CoV-2 causante de la enfermedad conocida como Covid-19.

El término **Bioseguridad** ha sido definido de diversas maneras en la bibliografía científica, técnica y legislativa. La FAO (2007) (https://www.eppo.int/RESOURCES/eppo_standards/pm5_pra) recoge la siguiente, que entendemos es a la vez suficientemente global y ajustada al objeto del presente libro: “Es el conjunto de medidas preventivas que tienen como objeto proteger la salud y seguridad de los animales, vegetales y humanos frente a los diferentes riesgos producidos por agentes biológicos, físicos, químicos y mecánicos”. El término Bioseguridad incluye la investigación, los procedimientos y las políticas que cubren la exclusión, erradicación, mitigación y gestión efectivas de los riesgos creados por la introducción de especies exóticas de plantas, animales y patógenos, así como organismos modificados genéticamente (OMGs) y sus productos. En el objetivo de la Bioseguridad vegetal no solamente se incluyen los ecosistemas agrícolas y forestales, sino también los ecosistemas naturales y seminaturales en toda su extensión, y muy particularmente la biodiversidad de flora y fauna. Una visión general de la Bioseguridad Vegetal en sus diversos apartados y en casos concretos de cultivos y agentes nocivos se puede encontrar en Gordh y McKirdy (2014).

B1.7. La Bioseguridad global exige un marco cooperativo y legislativo internacional

Los primeros tratados internacionales en materia de Sanidad Vegetal se elaboraron a partir de los problemas causados por agentes nocivos concretos en determinados países. Unos de los más llamativos y tempranos en nuestras latitudes fueron los que afectaron a la viticultura europea en la segunda mitad del siglo XIX, por la introducción y expansión de la filoxera, el mildiu y el oídio desde Norteamérica (cf., Capítulo A1., Apartado A1.3.1.1.1.)

A mediados del siglo XX, el aumento incesante de introducciones de especies exóticas de artrópodos fitófagos, patógenos y malas hierbas, y la actividad creciente del comercio de alimentos y otros productos de la actividad primaria, aconsejaron a los gobiernos la creación de instituciones y marcos legislativos internacionales a fin de hacer frente a tales riesgos fitosanitarios. Esa actividad estuvo auspiciada por la FAO. Una de las primeras acciones que realizó la FAO fue la creación en 1952 de la IPPC, que en 2020 ya englobaba 184 países miembros. El principal objetivo de la IPPC, a través de su Comisión de Medidas Fitosanitarias (CPM, *Commission on Phytosanitary Measures*), es asegurar una acción común y efectiva

para prevenir la introducción y diseminación de artrópodos fitófagos, agentes fitopatógenos y malas hierbas de cultivos o sus productos y promover medidas para su control. La Convención es un marco y un foro para la cooperación internacional, intercambio de información técnica y armonización de la legislación, en cooperación con las organizaciones regionales (RPPO) y nacionales (NPPO) de Protección Vegetal. De las diez RPPO existentes actualmente, la que incluye a España junto con los otros países europeos y mediterráneos es la EPPO.

Por otro lado, la Organización Mundial del Comercio (OMC; WTO, *World Trade Organization*) creada en 1995 juega también un papel clave para minimizar los riesgos de Bioseguridad global, especialmente con el impulso del Acuerdo SPS (*SPS Agreement, Application of Sanitary and Phytosanitary Measures*). Este acuerdo permite y obliga a los gobiernos a actuar en el comercio para proteger la salud de personas, animales y plantas de sus países sin utilizar ese objetivo como pretexto para el proteccionismo de sus productos nacionales. El Acuerdo SPS se complementó poco después con la Convención de Biodiversidad Biológica (CBD, *Convention on Biological Diversity*), al comprobar el impacto que tenían las especies exóticas en los ecosistemas no agrícolas, aunque la CBD no tuviera capacidad ejecutiva sobre las legislaciones nacionales. En el año 2000 se complementó la CBD con el protocolo de Cartagena sobre Bioinocuidad (*Biosafety*) para incluir los OMGs entre los organismos cuyos riesgos deben ser evaluados. La actividad reguladora de la OMC y el Acuerdo SPS en Bioseguridad Vegetal se basan en los Estándares Internacionales para Medidas Fitosanitarias (ISPMs, *International Standards for Phytosanitary Measures*) de la IPPC, <https://www.ippc.int/id/ispms>), que no son propiamente reguladores ni de obligado cumplimiento pero sí aconsejables, y que son puestos en práctica cuando los gobiernos incluyen medidas fitosanitarias en sus legislaciones nacionales. Los ISPMs son revisados periódicamente por la Comisión de Medidas Fitosanitarias (CPM) de la IPPC.

B1.8. Análisis de Riesgos para la Bioseguridad Vegetal

La mayor parte de la actividad de los organismos oficiales relacionados con la Bioseguridad mencionados anteriormente se basa en el Análisis de Riesgos para la Bioseguridad (ARB), que debe llevar a cabo la comunidad sanitaria para tomar decisiones de bioseguridad, y en particular la comunidad fitosanitaria en el caso de organismos nocivos para la agricultura, los bosques y el medio natural. La evaluación de riesgos (*Pest Risk Assessment* o PRA) es el ámbito especializado de las ciencias aplicadas que consiste en revisar datos y estudios científicos con el fin de evaluar los riesgos asociados a determinados peligros. Consta de cuatro etapas sucesivas: (i) identificación del peligro para los cultivos; (ii) caracterización del peligro; (iii) evaluación de la exposición; y (iv) caracterización del riesgo. La introducción y la propagación de agentes nocivos exóticos como artrópodos fitófagos, nematodos, bacterias, hongos, oomicetos, virus, viroides y malas hierbas es una amenaza grave, y a menudo se producen en zonas previamente no afectadas, a través de las importaciones de plantas. La evaluación de la probabilidad de que se introduzcan dichos agentes nocivos y de que se propaguen posteriormente en una zona determinada, y la evaluación de sus posibles consecuencias, ayudan a orientar la toma de decisiones sobre las medidas de prevención. Una de las principales tareas de la Comisión Técnica Fitosanitaria (PLH) de la EFSA es realizar evaluaciones del riesgo de plagas (*s. l.*) utilizando una amplia gama de los conocimientos científicos más actuales disponibles. Dicha Comisión comenzó su trabajo en 2006, y a petición de la UE evalúa si debe considerarse la inclusión de un agente nocivo específico en las listas de organismos nocivos de plantas de la UE, mediante la actualización de las clasificaciones de los mismos. No obstante, todos los países de la UE o países terceros suelen realizar ARB para las plagas que consideran amenazas, como el caso de ANSES de Francia para *huanglongbing* (ANSES, 2019). Los análisis que hace la EFSA no incluyen consideraciones sociales o económicas, ya que no forman parte del mandato de la agencia, aunque dichas consideraciones son importantes y muchas veces olvidadas, como ha indicado la FAO.

B1.8.1. Análisis de Riesgos para la Bioseguridad de la introducción de organismos nocivos exóticos

Desde la introducción en 2016 de la nueva ley fitosanitaria (DOUE, 2016), la EFSA ha emprendido una serie de proyectos interconectados para ayudar a los Estados miembros a prepararse frente a futuras amenazas fitosanitarias. Entre ellos se incluyen:

- Exploración para detectar nuevos agentes nocivos a través del seguimiento de medios de comunicación y literatura científica.
- Producción de los “kits de herramientas” para la **vigilancia de agentes nocivos concretos de vegetales**, que recogen orientaciones de inspección, hojas informativas y herramientas estadísticas para ayudar a los Estados miembro a llevar a cabo la vigilancia de dichos agentes en sus territorios y armonizar los métodos de seguimiento en el conjunto de la UE, como se ha hecho para varias PPs de la UE.
- Colaboración en la elaboración de una **lista de PPs para la UE**, según lo exigido por la legislación fitosanitaria.
- Evaluaciones del riesgo de **materias primas vegetales de alto riesgo**. Tal y como exige la ley fitosanitaria, la UE ha elaborado una lista de plantas de alto riesgo cuya entrada en la UE está prohibida.

La Comisión Técnica PLH aplica una metodología cuantitativa de riesgos en su trabajo. Un ejemplo de ello es la evaluación del riesgo para el territorio de la UE de la oruga militar tardía *Spodoptera frugiperda*, un insecto de origen sudamericano que se ha propagado rápidamente en los años 2021 y 2022 en el África subsahariana y se sigue propagando en Asia (EFSA, 2018), y que puede plantear riesgos para el sur de la UE.

En ciertos casos, son los países terceros exportadores a la UE los que intentan bloquear la adopción de medidas preventivas, incluso cuando así lo aconseja el análisis de riesgos de EFSA. Un ejemplo que indica las dificultades de este tipo de procesos es el de la mancha negra o *black spot* causada por *P. citricarpa*, que es la principal enfermedad fúngica de los cítricos a nivel mundial (Foto 5D). Las regiones cítricas de la UE están consideradas actualmente como zonas libres de esta enfermedad, y la legislación fitosanitaria establece medidas para evitar la introducción de dicho hongo en el territorio de la UE, tanto mediante el material vegetativo de propagación –importación que está prohibida desde hace décadas–, como los frutos. La importación de frutos de zonas afectadas debe realizarse cumpliendo con unas medidas fitosanitarias específicas, pero los países del Cono Sur que exportan frutos cítricos a la UE vienen cuestionando de forma sistemática la necesidad de estas medidas, aludiendo principalmente a que según sus ARB el clima de la cuenca del Mediterráneo no es favorable para el desarrollo de la enfermedad. Sin embargo, los análisis climáticos realizados por diversos autores no coinciden en este aspecto (Er et al., 2013; Vicent y García-Jiménez, 2014) y tampoco el realizado por la EFSA (2014), y la reciente detección y extensión de la mancha negra en más de 2.000 ha de cítricos en Túnez han puesto finalmente en evidencia la capacidad de *P. citricarpa* para desarrollarse bajo condiciones climáticas similares a las españolas (Vicent, 2021). Contrariamente a la opinión científica de la EFSA (EFSA, 2014), la UE ha estado varios años rechazando imponer medidas más contundentes a Sudáfrica, a pesar de que en sus envíos cítricos con destino a la UE se produjeron 200 interceptaciones de *P. citricarpa* en 2012-2021, por delante de las interceptaciones en envíos procedentes de Argentina y Uruguay, que en total sumaron 702 detecciones en los últimos 10 años; así como de otros países como la República de Zimbabwe, que acumuló 21 en 2021 posiblemente porque linda con Sudáfrica y mantiene estrechos lazos comerciales con dicho país. Hasta ahora no existe un solo caso

de erradicación con éxito de dicho patógeno tras su introducción en una nueva zona. La evaluación del impacto potencial de la mancha negra en España es un aspecto complejo y con un cierto grado de incertidumbre, pero como afecta a la calidad externa del fruto, su impacto comercial potencial sería mayor en la producción para consumo en fresco y menor en la fruta para industria, destino este último minoritario para la citricultura de nuestro país. La mancha negra de los cítricos ha sido objeto de un intenso debate científico-técnico y político durante los últimos años, pero ya forma parte de las 20 PPs de la UE y se han impuesto las medidas necesarias en los países de origen de las importaciones para prevenir su introducción, que son muy similares a las ya citadas de EE. UU. para prevenir la introducción de *C. capitata* en mandarinas importadas de España.

En la actualidad se sigue mejorando la legislación de la UE para poner más énfasis en el comercio de alto riesgo proveniente de países terceros, la trazabilidad del material de propagación, la vigilancia y la puesta en práctica de medidas para la erradicación temprana de organismos nocivos exóticos, etc., a fin de proteger la agricultura y la silvicultura, el medio natural y la biodiversidad en la UE. Las principales acciones de la UE en materia de bioseguridad vegetal pueden encontrarse en: https://ec.europa.eu/food/plant/plant_health_biosecurity_en

Las NPPOs que deben poner en marcha en todos los Estados miembros las medidas de los Reglamentos de legislación europea (cf., Apartado B1.3.) toman formas administrativas diferentes según los países, pero en general están ligadas a los departamentos gubernamentales de agricultura. En España, las atribuciones en materia de Bioseguridad Vegetal son competencia de la Dirección General de la Sanidad de la Producción Agraria del MAPA, que coordina a los organismos responsables de las distintas CC. AA.

B1.8.2. Análisis de Riesgos para la Bioseguridad de la introducción de organismos exóticos para control biológico

Los modelos de ARB también se han aplicado a casos en los que un organismo exótico es introducido en una nueva región con la previsión de que tenga efectos beneficiosos, como son los **enemigos naturales de los artrópodos nocivos exóticos**. Estos enemigos naturales pueden ser depredadores, parasitoides, o entomopatógenos que se importan desde la región de la que son nativos y se reproducen para ser diseminados en las regiones invadidas por artrópodos fitófagos y agentes fitopatógenos. Esta es una actividad típica del llamado control biológico clásico de plagas (s. l.) agrícolas y forestales, y su puesta en práctica exige que se analicen los costes y beneficios de esa introducción, teniendo en cuenta las alternativas de erradicación y control del organismo exótico introducido en ecosistemas agrícolas, forestales o naturales. La aplicación de agentes biológicos exóticos debe someterse a rigurosos ARBs, ya que se trata, por lo general, de especies potencialmente invasoras, y se evalúa que la relación plaga-enemigo natural sea muy específica para que no afecte a la GI de los cultivos en funcionamiento ni al medio ambiente (cf., Capítulo C4., Apartado C4.5.).

Un caso paradigmático del estudio de ciertos efectos positivos y numerosos negativos de la importación y suelta de enemigos naturales exóticos para control biológico de plagas es el del coccinélido *Harmonia axyridis* (DeClerq y Bale, 2011). Esta mariquita, que tuvo éxito como depredadora de pulgones, es nativa del este de Asia y fue liberada repetidamente en Europa y Norteamérica a principios del siglo XX -aunque las sueltas no se establecieron en Europa hasta la segunda mitad del siglo-; posteriormente se liberó en Sudamérica y su presencia también se detectó en Sudáfrica. Las poblaciones en todas esas zonas presentan una cierta variabilidad genética, que parece indicar la evolución y adaptación según la zona en donde se ha establecido dicho insecto, posiblemente incluso en introducciones accidentales. La observación de impactos negativos sobre el medioambiente a través de la competencia interespecífica y

la depredación intragremial con otros insectos entomófagos, así como los problemas para las plantas e incluso para la salud humana, promovieron el interés por desarrollar procedimientos de ARB de *H. axyridis*, que fueran extrapolables a otros organismos exóticos, en principio beneficiosos. El caso de los efectos negativos de la introducción de *H. axyridis* sirvió para desarrollar métodos que permitieran valorar los riesgos de la introducción de especies exóticas para control biológico clásico (van Lenteren et al., 2006; De Clercq y Bale, 2011).

Un caso reciente de éxito en la introducción de un organismo exótico en España para un programa de control biológico clásico, es el del parasitoide *Tamarixia dryi* con el objeto de controlar las poblaciones de *T. erytrae*, vector de bacterias causantes del huanglongbing de los cítricos -la enfermedad potencialmente más grave y preocupante para la citricultura española en la actualidad-. El vector, que se detectó primero en Canarias y luego en Galicia y Portugal en 2014, se ha extendido por el norte y oeste de estas últimas zonas geográficas desde entonces (Foto 5B-E) (Tena et al., 2021). Esta especie de himenóptero parasitoide se seleccionó porque es la más abundante en el África subsahariana y porque ya fue efectiva en el control del psílido vector cuando se introdujo en la Isla Reunión. En 2017 se recolectaron parasitoides de varios puntos de Sudáfrica, y tras obtener los permisos de importación, se introdujeron en condiciones muy controladas en Canarias y se puso en marcha su cría para poder estudiar su biología y multiplicar sus poblaciones antes de las sueltas. Se demostró que *T. dryi* es un parasitoide específico de *T. erytrae*, por lo que no representa una amenaza para otros insectos nativos de Canarias (Tena et al., 2021). Tras comprobar que los parasitoides introducidos y los criados en laboratorio no contenían organismos nocivos, y especialmente que estaban libres de la bacteria causante del huanglongbing (Morán et al., 2021), en 2018 se realizó la primera suelta experimental de estos parasitoides en Tenerife y se comprobó su gran capacidad de diseminación y unos niveles de parasitismo muy altos en campo. Tras estos resultados, *T. erytrae* se liberó en 2019 en varios puntos de Galicia y Portugal también con éxito, reduciendo notablemente las poblaciones del psílido vector (Tena et al., 2021).

B1.9. Importancia de las disciplinas nucleares de la Sanidad Vegetal en los Análisis de Riesgos para la Bioseguridad Vegetal

Todo ARB debe permitir mitigar la amenaza de introducción y establecimiento de un organismo nocivo exótico, los daños que pueda causar en caso de que finalmente se establezca, e identificar las especies con mayores riesgos para una zona determinada. El ARB suele incluir una evaluación, seguida de la gestión y comunicación de los riesgos (FAO, 2007; https://www.eppo.int/RESOURCES/eppo_standards/pm5_pra). La evaluación de riesgos debe incluir primero una estimación de la probabilidad de que ocurran los efectos adversos y su magnitud, como consecuencia de la introducción y establecimiento del agente nocivo. En esta fase del ARB intervienen las disciplinas nucleares de la Sanidad Vegetal, que básicamente son la Entomología Agrícola y Forestal, la Patología Agrícola y Forestal y la Malherbología (cf., Capítulo A1.), así como sus extensiones para el medio natural. Esas mismas disciplinas van a permitir ponderar las alternativas de control de los agentes nocivos exóticos para la gestión de los riesgos, aunque en la toma de decisiones que se deriven de la evaluación de las alternativas de control también juegan un papel factores ambientales, económicos, jurídicos, políticos y sociales, lo que a menudo conlleva dificultades de consenso entre los expertos en distintas disciplinas. Finalmente, la comunicación de los riesgos supone el intercambio interactivo de información y opiniones a lo largo de todo el proceso de ARB que justifiquen una propuesta o decisión. Además de las disciplinas de Sanidad Vegetal, un ARB sólido debe contar con la participación de otros especialistas, tales como economistas, estadísticos, informáticos o sociólogos. Es particularmente importante que tanto la evaluación como la gestión de los riesgos sean

transparentes y estén basadas en criterios científicos, y que no pretendan enmascarar los intereses comerciales de los países o zonas que las realizan.

Las disciplinas nucleares de la Sanidad Vegetal anteriormente mencionadas deben suministrar información fiable y específica para cada organismo nocivo exótico, y también del nivel de incertidumbre en cada caso, sobre aspectos tales como:

- a) **Disponibilidad de métodos de identificación fiable** de la especie, e incluso subespecie, raza, *forma specialis*, filotipo, *sequence type*, etc., del organismo nocivo.
- b) Herramientas y programas de **detección y vigilancia** de organismos nocivos en los países o zonas objeto del riesgo.
- c) Evaluación de la **vulnerabilidad de los cultivos locales de uno o varios huéspedes** al ataque del organismo nocivo.
- d) **Influencia del clima en la supervivencia, establecimiento y propagación** del organismo nocivo en la zona de riesgo evaluada.
- e) Periodos del año en que el organismo nocivo tiene actividad o está en **quiescencia o dormancia**.
- f) Identificación de posibles **vías de entrada** del organismo en la zona de evaluación.
- g) Anticipación de la **capacidad de diseminación** del organismo en la zona de evaluación.
- h) Conocimiento de **métodos específicos de control** y su eficacia esperable.
- i) **Pérdidas económicas previsible** en los sectores agrario, viverista, industrial, turístico y otros afectados directa o indirectamente por el organismo nocivo, y coste y plazo previsible de los planes de prospección, erradicación, y de los de contención o mitigación del mismo.

B1.10. Fisiología y Ecología de los organismos nocivos exóticos para la evaluación y gestión de riesgos

Los **métodos de identificación fiables** de los organismos nocivos para las plantas, sean artrópodos, bacterias, hongos, oomicetos, virus, viroides, nematodos o malas hierbas, han progresado enormemente en los últimos años, y en ocasiones incluso herramientas de uso relativamente sencillo se han puesto al alcance de los no especialistas, lo que permite el procesado de cantidades notables de muestras vegetales o de sus productos. Del diagnóstico y la identificación de los principales organismos nocivos de la Sanidad Vegetal tratamos en otro capítulo del presente libro y a él remitimos al lector (cf., Capítulo C1.).

En cada una de las disciplinas de la Sanidad Vegetal mencionadas en el Apartado B1.9. se estudian la **Fisiología y Ecología** de los organismos nocivos exóticos cuyo potencial para establecer una población viable en un medio nuevo interesa conocer. Los evaluadores de riesgos de un organismo nocivo exótico deben conocer y comprender cómo responde a los principales factores del nuevo medio y cómo gestionar de forma integrada su manejo.

Dado que una gran mayoría de organismos nocivos exóticos potencialmente implicados en la Bioseguridad Vegetal son ectotérmicos, será crucial **determinar la tolerancia a la temperatura en las distintas fases del ciclo biológico de cada uno**, para evaluar la probabilidad de que se establezca en una nueva región. **La humedad es otro factor crítico**, que interaccionando con la temperatura afecta la actividad, supervivencia y distribución de muchos artrópodos fitófagos, agentes fitopatógenos y malas hierbas, aunque en la bibliografía no hay tantos datos como para la temperatura. Por otra parte, el conocimiento de la respuesta conjunta de un organismo a la temperatura y la humedad nos puede permitir valorar hasta qué punto puede sobrevivir al transporte y almacenamiento de una mercancía, o cómo de efectivo puede ser un tratamiento de la mercancía con frío o calor a determinada humedad relativa.

Asimismo, **un buen conocimiento del ciclo biológico completo** de cada organismo nocivo exótico y de todas sus fuentes de inóculo y reservorios, ayudará a ganar fiabilidad en la evaluación y gestión de riesgos. La fenología de las poblaciones de organismos nocivos exóticos en relación con sus huéspedes potenciales, nos indicará la probabilidad de que ciertos estados del desarrollo de dichos organismos puedan encontrar cultivos o masas forestales susceptibles de ser atacados en un momento determinado, y por lo tanto que la probabilidad de su establecimiento varíe a lo largo del año. **La coincidencia en el tiempo de los estados fenológicos favorables de la planta huésped y del organismo nocivo exótico aumentará el riesgo de establecimiento de este**, en particular si posee una capacidad alta de diseminación y reproducción. Este es el caso de muchas especies de pulgones, en particular de aquellas con amplia polifagia y capacidad partenogenética, que además de ser plagas importantes, son habituales vectores de virus fitopatógenos. Un ejemplo de esos últimos son los pulgones de cereales.

La dinámica de poblaciones o la epidemiología del organismo nocivo exótico en relación con el medio en donde evaluamos el riesgo de su introducción **permitirá estimar las tasas esperables de crecimiento poblacional para plagas y malas hierbas o el área bajo la curva de progresos de la enfermedad (AUDPC)**, según las condiciones que puede encontrar el organismo nocivo en la nueva región o territorio. La competencia con otras especies por los huéspedes y otros recursos, o la presencia de organismos antagonistas y las relaciones que establezca con ellos, son informaciones que precisamos conocer con rigor y que deben suministrarnos las disciplinas de la Sanidad Vegetal. Es necesaria, por tanto, la colaboración de científicos expertos en todas esas disciplinas y que puedan aplicarlas para evaluar riesgos, predecir consecuencias o aconsejar medidas de gestión para mitigar sus efectos. En ocasiones esa información no está disponible, en particular cuando el organismo nocivo exótico procede de zonas con escaso desarrollo de la investigación científica. En este caso puede ser útil la comparación de las características de la zona de origen del organismo nocivo con las de la nueva región para la cual se está evaluando el riesgo.

B1.10.1. Dificultades prácticas del Análisis de Riesgos para la Bioseguridad Vegetal

En general, el ARB suele ser muy diferente en sus evaluaciones y conclusiones según el tipo de organismo nocivo exótico y dependiendo del país, según sea importador o exportador, que realiza dicho análisis. Cuando se realiza el ARB de un organismo no presente en un país, la tendencia en el ARB es extremar el riesgo, y en cambio, cuando el organismo ya está presente en un territorio, las evaluaciones tienden a minimizar el riesgo al disminuir la incertidumbre. Todo ello es posible dada la cantidad y variabilidad de los datos que se manejan, y para dar rápidamente una idea de la complejidad e incertidumbre del ARB y de la necesidad del conocimiento científico para ello, digamos que incluso las variaciones intraespecíficas pueden hacer cambiar los resultados del análisis de riesgos, como se ha concluido en la familia de las moscas de la fruta *Tephritidae* a la que pertenecen

plagas con muchas especies invasoras y algunas de ellas con divergencia intraespecífica de nichos y, por tanto, con potenciales distintos de establecimiento en una nueva región (Godefroid et al., 2015).

La existencia de modelos universalmente validados añadiría transparencia y comparabilidad a los procesos de ARB. También permitiría analizar de manera fundamentada las inversiones en sistemas de bioseguridad y en la toma de decisiones sobre la materia. Desgraciadamente, esa herramienta no está hoy en día disponible con suficiente fiabilidad. Un ejemplo de la utilidad de los modelos bioeconómicos lo dan Liu et al. (2011), donde el análisis económico de las inversiones en bioseguridad en función de la sensibilidad social hacia las consecuencias del establecimiento de organismos nocivos exóticos hace ver la priorización de las inversiones para prevenirlos. Sin embargo, la modelización ha tenido un mayor desarrollo para aspectos parciales de los ARBs, como es la predicción de la distribución e impacto de organismos nocivos exóticos en nuevas regiones, campo de amplia aplicación en el estudio del efecto del Cambio Climático en la distribución e impacto de plagas, enfermedades y malas hierbas en los cultivos, ya sea en zonas nuevas o en las zonas de las que los organismos son nativos (Donatelli et al., 2017; Hill y Thomson, 2015). Remitimos al Capítulo sobre el Cambio Climático (cf., Capítulo B2.) para ver qué modelos se están utilizando hoy en día para predecir la distribución de una especie invasora en nuevas regiones. Esos mismos modelos se utilizan también para estimar la probabilidad de establecimiento y diseminación de organismos nocivos exóticos en regiones nuevas en el caso de ser introducidos (p. ej., Godefroid et al., 2015). Conocer los factores que determinan la mayor o menor emergencia de enfermedades, plagas y malas hierbas y comprender la naturaleza de su influencia sobre aquellas, ayudará sin duda a mejorar las expectativas para interferir dichos procesos.

La investigación realizada en España sobre la Fisiología y Ecología de agentes nocivos exóticos ha sido escasa y se ha llevado a cabo a través: (i) de la participación española en programas con financiación europea o internacional; (ii) los proyectos puntuales de investigación con financiación nacional; y (iii) el voluntarismo y compromiso de determinados grupos de investigación propiciado por fondos propios o remanentes de otros proyectos. Por ello, y ante la amenaza real que dichos agentes representan para la agricultura española, los organismos nacionales públicos o privados financiadores de la I+D+i deberían implicarse en mayor extensión en la financiación de proyectos de investigación sobre estos agentes nocivos exóticos.

B1.10.2. Factores asociados con la introducción de organismos nocivos y emergencias de nuevas plagas

La introducción de agentes nocivos exóticos es propiciada por el incremento del comercio internacional de plantas y productos vegetales, a cuyos efectos han de sumarse los insuficientes controles fitosanitarios en frontera, en los que la inspección efectiva se ha estimado que alcanza solo del 2 al 6 % del material en tránsito (Carvajal-Yepes et al., 2019), y la ineficiente certificación sanitaria del material vegetal, cuya repercusión negativa es incrementada por la desaparición de barreras fitosanitarias (López et al., 2019). De hecho, entre los investigadores concernidos por esta problemática se considera de forma generalizada que, en materia de Sanidad Vegetal, se ha preferido hasta ahora que prevalezca el libre comercio internacional frente al principio de precaución y el riesgo que implica el transporte de material vegetal infectado (IUFRO Montesclaros Declaration, 2011, <http://www.iufro.org/>; Jung et al., 2016; McDonald y Stukenbrock, 2016).

El potencial de devastación de las introducciones de agentes nocivos exóticos en nuevas áreas subyace en el concepto biológico de que aquellas propician reencuentros entre parásitos y plantas huésped

que no han coevolucionado con ellos y, en consecuencia, no han desarrollado la resistencia que favorece la presión de selección que aquellos ejercen. Además, la significación de las introducciones de agentes nocivos exóticos puede trascender la sola ocurrencia de una nueva plaga o enfermedad en uno o varios cultivos en el país o área de introducción. Por ejemplo, en el caso de hongos y oomicetos fitopatógenos exóticos, su introducción en nuevas áreas geográficas tiene el **potencial de propiciar el desarrollo de híbridos interespecíficos portadores de nuevas capacidades patogénicas**. Tal es el caso de: (i) el híbrido entre las royas *Melampsora medusae* y *M. occidentalis*, que es patogénico sobre especies de álamos (*Populus* spp.) resistentes a *M. occidentalis*; (ii) el híbrido entre *Phytophthora cambivora* y *P. fragariae* (= *P. alni*), que es patogénico sobre alisos no susceptibles a ambos parentales; y (iii) el formado entre *Verticillium dahliae* y otras especies de *Verticillium* (= *V. longisporum*), que es patogénico sobre crucíferas resistentes a ambos (Brassier, 2000; Clewes y Barbara, 2008). Según el primero de dichos autores, la propensión al desarrollo de híbridos interespecíficos entre las especies exóticas y las autóctonas de las que han estado geográficamente aisladas es consecuencia de la debilidad de las barreras genéticas entre ellas, comparada con la fortaleza de las existentes entre especies que comparten área geográfica.

Por otra parte, la **importación de plantas en sustratos** constituye un riesgo especialmente relevante por la facilidad con que se pueden introducir **especies nocivas exóticas escasamente especializadas patogénicamente** -como *Phytophthora ramorum* (cf., Foto 2B, Capítulo A1., Apartado A1.3.1.1.4.) - que causan **nuevas enfermedades en plantas huésped hasta ahora desconocidas**. Por ejemplo, en un estudio sobre *Phytophthora* spp. prevalentes en viveros y centros de jardinería de plantas ornamentales en la Comunidad Valenciana y las Islas Baleares durante 2001-2006 (Moralejo et al., 2009), se diagnosticaron 17 especies de *Phytophthora* de las que cinco no habían sido descritas formalmente antes de 2001, y los subsiguientes ensayos de patogenicidad en una diversidad de plantas de interés viverista **identificaron 28 combinaciones planta-patógeno entre dichas *Phytophthora* spp. y las especies de ensayo, que eran desconocidas hasta entonces**. La magnitud de las introducciones de especies exóticas de *Phytophthora* -así como de nuevas asociaciones patogénicas de ellas- fue puesta de manifiesto por Jung et al. (2016), en un estudio de diagnóstico masivo que incluyó muestreos de 732 viveros de plantas forestales y 2.525 masas forestales en 23 países europeos entre 1972 y 2013. Este estudio detectó 68 especies/taxones de *Phytophthora* -de las que al menos 47 eran exóticas- y reveló 297 y 407 nuevas asociaciones entre *Phytophthora* spp. y plantas en los viveros y masas forestales muestreados, respectivamente.

El incremento de introducciones de agentes nocivos exóticos ha llevado a un grupo internacional de expertos a **proponer un Sistema Global de Vigilancia (*Global Surveillance System, GSS*) de agentes nocivos de cultivos**, en una estrategia similar a la de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y los Centros para el Control y Prevención de Enfermedades de los EE. UU para la sanidad pública humana, a fin de facilitar el desarrollo de respuestas globales y rápidas a las nuevas amenazas de la Sanidad Vegetal (Carvajal-Yepes et al., 2019). El GSS se basa en el **establecimiento de cinco centros regionales a nivel global que comprenderían redes de laboratorio de diagnóstico, análisis de datos, análisis de riesgo, gestión operacional, y comunicaciones, considerando como prioritarios seis grandes cultivos alimentarios** (arroz, yuca, judía, maíz, patata y trigo). Su puesta en marcha requeriría el fortalecimiento e interconexión de redes de "vigilancia activa/específica" -incluyendo personal y laboratorios implicados en la detección de agentes nocivos sujetos a regulación cuarentenaria-, así como de redes de "vigilancia pasiva/general" -incluyendo agentes de extensión, investigadores y profesores en centros de investigación y universidades, técnicos del sector fitosanitario, etc.-, que están implicadas en la detección y diagnóstico general de dichos agentes nocivos exóticos, y a menudo son los primeros en observar y detectar el desarrollo epidémico de los mismos.

B1.11. Fuentes de información sobre organismos exóticos nocivos

La cantidad, aunque no siempre la calidad, de la bibliografía con información y datos sobre los organismos nocivos exóticos que han invadido un país o los que presentan un alto riesgo de establecerse próximamente, ha aumentado considerablemente en el siglo XXI. No obstante, en este apartado solo se citan las páginas web más relevantes y con más amplia información general sobre los distintos tipos de organismos nocivos.

De todas las fuentes de información, actualmente la más completa y amplia probablemente es la que ofrece la EPPO, porque en su web (<https://gd.eppo.int>) se puede encontrar gran cantidad de datos acerca de los agentes nocivos exóticos para la agricultura y la silvicultura, ya sean especies no introducidas o establecidas en ninguna parte del territorio EPPO (Europa y Mediterráneo) (lista de especies A1), o las que lo son en una parte reducida del mismo (lista de especies A2). En dicha web se da amplia información de las principales especies cuarentenarias (bacterias, hongos, oomicetos, virus y viroides, artrópodos y nematodos) contenidas en las listas A1 o A2, incluyendo su distribución actual, plantas y cultivos huésped, biología, métodos para la detección e identificación, medios de diseminación, importancia económica, medidas fitosanitarias, fuentes bibliográficas e imágenes. Es relevante recordar que la EPPO no es un organismo con capacidad legislativa, sino que proporciona información científica actualizada a sus Estados miembros y tiene relación con los NPPO de los mismos, concretamente en España con el MAPA.

La IPPC de la FAO también proporciona información científica y protocolos a nivel más general y en la última década está bastante coordinada con la EPPO, pero actúa a nivel global, no concentrada en una región geográfica como la EPPO. CABI es otro organismo internacional que en su *Invasive Species Compendium* (<https://www.cabi.org/ISC>) presenta fichas e imágenes tanto de especies invasoras (exóticas) como de especies nativas y de plagas (que allí se define como cualquier especie, cepa o biotipo de planta, animal o agente patógeno dañino para las plantas o productos vegetales).

A otro nivel, en el Capítulo 2.2 del Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España (López et al., 2019) también se puede encontrar información y bibliografía sobre las principales especies de organismos nocivos exóticos, incluidas las malas hierbas, que suponen un riesgo para la agricultura, los bosques o los espacios verdes urbanos o naturales españoles, y que han aparecido en los últimos años. También de aquellos que representan una seria amenaza de entrada y de establecimiento por haber sido detectados o causar problemas en países cercanos o con similares cultivos y características.

B1.12. Más sombras que luces: perspectivas de la prevención y la gestión de los organismos nocivos exóticos

En un mundo globalizado como el actual es previsible que los problemas causados por organismos nocivos en otros países, más pronto o más tarde, serán también problema para la UE, y por lo tanto para la agricultura o silvicultura españolas, y hay que prevenirlos de la forma más integrada posible.

En esta prevención efectiva de nuevas introducciones de artrópodos fitófagos, agentes fitopatógenos y malas hierbas exóticos en los cultivos o masas forestales hay actualmente en España y en la UE más sombras que luces. Ello es debido a numerosas razones entre las que se encuentran: (i) la falta de información fiable, porque los organismos nocivos exóticos de plantas no siempre se notifican en todos los países, en algunos casos por falta de expertos y en otros porque se teme la repercusión social y política de las nuevas detecciones; (ii) que las áreas del mundo con mayor frecuencia de aparición e identificación de organismos nocivos exóticos de plantas a menudo se encuentran en los países desarrollados, sim-

plemente debido a que se dedican más fondos para investigar en Sanidad Vegetal y realizar y publicar trabajos en este tema, pero posiblemente estén presentes también en otras zonas de países con los que se mantienen relaciones comerciales; (iii) que los responsables políticos en la mayoría de los Estados no son conscientes de que los sistemas mundiales de vigilancia de las plagas y enfermedades de las plantas son esenciales, ya que la producción de alimentos agrícolas está estrechamente vinculada a la salud humana y animal; (iv) que la inversión en PI de plagas agrícolas y forestales no se considera como una inversión rentable a corto, medio y largo plazo y no se pone realmente en marcha en la mayoría de los países, con excepciones como EE. UU. y la UE en la última década; y (v) que es necesario incrementar de forma exponencial el intercambio de datos y desarrollar protocolos estandarizados y evaluados en los distintos países para la vigilancia en tiempo real de la presencia de organismos nocivos exóticos, todo ello con objeto de mejorar la rapidez y la precisión de la notificación de brotes de los mismos a nivel mundial, y así lograr incrementar la seguridad alimentaria de todas las naciones.

La triste realidad es que, a menudo, los mapas de la distribución geográfica de organismos nocivos exóticos son más representativos de dónde están activos los proyectos y los científicos expertos en el tema, que de dónde están realmente emergiendo las plagas, enfermedades o malas hierbas. Además, hay muchas consideraciones políticas en torno a quien debería informar legítimamente sobre los brotes de este tipo de organismos y sobre quien tiene acceso a esa información. Los países suelen ser reacios a informar sobre brotes de nuevas enfermedades, plagas o malas hierbas debido a las posibles consecuencias económicas, incluidas las barreras para los mercados de exportación a nivel regional o nacional, y sobre todo para las exportaciones a nivel internacional. Esto ocurre en países de los cinco continentes, incluso de la UE, porque suele resultar muy rentable a corto plazo no declarar la presencia de un organismo nocivo exótico y seguir exportando. En este sentido, se deberían definir con claridad las zonas realmente (y no solo políticamente) libres de los distintos patógenos, tanto en la UE como en países terceros tras intensivas prospecciones y análisis con metodologías EPP0, IPPC, etc.

También se deberían limitar al mínimo imprescindible las importaciones de países en los que están presentes los organismos nocivos de riesgo, aunque las importaciones tengan la documentación en regla. Hay que ser conscientes de que el interés económico de los países exportadores, especialmente africanos, asiáticos y centroamericanos, y de algunos países importadores y exportadores, como Holanda, es elevado y hay que insistir que las meras observaciones visuales son insuficientes para garantizar la calidad fitosanitaria. Además, es importante señalar que en algunos países terceros es evidente la carencia de expertos para la realización de análisis fiables del material a exportar y que la UE no realiza inspecciones previas en origen en ningún país. Ese tipo de prevención la realizan muchos países importadores especialmente EE. UU., y muchas veces se han solicitado por parte de España y de otros Estados miembros de la UE inspecciones similares para casos muy concretos, sin éxito.

Se hace necesario estudiar en las condiciones españolas el papel de los múltiples factores relacionados con la PI de cada organismo cuarentenario o regulado, ya que solo de ese modo se podrá llegar a diseñar Planes de Contingencia, que son imprescindibles, así como estrategias de erradicación, contención y gestión, basadas en el conocimiento científico. Es esencial concienciar a agricultores y proveedores de material vegetal de la importancia de mantener España libre de organismos nocivos exóticos mediante la exigencia de verdadera certificación fitosanitaria, más allá de la basada en observaciones visuales. Además, en la UE continúan siendo asignaturas pendientes: (i) la realización de rigurosos controles en fronteras similares a los de Australia, Chile, Cuba, EE. UU. o Nueva Zelanda, que impidan la introducción ilegal de cualquier tipo de material vegetal; (ii) la vigilancia del comercio del material vegetal por internet; y (iii) la persecución activa de las importaciones ilegales.

En las tareas de información y divulgación están muy implicados los Servicios de Sanidad Vegetal de las CC. AA., cuya financiación debería ser incrementada tanto en personal como en gastos de funcionamiento para poder realmente cumplir con la PI de todas las plagas cuarentenarias y reguladas que representan un riesgo para nuestra agricultura y silvicultura, y no solo de algunas PPs. También juegan un papel importante en ello las Agrupaciones para Tratamientos Integrados en Agricultura (ATRIAS) y las Agrupaciones de Defensa Vegetal (ADVS), u otras que dispongan de técnicos en contacto diario con los agricultores. En la PI también son esenciales los Laboratorios Oficiales de Diagnóstico de que disponen las CC. AA., que tienen el apoyo de los Laboratorios Nacionales de Referencia (cf., Capítulo C1), cuyo personal debe ser estable y bien formado como corresponde a la gran responsabilidad de su papel en la PI.

Es acuciante la necesidad de **fomentar la investigación interdisciplinar e internacional** mediante colaboraciones con distintos países en los que se conocen bien las graves plagas, enfermedades o malas hierbas no presentes en España. También es necesaria la **colaboración entre distintos organismos de las CC. AA., la coordinación entre las mismas y las Universidades**, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y otros organismos públicos de investigación y de transferencia de resultados. Se debe insistir desde todo tipo de tribunas en la necesidad de realizar prospecciones, al menos sobre los organismos nocivos exóticos de mayor riesgo en todas las CC. AA., y en que se debe investigar sobre ellos y disponer de laboratorios de bioseguridad especializados. Hay que ser conscientes de que prevenir es mejor que intentar la GI de dichos organismos *a posteriori*, dada su dificultad y las limitadas posibilidades de éxito. Con la precariedad actual de recursos y la escasa rentabilidad de la mayoría de los cultivos españoles, estos nuevos problemas podrían causar en algunas zonas de España desastres socioeconómicos y/o medioambientales de consecuencias irreparables.

Los estudios sobre la distribución geográfica de organismos nocivos exóticos, y su prevalencia, indican que ambas están muy influidas por las modificaciones medioambientales asociadas al Cambio Climático, pero los efectos precisos de estas sobre el desarrollo y gravedad de dichas agentes nocivos son todavía inciertos, en muchos casos. No obstante, las evidencias predominantes indican que dichas modificaciones medioambientales contribuyen a las emergencias de nuevas enfermedades, plagas y malas hierbas como consecuencia del establecimiento de los agentes exóticos que las causan en latitudes mayores (v. gr., extensión hacia los polos) y del reencuentro con nuevos huéspedes (cf., Capítulo B2.).

La investigación sobre las mejores medidas para una erradicación rápida y para optimizar su eficacia será especialmente necesaria para los organismos nocivos de alto riesgo, dada la oposición de ciertos sectores sociales a las medidas dirigidas a la erradicación de las plagas, enfermedades o malas hierbas. Esto hace que las instituciones educativas y los organismos públicos y privados de investigación, así como las sociedades científicas, tengan todavía un largo trecho por recorrer para **propiciar que la ciencia permee en la sociedad, y para que las decisiones políticas para afrontar los problemas fitosanitarios graves que amenazan nuestra agricultura y silvicultura, y por ende a nuestro bienestar, se basen en el conocimiento y no solo en las opiniones** (Landa et al., 2016) o en las prioridades políticas.

El valor socioeconómico de la agricultura española es más que relevante y también lo son sus masas forestales que, junto a determinados cultivos o árboles singulares, juegan un importante papel paisajístico de interés turístico, cultural, social e histórico en muchos casos. Preservar este patrimonio agrícola y medioambiental es misión de la sociedad, y en particular de sus responsables políticos y técnicos de Sanidad Vegetal. Por ello, hay que evitar riesgos graves mediante el incremento de la investigación científico-técnica, así como la temprana aplicación de los protocolos de erradicación o de contención más apropiados basados en el conocimiento científico y en la experiencia de otros países. Todo ello en aras de prevenir consecuencias negativas a medio o largo plazo en cultivos y/o masas forestales estratégicas,

que tendrían un elevado impacto social y económico, y causarían un daño imprevisible a la agricultura y silvicultura, al paisaje y al acervo cultural e histórico de nuestro país.

B1.13. Bibliografía

- Anderson, P.K., Cunningham, A.A., Patel, N.G., Morales, F.J., Epstein, P.R., y Daszak, P. 2004. Emerging infectious diseases of plants: pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends Ecol. Evol.* 19: 535-544.
- Anónimo. 1968. *Plant-Disease Development and Control. Principles of Plant and Animal Pest Control*, Vol 1. Plant National Academy of Sciences. Washington, D.C. 205 págs.
- ANSES. 2019. Saisine n° 2016-SA-0235 - HLB Rapport d'expertise collective. Comité d'experts spécialisé. Risques biologiques pour la santé des végétaux. Groupe de travail HLB. ANSES Paris, France.
- BOE. 2013. Real Decreto 630/2013, de 2 de agosto, por el que se regula el Catálogo español de especies exóticas invasoras. *Boletín Oficial del Estado* núm. 185, de 5 de agosto de 2013.
- Brassier, C. 2000. Plant Pathology: The rise of hybrid fungi. *Nature* 405: 134-135.
- Carvajal-Yepes, M., Cardwell, K., Nelson, A., Garrett, K.A., Giovanni, B., Saunders, D.G.O., Kamoun, S., Legg, J.P., Verdier, V., Lessel, J., Neher, R.A., Day, R., Pardey, P., Gullino, M.L., Records, A.R., Bextine, B., Leach, J.E., Staiger, S., y Tohme, J. 2019. A global surveillance system for crop diseases: Global preparedness minimizes the risk to food supplies. *Science* 364: 1237-1239. <https://doi.org/10.1126/science.aaw1572>.
- Clewes, E., y Barbara, D.J. 2008. Two allopolyploid ascomycetes fungal pathogens were not rescued by vertical transmission. *New Phytol.* 177: 583-585.
- Coscollá, R. 2004. *Residuos de plaguicidas en alimentos vegetales*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 205 págs. ISBN: 9788471144416.
- De Clercq, P., y Bale, J.S. 2011. Risks of invertebrate biological control agents - *Harmonia axyridis* as a case study. Págs. 243-255, en: R.U. Ehlers, ed. *Regulation of Biological Control Agents*. Springer. Dordrecht <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3664-3>.
- DOCE. 2000. Directiva 2000/29/CE del Consejo, de 8 de mayo del 2000, relativa a las medidas de protección contra la introducción en la Comunidad de organismos nocivos para los vegetales o productos vegetales y contra su propagación en el interior de la Comunidad. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas* L 169:1-112.
- <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2000L0029:20090303:ES>.
- Donatelli, M., Magarey, R.D., Bregaglio, S., Willocquet, L., Whish, J.M.P., y Savary, S. 2017. Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems. *Agric. Syst.* 155: 213-224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.019>.
- DOUE. 2016. Reglamento (UE) 2016/2031 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de octubre de 2016, relativo a las medidas de protección contra las plagas de los vegetales, por el que se modifican los Reglamentos (UE) n° 228/2013, (UE) no 652/2014 y (UE) no 1143/2014 del Parlamento Europeo y del Consejo y se derogan las Directivas 69/464/CEE, 74/647/CEE, 93/85/CEE, 98/57/CE, 2000/29/CE, 2006/91/CE y 2007/33/CE del Consejo *Diario Oficial de la Unión Europea* L 317:4-104. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/ALL/?uri=CELEX:32016R2031>.
- DOUE. 2019a. Reglamento (UE) 2019/1702 de la Comisión de 1 de agosto de 2019 por el que se completa el Reglamento (UE) 2016/2031 del Parlamento Europeo y del Consejo estableciendo una lista de plagas prioritarias. *Diario Oficial de la Unión Europea* L 260: 1-10. http://data.europa.eu/eli/reg_del/2019/1702/oj.
- DOUE. 2019b. Reglamento de Ejecución (UE) 2019/1715 de la Comisión de 30 de septiembre de 2019 por el que se establecen las normas para el funcionamiento del sistema de gestión de la información sobre los controles oficiales y sus componentes. *Diario Oficial de la Unión Europea* L 261: 37-96. http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2019/1715/oj.
- DOUE. 2021. Reglamento de Ejecución (UE) 2021/2285 de la Comisión, de 14 de diciembre de 2021, por el que se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/2072 por lo que respecta a la lista de plagas, prohibiciones y requisitos para la introducción y el traslado en la Unión de vegetales, productos vegetales y otros objetos, y por el que se derogan las Decisiones 98/109/CE y 2002/757/CE y los Reglamentos de Ejecución (UE) 2020/885 y (UE) 2020/1292. *Diario Oficial de la Unión Europea* L 458: 173-458. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32021R2285>.
- EFSA PLH Panel (EFSA Panel on Plant Health). 2014. Scientific Opinion on the risk of *Phyllosticta citricarpa* (*Guignardia citricarpa*) for the EU territory with identification and evaluation of risk reduction options. *EFSA Journal* 12: 3557, 243 págs. doi:10.2903/j.efsa.2014.3557. <http://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/doc/3557.pdf> EPPO (2002).
- EFSA PLH Panel (EFSA Panel on Plant Health). 2018. Scientific Opinion on the pest risk assessment of *Spodoptera frugiperda* for the European Union. *EFSA Journal* 16: 5351, 120 págs. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5351> ISSN:1831-4732.
- EFSA PLH Panel (EFSA Panel on Plant Health). 2021. Scientific Opinion on the commodity risk assessment of *Citrus* L. fruits from South Africa for *Thaumatotibia leucotreta* under a systems approach. *EFSA Journal* 19: 6799, 63 págs. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6799>.
- EPPO. 2022. Global Database, *Thaumatotibia leucotreta*. Visitado el 10 de junio de 2022: <https://gd.eppo.int/taxon/AR-GPLE> EPPO (2011). *Thaumatotibia leucotreta* (Lepidoptera: Tortricidae, False codling moth. EPPO RS 2011/100. https://www.eppo.int/QUARANTINE/Alert_List/insects/thaumatotibia_leucotreta.htm

- Er, H.L., Roberts, P.D., Marois, J.J., y van Bruggen, A.H.C. 2013. Potential distribution of citrus black spot in the United States based on climatic conditions. *Eur. J. Plant Pathol.* 137: 635-647. <https://doi.org/10.1007/s10658-013-0276-6>.
- EUROPHYT. 2019. Plant Health Interceptions. Annual interceptions. 2018. <https://doi.org/10.2875/830026>
- FAO. 2007. Instrumentos de la FAO sobre la Bioseguridad. 148 pp. FAO, Rome. <http://www.fao.org/3/a1140s/a1140s.pdf>.
- FAO. 2019. Vigilancia fitosanitaria: Guía para comprender los principales requerimientos de los programas de vigilancia para las organizaciones nacionales de protección fitosanitaria. Versión 1.1. FAO, Roma. <http://www.fao.org/publications/card/es/c/CA3764ES/>
- FAO. 2020. Libro de Actividades- Plantas Sanas, Planeta Sano. Roma. ISBN: 978-92-5-132852-1. <https://doi.org/10.4060/ca9327es>.
- FAO. 2021. Climate change fans spread of pests and threatens plants and crops, new FAO study. FAO News. Article. Roma. <https://www.fao.org/news/story/en/item/1402920/icode/>
- Fisher, M.C., Henk, D.A., Briggs, C.J., Brownstein, J.S., Madoff, L.C., McCraw, S.L., y Gurr, S.J. 2012. Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health. *Nature* 484: 186-194.
- Gilligan, T.M., y Epstein, M.E. 2014. Screening aid: False codling moth, *Thaumatotibia leucotreta* (Meyrick). Identification Technology Program (ITP), USDA-APHIS-PPQ-S&T, Fort Collins, CO. 6 págs. http://idtools.org/screeningaid/leps/low/Thaumatotibia_leucotreta_LoRes.pdf.
- Gilligan, T.M., y Passoa, S.C. 2014. LepIntercept, an identification resource for intercepted Lepidoptera larvae. Identification Technology Program (ITP), USDA/APHIS/PPQ/S&T, Fort Collins, CO. 5 págs.
- Giné Ribó, J., González Zapater, F.J., y Dalmau Sorlí, F. 2019. La Sanidad Vegetal en las Comunidades Autónomas. Págs. 85-102, en: R.M. Jiménez-Díaz y M.M. López González, eds. Libro Blanco de la Sanidad Vegetal Española. UCO-Press. Editorial Universidad de Córdoba. Córdoba. ISBN: 9788499274553.
- Godefroid, M., Cruaud, A., Rossi, J.-P., y Rasplus, J.-Y. 2015. Assessing the risk of invasion by Tephritid fruit flies: Intraspecific divergence matters. *PLoS ONE* 10: e0135209. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135209>.
- Gordh, G., y McKirdy, S. 2014. The Handbook of Plant Biosecurity. Principles and Practices for the Identification, Containment and Control of Organisms that Threaten Agriculture and the Environment Globally. Springer. Dordrecht. DOI: 10.1007/978-94-007-7365-3.
- Hill, M.P., y Thomson, L. 2015. Species distribution modelling in predicting response to climate change. Págs. 16-37, en: C. Björkman y P. Niemelä, eds. Climate Change and Insect Pests. CABI. Wallingford, Oxfordshire OX10 8DE. UK. DOI: 10.1079/9781780643786.000.
- Iannone, B.V., Carnevale, S., Main, M.B., Hill, J.E., McConnell, J.B., Johnson, S.A., Enloe, S.F., Andreu, M., Bell, E.C., Cuda, J.P., y Baker, S.M. 2021. Invasive species terminology: standardizing for stakeholder education. *J. Ext.* 58: Article 27. <https://tigerprints.clemson.edu/joe/vol58/iss3/27>
- Jung, T., Orlikowski, L., Henricot, B., Abad-Campos, P., Aday, A.G., Aguin Casal, O., Bakonyi, J., Cacciola, S.O., et al. 2016. Widespread *Phytophthora* infestations in European nurseries put forest, semi-natural and horticultural ecosystems at high risk of *Phytophthora* diseases. *Forest Pathol.* 46: 134-63.
- Kamoun, S., Talbot, N.J., e Islam, M.T. 2019. Plant health emergencies demand open science: Tackling a cereal killer on the run. *PLoS Biol.* 17: e3000302. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000302>.
- Lance, D.R., Woods, W.M., y Stefan, M. 2014. Invasive insects. Págs. 447-484. En: G. Gordon y S. McKirdy, eds. The Handbook of Plant Biosecurity. Springer. Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7365-3>.
- Landa, B.B., Marco-Noales, E., y López, M.M. 2017. Enfermedades causadas por la bacteria *Xylella fastidiosa*. Monografías Cajamar. Almería.
- Landa, B., Navas Cortés, J.A., López, M.M., y Jiménez Díaz, R.M. 2016. Una llamada a la sensatez... y la necesidad de apreciar y valorar la evidencia científica sobre *Xylella fastidiosa*. *Phytoma España* 276: 12-13.
- Liu, S., Sheppard, A., Kriticos, D., y Cook, D. 2011. Incorporating uncertainty and social values in managing invasive alien species: a deliberative multi-criteria evaluation approach. *Biol. Invasions* 13: 2323-2337.
- López, C. y Eizaguirre, M. 2019. Diapause and biological cycle of *Cydalima perspectalis* in the eastern Pyrenees. *J. Appl. Entomol.* 143: 1096-1104.
- López, M.M., Vicent, A., Cambra, M., Sorribas, F.X., del Estal, P., y Recasens, J. 2019. Agentes exóticos que representan amenazas potenciales para sectores productivos y masas forestales, estratégicos para la economía española. Págs. 387-439, en: R.M. Jiménez-Díaz y M.M. López González, eds. Libro Blanco de la Sanidad Vegetal Española. UCO-Press. Editorial Universidad de Córdoba. Córdoba. ISBN: 9788499274553.
- Maloy, O.C. 1993. Plant Disease Control: Principles and Practices. John Wiley and Sons, Inc. Nueva York.
- MAPA. 2019. La nueva reglamentación europea relativa a la sanidad vegetal. Reglamento (UE) 2016/2031. Dirección General de Sanidad de la Producción Agraria. Subdirección General de Sanidad e Higiene Vegetal y Forestal. Madrid. https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sanidad-vegetal/resumennuevanormativasv_tcm30-523541.pdf
- McDonald, B.A., y Stukenbrock, E.H. 2016. Rapid emergence of pathogens in agro-ecosystems: global threats to agricultural sustainability and food security. *Phil. Trans. R. Soc. B* 371: 20160026. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2016.0026>.
- Moralejo, E., Pérez-Sierra, A.M., Álvarez, L. Belbahri, F., Lefort, E., y Descals, E. 2009. Multiple alien *Phytophthora* taxa discovered on diseased ornamental plants in Spain. *Plant Pathol.* 58: 100-110. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2008.01930.x>.

- Morán, F., Barbé, S., Bastin, S., Navarro, I., Bertolini, E., López, M.M., Hernández-Suárez, E., Urbaneja, A., Tena, A., y Siverio, F. 2021. The challenge of environmental samples for PCR detection of phytopathogenic bacteria: A case study of citrus huanglongbing disease. *Agronomy* 11: 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010010>.
- Pace, R., Ascolese, R., Miele, F., Russo, E., Griffo, R.V., Bernardo, U., y Nugnes, F. 2022. The bugs in the bags: the risk associated with the introduction of small quantities of fruit and plants by airline passengers. *Insects* 13: 617. <https://doi.org/10.3390/insects13070617>.
- Palacio-Bielsa, A., López-Quílez, A., Llorente, I., Ruz, L., López, M.M., y Cambra, M.A. 2012. Criteria for efficient prevention of dissemination and successful eradication of *Erwinia amylovora* (the cause of fire blight), in Aragon, Spain. *Phytopathol. Mediterr.* 51: 505-518.
- Recasens, J. 2018. Retos actuales de la Malherbología en España. *Phytoma España* 303: 26-34.
- Recasens, J., Conesa, J.A., y Juárez-Escario, A. 2020. Las invasiones vegetales en sistemas agrícolas. Retrospectiva de los últimos 40 años en Cataluña. *ITEA Inf. Tec. Econ.* 116: 190-211. <https://doi.org/10.12706/itea.2019.020>.
- Ristaino, J.B., Cooke, D.E.L., Acuña, I., y Muñoz, M. 2020. The threat of late blight to global food security. Págs. 403-420. En: J.B. Ristaino y A. Records, eds. *Emerging Plant Disease and Global Food Security* APS Press. St. Paul. MN. <https://doi.org/10.1094/9780890546383.006>.
- Ristaino, J.B., Anderson, P.K., Bebber, D.P., Brauman, K.A., Cunniffe, N.J., Fedoroff, N.V., Cambria Finegold, C., Garrett, K.A., Gilligan, G.A., Jones, C.M., Martin, M.D., MacDonald, G.K., Neenan, P., Records, A., Schmale, D.G., Tateosian, L., y Qingshan W. 2021. The persistent threat of emerging plant disease pandemics to global food security, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118: e2022239118.
- Sánchez, B., Barreiro Hurlé, J., Soto Embodas, I., y Rodríguez Cerezo, E. 2019. The Impact Indicator for Priority Pests (I2P2): a tool for ranking pests according to Regulation (EU) No 2016/2031, EUR 29793. En: Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-08785-4 (online), 978-92-76-08784-7 (print), <https://doi.org/10.2760/585182> (online), 10.2760/445474 (print), JRC116973.
- Sánchez, B., Di Bartolo, F., Rodríguez Cerezo, E., y Barreiro-Hurlé, J. 2021. Unit Costs for Plant Health Surveillance Activities co-funding under the Single Market Programme. En: Publications Office of the European Union. EUR 30645. <https://doi.org/10.2760/845208>.
- Saponari, M., Giampetruzzi, A., Loconsole, G., Boscia, D., y Saldarelli, P. 2019. *Xylella fastidiosa* in olive in Apulia: Where we stand. *Phytopathology* 109: 175-186.
- Spence, N., Louise Hill, L., y Morris, J. 2020. How the global threat of pests and diseases impacts plants, people, and the planet. *Plants, People, Planet* 2: 5-13.
- Tena, A., Urbaneja, A., Hernández-Suárez, E., Moure, M., González, A.B., Fraga, X. L., y Cuenca B. 2021. Introducción del parasitoido *Tamarixia dryi* en la península ibérica para el control de *Trioza erythrae*. *Phytoma España* 329: 16-23.
- van Lenteren, J.C., Bale, J., Bigler, F., Hokkanen. H.M.T., y Loomans, A.J.M. 2006. Assessing risks of releasing exotic biological control agents of arthropod pests. *Annu. Rev. Entomol.* 51: 609-634.
- Vicent, A. 2021. La mancha negra de los cítricos causada por *Phyllosticta citricarpa*. El peso de la evidencia científica. *Phytoma España* 334: 129-131.
- Vicent, A., y Blasco, J. 2017. When prevention fails. Towards more efficient strategies for plant disease eradication. *New Phytol.* 214: 905-908.
- Vicent, A., y García-Jiménez, J. 2014. La mancha negra de los cítricos causada por *Phyllosticta (Guignardia) citricarpa*. Descripción de la enfermedad y análisis de riesgos para la citricultura española. *Phytoma España* 258: 46-48.
- Vilà, M., Basnou, C., Pysěk, P., Josefsson, M., Genovesi, P., Gollasch, S., Nentwig, W., Olenin, S., Roques, A., Roy, D., Hulme, P.E., y DAISIE partners. 2010. How well do we understand the impacts of alien species on ecosystem services? A pan-European cross-taxa assessment. *Front. Ecol. Environ.* 8: 135-144.
- Whetzel, H.H. 1929. The terminology of phytopathology. *Proc. Int. Congr. Plant Sci.* 2: 1204-1215.

B. Retos para la Sanidad Vegetal en la próxima década

B2. Capítulo B2. Repercusiones del Cambio Climático en los efectos de las plagas, enfermedades, y malas hierbas

B2.1. Cambio Climático y Sanidad Vegetal: una relación en un marco global

En otras partes del presente libro hemos subrayado que las consideraciones medioambientales impregnan de manera creciente todos los análisis y tomas de decisión relativos a la actividad humana, de forma que se han acuñado términos como el de economía circular con el que se pretende reforzar el concepto y beneficios de reciclar, reutilizar y compartir recursos, en contraposición con la economía del usar y tirar. Esos mismos principios se han aplicado a la Sanidad Humana o a la **Salud Circular por la Organización Mundial de la Salud, OMS (WHO, 2018)**, cuyas consideraciones se pueden extender fácilmente a la Sanidad Vegetal porque, como ponemos de manifiesto repetidamente, las enfermedades, plagas y malas hierbas están estrechamente relacionadas con la salud humana, animal y medioambiental en el marco del concepto de Salud Única (*One Health* en inglés). No es de extrañar, por tanto, que **las amenazas para el medioambiente y la salud lo sean al mismo tiempo para los distintos ámbitos de la Biosfera y entre las más acuciantes de las cuales se encuentra el Cambio Climático.**

Mucho se ha escrito sobre los efectos del Cambio Climático en la Sanidad Vegetal, lo que refleja la importancia que le damos y a ello dedicamos las próximas páginas. Una reciente visión general sobre dicho tema se puede encontrar en el libro de Jabran et al. (2020) y en el informe publicado por la FAO en 2021 (Gullino et al., 2021), en los que se refleja lo mucho que se ha aprendido en los últimos años acerca de la incidencia del calentamiento global sobre las poblaciones de los seres vivos y sus interacciones con el medioambiente. Entre las poblaciones afectadas y sus efectos se ha prestado particular atención a las de malas hierbas, artrópodos fitófagos y agentes fitopatógenos, y a sus relaciones con el medio en los ecosistemas agrícolas, forestales y naturales. Podría decirse, incluso, que **el análisis de la incidencia del Cambio Climático sobre la Sanidad Vegetal ha servido para extrapolar métodos y resultados a otros sistemas ecológicos.** Haciendo hincapié en la visión global del problema, señalemos que los efectos del Cambio Climático sobre la Sanidad Vegetal interactúan con otros fenómenos a los que están sometidos la agricultura, la silvicultura y los espacios verdes urbanos, entre ellos **el constante movimiento y establecimiento de especies exóticas invasoras en nuevas regiones, cuya magnitud no sería la misma sin la influencia del Cambio Climático (cf., Capítulo B1).** Subrayemos, por tanto, lo mucho que el conocimiento ecológico y el manejo de los recursos naturales les deben a los estudios en Sanidad Vegetal.

El Cambio Climático comprende una alteración significativa de las condiciones meteorológicas medias y su variabilidad en un periodo prolongado de tiempo asociada al aumento de la concentración de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera (Iglesias, 2008), que a escala global, continental, o regional, incluye, entre otros: (i) tendencias al alza de la temperatura media del aire; (ii) variaciones en el régimen estacional (p. ej., tendencia de adelanto de la primavera y retraso del invierno); (iii) incremento

de las temperaturas mínimas y de la frecuencia de máximas elevadas; (iv) variaciones en la cantidad de precipitación así como en los patrones espacial y temporal de estas; (v) sequías más intensas y prolongadas sobre áreas geográficas más amplias; (vi) relación de los periodos secos con temperaturas altas y precipitaciones más reducidas; y (vii) aumento de la frecuencia de episodios extremos (p. ej., precipitaciones intensas, temperaturas extremas, ciclones y tormentas tropicales, etc.) (Baldasano, 2007).

Los efectos combinados de todas esas alteraciones en los factores meteorológicos repercuten directa y significativamente sobre la fisiología de las plantas y de los organismos con los que estas se relacionan, así como sobre los restantes componentes de los ecosistemas. Entre los organismos directamente relacionados con las plantas se encuentran: (i) los artrópodos fitófagos que afectan a los cultivos y masas forestales; (ii) los patógenos que causan enfermedades en ellos; y (iii) las malas hierbas que compiten con el uso de los recursos necesarios para su crecimiento, cuya incidencia en las cosechas agrícolas y masas forestales se ha visto alterada, bien sea positivamente, bien negativamente por el Cambio Climático. Estas alteraciones son variables y difíciles de predecir, máxime cuando su magnitud cambia según la zona geográfica. Sin embargo, a pesar de esa dificultad predictiva, la bibliografía especializada sobre este tema indica que hay fenómenos causados por el Cambio Climático en las plagas, enfermedades y malas hierbas que son comunes y a ellos nos vamos a referir en las páginas que siguen. Esos fenómenos se refieren a la ecología y biología de los organismos nocivos, a su distribución en la zona donde son nativos o en nuevas regiones que han invadido, y también a la efectividad de los métodos hasta ahora efectivos para la gestión de los problemas que originan cada uno de ellos. No olvidemos, por otra parte, que en algunos organismos de reproducción rápida -entre ellos los insectos y microorganismos fitopatógenos-, y particularmente los polimórficos, la adaptación a las nuevas condiciones propiciadas por el Cambio Climático requiere una aproximación holística que supere las limitaciones del análisis científico puntual de algunos aspectos.

B2.2. Efectos del Cambio Climático en los cultivos y masas forestales

Más adelante en este capítulo nos ocuparemos de los efectos del Cambio Climático sobre los agentes nocivos protagonistas de la Sanidad Vegetal; antes se resumen brevemente los efectos del mismo en la agricultura y la silvicultura que no implican directamente a la Sanidad Vegetal, aunque sí lo hacen indirectamente y por ello es indispensable tenerlos en cuenta.

En primer lugar, los cambios en los factores meteorológicos pueden resultar directamente perjudiciales para los cultivos agrícolas y las masas forestales por sus efectos físicos. Por ejemplo, tienen efectos negativos sobre la vegetación los incendios, las sequías extraordinarias e inundaciones, los golpes de calor, los vientos huracanados, o la mayor incidencia del ozono y los rayos ultravioletas. Otros efectos del Cambio Climático sobre los cultivos y las masas forestales se expresan a través de la alteración, sea beneficiosa o perjudicial, de la fisiología de la planta cultivada. Ello puede conllevar un aumento del rendimiento y ocasionalmente pérdida de calidad de la cosecha al aumentar la concentración de CO₂ en la atmósfera, mayores tasas de desarrollo y el consiguiente cambio de la fenología de los cultivos, disponibilidad de nuevas zonas aptas para un cultivo o pérdida de otras y los cambios en la intensidad y temporalidad del comercio de alimentos, etc. Entre los efectos indirectos del Cambio Climático en los cultivos y masas forestales, aludamos también a los que se producen por la alteración de los ecosistemas naturales con los que los agroecosistemas interactúan.

Íntimamente ligados a los efectos causados por el Cambio Climático en la agricultura y la silvicultura, están los derivados de la extensión de la distribución geográfica de nuevos organismos nocivos exóticos por el aumento de su introducción y establecimiento en nuevas áreas. El incremento incesante

del comercio mundial de alimentos y plantas, así como de pasajeros, y la disponibilidad de nuevos ambientes favorables, son las causas de esa relación entre Cambio Climático y los cambios en las áreas de distribución de las especies, subespecies o razas de organismos nocivos. De ese fenómeno de invasión de nuevas especies de artrópodos fitófagos, agentes fitopatógenos y malas hierbas se trata en el Capítulo B1., anterior a este.

B2.3. Impactos generales del Cambio Climático sobre las malas hierbas, los artrópodos fitófagos, y los agentes fitopatógenos

B2.3.1. Las malas hierbas

Aun poniendo el foco en los agroecosistemas, se hace difícil analizar los efectos potenciales o los que ya se están manifestando del Cambio Climático en sus componentes e interacciones. Una manera de abordar la cuestión es empezar por los efectos en el **primer eslabón trófico del agroecosistema**, es decir, **las plantas**, que son los productores de biomasa y acumuladores de energía a partir de la cual se construye la red de consumidores y sus interacciones, todos ellos condicionados por los factores abióticos. Hagamos notar que entre las especies vegetales de los agroecosistemas sometidas al Cambio Climático, no sólo encontramos las masas forestales y las especies cultivadas sino también las adventicias entre las cuales se encuentran las malas hierbas. En ese sentido recordemos esa vieja **definición de mala hierba como una planta que está en cantidades, lugares y momentos no deseados**. No olvidemos, sin embargo, que un cierto número de especies vegetales presentes en ecosistemas agrícolas y forestales tienen un **papel beneficioso como suministradoras de polen y de polinizadores, como hábitats y refugio de otros organismos beneficiosos** o directamente como plantas medicinales, entre otros servicios.

Aun cuando la mejora genética vegetal ha sido capaz de responder rápidamente al Cambio Climático creando cultivares más adaptados a las nuevas condiciones ambientales, las respuestas de las plantas al aumento de la concentración de CO₂ y al calentamiento global son complejas y variables, según el tipo de planta (p. ej., especies C3 vs. especies C4) y la zona donde crecen. Las alteraciones más referenciadas en la bibliografía científica especializada se centran en los **cambios en la fisiología, la morfología y la bioquímica de las especies vegetales, y sus consecuencias en las relaciones intra- e interespecíficas y, entre las malas hierbas se añade su sensibilidad a los herbicidas** (Ruttledge y Chauhan, 2020). En el caso de ecosistemas forestales o seminaturales, la diseminación de las plantas suele ser más lenta que la de otros componentes del ecosistema que expanden o cambian su distribución más rápidamente, con lo que aquellas se verán sometidas a mayores impactos del Cambio Climático y a nuevas relaciones interespecíficas con sus fitófagos y fitopatógenos. A su vez, los fitófagos y fitopatógenos se enfrentan a nuevas especies vegetales que han cambiado su área de distribución o que han invadido nuevas regiones, lo cual repercute en las relaciones entre fitófagos o fitopatógenos y sus plantas huésped.

En la producción agrícola, el efecto negativo de las malas hierbas sobre los cultivos se ejerce a través de varios mecanismos, pero principalmente a través de la competencia interespecífica con la planta cultivada por una variedad de recursos acentuando de esta manera el impacto directo del Cambio Climático en los cultivos, dos efectos sobre el rendimiento que han sido señalados como aditivos (Vilà et al., 2021). En la medida que esos recursos pueden cambiar tanto en cantidad como en su disponibilidad temporal, el impacto de las malas hierbas en el cultivo puede cambiar en su naturaleza e intensidad. Se ha debatido mucho en la bibliografía científica si el Cambio Climático favorece en mayor medida a las especies C3 o C4, sin que se haya podido alcanzar una conclusión sólida (Ruttledge and Chauhan, 2020) dependiendo

de la relación C3/C4 en la pareja cultivo/ mala hierba y el factor climático implicado según Vilà et al., (2021). Esta última publicación es recomendable, porque en ella se muestra un meta-análisis de 1701 observaciones de los efectos individuales y combinados del aumento del CO₂, la sequía o el calentamiento en 23 especies cultivadas, que **permitió comprender mejor la relación entre la planta cultivada y las malas hierbas en un escenario de Cambio Climático.**

B2.3.2. Las plagas

Los artrópodos fitófagos que causan problemas como plagas son muy variados y a veces se han utilizado como indicadores de los efectos del Cambio Climático. En general, los efectos del Cambio Climático sobre los artrópodos fitófagos descritos en la bibliografía se han centrado en las consecuencias del calentamiento global, que se enmarcan en cuatro categorías: (i) la expansión de su área de distribución; (ii) su biología; (iii) las interacciones tróficas; y (iv) la dinámica poblacional. Las repercusiones predichas de esos efectos son **difícilmente generalizables** y no siempre significan un aumento de los daños provocados por las plagas sobre los cultivos y masas forestales, sino que aquellos dependen de la zona geográfica considerada y de las características biológicas de cada especie de artrópodo. Por ello, **cada una debe ser estudiada individualmente en relación con las interacciones con su ecosistema.** A pesar de la dificultad de previsión y de los relativamente escasos estudios llevados a cabo hasta ahora, los análisis realizados sugieren que **el aumento de la severidad de los daños provocados por los insectos fitófagos será más frecuente que el resultado contrario, aun no siendo esta una conclusión generalizable** (Deutsch et al., 2018; Lehmann et al., 2020).

B2.3.2.1. Efecto del Cambio Climático sobre el área de distribución de los artrópodos fitófagos

La distribución geográfica de los artrópodos fitófagos viene determinada por muchos factores, pero por lo menos dos de ellos pueden verse afectados por el Cambio Climático. El primero de ellos se refiere principalmente a las **condiciones abióticas límite para la supervivencia**, sea en verano o en invierno, y **en particular a la temperatura.** Por otra parte, la adaptación a las condiciones abióticas de una región no solamente comprende las temperaturas máximas o mínimas, sino la existencia en la especie de fitófago de una serie de **mecanismos que le permiten salvar o mitigar las condiciones adversas**, por ejemplo, la dormancia invernal o estival cuya ocurrencia en el tiempo viene gobernada por el fotoperiodo, pero modulada por la temperatura o la fenología de las plantas huésped. En conjunto, **la tendencia de desplazamiento del área de distribución de una especie fitófaga por efecto del calentamiento climático es moverse hacia latitudes y altitudes superiores**, tanto en el hemisferio norte como en el sur, a la búsqueda de **recuperar sus nichos climáticos anteriores al calentamiento global.** El segundo factor que juega un papel relevante en la distribución de una especie de fitófago es la **disponibilidad de plantas huésped.** Quedó dicho anteriormente en este Capítulo que las plantas suelen cambiar de distribución más lentamente que sus fitófagos, de manera que estos pueden verse obligados a buscar otros huéspedes a medida que van cambiando de distribución; en estas circunstancias, es lógico pensar que la adaptabilidad al Cambio Climático será más rápida en los fitófagos polífagos.

B2.3.2.2. Efecto del Cambio Climático sobre la biología de los artrópodos fitófagos

El Cambio Climático puede influir sobre varios aspectos de la biología de dichos artrópodos. Destaquemos dos, la **fenología** y el **número de generaciones** como consecuencia del aumento de las **tasas de desarrollo** y la **modificación de las fechas de inducción y terminación de la diapausa** que marcan los **periodos de hibernación y estivación.** Esos cambios en las poblaciones de fitófagos pueden causar la **asincronía con el desarrollo de los cultivos huésped**, aunque la fenología de estos también puede verse modificada y, en consecuencia, el resultado será difícil de prever, máxime cuando es probable que las épocas de siembra y las rotaciones de cultivo vayan a cambiar también. **La asincronía de fitófagos y plantas huésped puede resultar crítica cuando el principal daño causado por el fitófago resulta**

de su actividad como vector de agentes fitopatógenos, principalmente virus, fitoplasmas y bacterias vasculares fastidiosas –como *Xylella fastidiosa* y '*Candidatus Liberibacter spp.*', cf., Capítulos A2., y B1.-, cuyas consecuencias dependen mucho del estado fenológico del cultivo huésped en el momento de la transmisión. La alteración de la fenología y número de generaciones de los artrópodos fitófagos también van a influir paralelamente en la diversidad de interacciones con sus enemigos naturales.

B2.3.2.3. Efecto del Cambio Climático sobre las interacciones tróficas entre plantas y organismos fitófagos

En los apartados anteriores ya se puso de manifiesto que los cambios en la distribución de las especies fitófagas y de su biología daba lugar a nuevas interacciones o a la modificación más o menos radical de las que venían teniendo lugar con anterioridad, además de las interacciones derivadas de nuevas especies de plantas y fitófagos que hayan invadido nuevas áreas. Añadamos a todo ello que las alteraciones morfológicas, bioquímicas y fisiológicas en las plantas, en los artrópodos fitófagos y en los enemigos naturales de estos últimos, afectan en gran medida a sus relaciones, con consecuencias positivas y negativas para la adaptabilidad de las especies implicadas y para el propio ecosistema. Así, por ejemplo, el aumento de la concentración de CO₂ en las hojas de las plantas conlleva la mayor concentración de hidratos de carbono en detrimento de su contenido en nitrógeno, uno de los elementos cruciales que los fitófagos buscan en su alimentación de las plantas (DeLucia et al., 2012). Inversamente, el aumento en la frecuencia e intensidad del ataque de determinados artrópodos fitófagos a las masas forestales hace que el carbono almacenado en la madera pase a la atmósfera y contribuya al Cambio Climático (DeLucia et al., 2012).

B2.3.2.4. Efecto del Cambio Climático sobre la dinámica poblacional de los fitófagos

La influencia de los fenómenos antes mencionados que afectan a la tasa de crecimiento poblacional y a la supervivencia de los artrópodos fitófagos en las estaciones desfavorables repercuten sobre la dinámica de sus poblaciones, dando lugar al aumento o disminución de la abundancia de la población y por tanto de la severidad de los daños que causa. La alteración de la dinámica poblacional de una especie sintetiza los efectos de todas las alteraciones que el Cambio Climático causa en los ecosistemas. Por ello es tan difícil preverlos. Insistamos, por otra parte, que la evolución de las especies para adaptarse a las nuevas y cambiantes condiciones puede dar lugar a un cierto amortiguamiento de las oscilaciones en la dinámica poblacional de cada especie.

B2.3.3. Las enfermedades

Los efectos fitopatológicos de las alteraciones meteorológicas asociadas al Cambio Climático están siendo particularmente percibidos en especies arbóreas durante las dos última décadas, de los cuales son ejemplos: (i) la muerte extensa de especies forestales en EE. UU. asociada al incremento de la temperatura, la pluviometría y la humedad sin que se citen agentes nocivos específicamente implicados (Van Mantgem et al., 2009); (ii) el incremento en la incidencia de podredumbres de raíz en especies forestales causadas por especies de *Phytophthora* en Europa Central, como consecuencia del incremento de las temperaturas medias invernales, el cambio en el patrón de precipitación de invierno a verano y la tendencia a lluvias más intensas (Jung, 2009); y (iii) los graves ataques de *Phaeocryptopus gaeumannii* en abeto Douglas en Oregón (EE. UU.) asociados al incremento de las temperaturas invernales y del período de humectación en primavera y otoño (Manter et al., 2005).

En términos generales, muchas de las afirmaciones anteriores respecto de los efectos del Cambio Climático sobre los artrópodos fitófagos se pueden aplicar a los agentes fitopatógenos y las enfermedades que estos causan en cultivos y masas forestales (Jiménez-Díaz, 2008). No obstante, la repercusión del Cambio Climático sobre las enfermedades tiene cierta singularidad comparada con las plagas y ma-

las hierbas, en razón de: (i) la naturaleza compleja de las interacciones entre planta y patógeno que subyacen en el desarrollo de las enfermedades; y (ii) la influencia determinante que tienen en el desarrollo de ellas los factores abióticos y los demás componentes microbianos del medioambiente que envuelven a los cultivos y masas forestales, que pueden interactuar a corto, medio y largo plazo con los agentes causales de enfermedades. Es por ello, y por la variedad de alteraciones en los factores meteorológicos subyacentes en el Cambio Climático que inciden sobre el fenómeno fitopatológico, que **resulte extremadamente difícil establecer generalizaciones respecto de los impactos del Cambio Climático sobre las enfermedades** de cultivos y masas forestales, así como sobre las estrategias adecuadas para minimizarlos (Coakley et al., 1999; Jiménez Díaz, 2008). No obstante, la valoración eficiente y predicción de dichos impactos constituyen en la actualidad **uno de los retos más importantes que afronta actualmente la ciencia fitopatológica**, y ha llevado a los fitopatólogos a considerarlos de interés estratégico según se refleja en las varias revisiones y estudios monográficos publicados desde 1995 (Boland et al., 2004; Chakraborty y Newton, 2011; Chakraborty et al., 2000; Coakley et al., 1999; Garret et al., 2006; 2011; Gullino et al., 2021; Manning y Tiedemann, 1995).

En general, los estudios realizados hasta ahora sobre los nuevos escenarios que plantea el Cambio Climático para la Sanidad Vegetal y sus disciplinas nucleares **se consideran limitados y fragmentarios**; y en el caso de la Fitopatología, dichos estudios se han circunscrito, en general, a los efectos de uno o dos factores climáticos sobre patosistemas modelo en experimentos de corta duración en ambiente controlado, que difícilmente son representativos de las características de los fenómenos fitopatológicos en condiciones de campo y de la gran diversidad existente entre los agentes fitopatógenos. Aun así, los resultados de dichos estudios y el conocimiento que poseemos sobre la epidemiología de las enfermedades indican que, potencialmente, las alteraciones meteorológicas asociadas con el Cambio Climático pueden incidir **de manera importante** en los tres aspectos siguientes: (i) **los ciclos vitales de los agentes fitopatógenos**; (ii) **el desarrollo de la patogénesis** en las enfermedades; y (iii) **la fisiología de las interacciones entre la planta y el patógeno**; y ello repercutirá sobre: (a) **la distribución geográfica de los patógenos**; (b) **la gravedad de las enfermedades y las pérdidas de rendimiento** que estas originen; y (c) **la eficiencia de las estrategias empleadas para su control** (Jiménez Díaz, 2008).

B2.3.3.1. Efecto del Cambio Climático sobre el área de distribución de los agentes fitopatógenos

La distribución geográfica de los organismos fitopatógenos es determinada en gran medida por los requisitos climáticos para su supervivencia o la de sus vectores entre estaciones de cultivo del huésped, y/o la existencia de estos últimos en las áreas geográficas –fundamentalmente las temperaturas máximas y mínimas, y la pluviometría–, por lo cual dicha distribución puede ser notablemente modificada por las variaciones medioambientales asociadas con el Cambio Climático. El incremento de las temperaturas mínimas invernales, y la tendencia en el adelanto de la primavera y retraso del invierno, probablemente propiciarán la **migración a latitudes septentrionales de cultivos propios de ambientes meridionales** y con ellos también muy probablemente la de sus patógenos y sus vectores.

La extensión y rapidez con que pueda tener lugar la variación en la distribución geográfica de los fitopatógenos estarán determinadas por los **procesos que facilitan su diseminación a nuevas áreas**, favorecida de forma importante por episodios climáticos extremos (p. ej., viento en ciclos tormentosos huracanados, inundaciones, etc.) así como por las introducciones de patógenos exóticos auspiciadas por el incremento del comercio internacional (cf., Capítulo B1.), y por la **capacidad de sobrevivir en ellas que es determinada fundamentalmente por las temperaturas mínimas invernales** (Chakraborty y Newton, 2011; Coakley et al., 1999). Por ejemplo, el viento y la lluvia originados por los huracanes y tormentas tropicales que afectaron Florida (EE. UU.) en los años 2000 facilitaron la extensión de la cancrrosis de los cítricos (causada por *Xanthomonas citri* subsp. *citri*, en dicho Estado); y las inundaciones por el río Missis-

sippi promovieron arrastres de suelos infestados por *Heterodera glycines* (el nematodo del quiste de la soja) y su expansión desde el delta de dicho río hasta zonas de cultivo de soja que habían permanecido libres de aquel hasta entonces (Munkvold et al., 1995).

Similarmente: (i) el aumento de las temperaturas invernales ha incrementado la gravedad y expansión geográfica del pie negro de la colza causado por *Leptosphaeria maculans* en el sur del Reino Unido (Sun et al., 2011); (ii) el de la temperatura media anual ha favorecido la expansión de *Cercospora beticola* (agente causal de la cercosporiosis de la remolacha azucarera) hacia el norte en Alemania, y la prevalencia de poblaciones de *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* (roya amarilla del trigo) adaptadas a temperaturas más cálidas en EE. UU. (Mboup et al., 2012; Richerzhagen et al., 2011); y (iii) el incremento de la temperatura invernal y de la frecuencia de precipitaciones ha aumentado el riesgo de ataques de *Phytophthora infestans* (mildiu de la patata) de severidad inusual en cultivos de patata en el norte de Europa (Hannukkala et al., 2007).

El incremento de las temperaturas mínimas invernales y la tendencia al alza de las temperaturas al inicio de la primavera también repercuten de forma significativa sobre la expansión de virosis, de fitoplasmosis y de bacteriosis limitadas al floema o xilema, a través del efecto positivo sobre la supervivencia y el desarrollo poblacional de sus vectores homópteros -fundamentalmente pulgones, moscas blancas, cicadélidos y psílidos (Feres y Raccah, 2015; Perilla-Henao y Casteel, 2016.)- que propician su termosensibilidad y estrategia vital (i.e., "estrategas r", ciclo vital corto, alta capacidad reproductiva, gran capacidad de diseminación y apreciable adaptación para explotar nuevos hábitats vegetales) (Hulle et al., 2010). El aumento de la temperatura media invernal propicia el incremento de la tasa de crecimiento poblacional de muchos de dichos insectos vectores, y favorece que sus poblaciones se expandan a nuevas áreas (Bell et al., 2015) y se adelanten los vuelos migratorios de primavera, de manera que las previsiones ante el nuevo escenario de Cambio Climático indican que los vuelos primaverales de pulgones se adelantarán una media de 8 días en los próximos 50 años (Harrington et al., 2007). Todo ello determinará, posiblemente, una mayor incidencia de virus transmitidos por pulgones, como es el caso de los potyvirus y los luteovirus, muchos de ellos causantes de enfermedades graves en varios cultivos. Previsiblemente, aparecerán epidemias más severas de enfermedades virales en altas y bajas latitudes debido a la expansión de vectores a dichas regiones, mientras que el efecto será el opuesto en regiones secas con latitudes medias (Navas-Cortés et al., 2019). Un ejemplo del efecto de la expansión de insectos vectores procedentes de zonas cálidas sobre la emergencia de nuevas virosis vegetales en España, es el de los biotipos del complejo de especies de la mosca blanca *Bemisia tabaci* en el sudeste peninsular al final de la década de 1980 y el desarrollo del rizado amarillo del tomate -causado por varias especies del virus TYLCV; cf., Capítulo A2.- (Moriones y Navas-Castillo, 2000) así como del amarilleo y enanismo de las cucurbitáceas causado por el virus CYSDV (Marco y Aranda, 2005).

El efecto del Cambio Climático sobre enfermedades bacterianas ha sido objeto de muchas especulaciones, pero existe cierto consenso en que se pueden producir emergencias de las bacteriosis cuyos agentes causales tienen óptimos a temperaturas cálidas, como *Ralstonia solanacearum*, *Burkholderia glumae* o *Acidovorax avenae* subsp. *citrulli*, así como de las limitadas a los tejidos vasculares y transmitidas por insectos, como *X. fastidiosa* o 'Ca. Liberibacter spp.' (Garrett et al., 2011). En otros casos, como en los de algunas especies de *Pseudomonas*, *Xanthomonas* y *Erwinia*, se pueden esperar cambios en su distribución geográfica y probablemente también incrementos en su gama de huéspedes (Navas-Cortés et al., 2019)

B2.3.3.2. Efecto del Cambio Climático sobre los ciclos biológicos de los agentes fitopatógenos y el desarrollo de la patogénesis en las enfermedades

La influencia de las alteraciones en los factores meteorológicos sobre los ciclos de patogénesis de las enfermedades es mediada por el efecto de aquellas sobre el desarrollo de los cultivos, y uno de los

factores más relevantes en dicho respecto es el incremento de la concentración de CO₂ atmosférico. La información disponible indica que la elevación de dicha concentración incrementará la tasa fotosintética, dependiendo de los niveles de factores ambientales como la temperatura y la humedad relativa, el tipo de fotosíntesis (C3 o C4) según la especie vegetal, y la eficiencia en el uso del agua. Todo ello puede redundar en modificaciones de la morfología de la planta (p. ej., incremento en el número de hojas y área foliar, ramificación, diámetro del tallo y ramas, etc.) y de su arquitectura (ej. incremento del tamaño y densidad de la copa), que inciden sobre el microclima en las copas vegetales incrementando eventualmente la extensión y duración de los periodos de humectación de las superficies vegetales que son clave para el desarrollo de muchas bacteriosis y micosis foliares de cultivos y masas forestales (Chakraborty et al., 2000; Coakley et al., 1999).

Los efectos antes señalados, promovidos por el aumento de la biomasa vegetal y de la densidad de las copas derivados de los niveles elevados de CO₂ atmosférico, se acentúan si a estos últimos se unen la intensificación de la pluviometría, la tendencia al alza de las temperaturas –en particular de la mínima- y el adelanto y extensión de la duración de las estaciones de cultivo porque, conjuntamente, dichas alteraciones propician el desarrollo de los ciclos de patogénesis de los patógenos policíclicos, incluyendo, por ejemplo, las bacterias que infectan tejidos aéreos, los hongos y oomicetos causantes de antracnosis, necrosis foliares, mildius, oídios y royas, y numerosas virosis transmitidas por pulgones o moscas blancas. Estaciones de mayor duración, en las que además se produzcan prontamente temperaturas que favorezcan el desarrollo del cultivo y acorten la duración de los ciclos reproductivos de los patógenos e insectos vectores, favorecerán el incremento del número de sus generaciones y repercutirán favorablemente sobre la generación/transmisión de inóculo secundario en las epidemias policíclicas (Coakley et al., 1999).

Un efecto adicional en favor del desarrollo de las epidemias derivado de elevadas concentraciones de CO₂ atmosférico concierne la mayor persistencia de los restos de cosecha que permanecen sobre el suelo, que es fundamental para la supervivencia de fitopatógenos que no forman estructuras específicas para ello. Estos patógenos incluyen: (i) muchos hongos (p. ej., diversas especies de *Colletotrichum* que infectan cucurbitáceas, judía o maíz; varias especies de *Cochiobolus* y *Setosphaeria* que causan manchas necróticas en maíz, y de *Pyrenophora* que causan manchas necróticas en trigo y cebada; (ii) numerosas bacterias [p. ej., patovares de *Pseudomonas syringae* y *Xanthomonas* spp. que causan manchas foliares y necrosis extensas (*blights*) en numerosos cultivos]; y (iii) un escaso número de nematodos fitoparásitos cuyos estados de supervivencia se mantienen en los restos vegetales (p. ej., *Aphelenchoides ritze-ma-bossi*, el nematodo foliar del crisantemo, y juveniles de 4ª edad de *Ditylenchus dipsaci*, el nematodo de bulbos y tallos de numerosas plantas cultivadas). La mencionada persistencia de los restos de cultivos afectados es consecuencia de la reducción de su tasa de descomposición microbiana, que es motivada por el aumento de la relación C/N en los tejidos de plantas que crecen en atmósferas con altas concentraciones de CO₂. Dicha persistencia propicia una mayor disponibilidad de inóculo primario de patógenos que infectaron cultivos anteriores y en consecuencia el desarrollo de epidemias más tempranas y rápidas, efectos que incluso pueden ser incrementados por el monocultivo, así como por las prácticas de laboreo mínimo o no-laboreo (Cook y Yarham, 2006) recomendadas para mitigar las emisiones que origina el sector agrícola.

El efecto del Cambio Climático sobre la patogénesis de las bacteriosis es complejo, en razón de la diversidad de influencias que tienen sobre aquella los variados cambios medioambientales. Por ejemplo, el riesgo de infección podría disminuir en la mayoría de bacteriosis de la copa vegetal (causadas por *Pseudomonas*, y *Xanthomonas* spp. etc.) debido a una menor pluviometría y humedad relativa asociadas a periodos de sequía. Estas mismas condiciones disminuirían la probabilidad de diseminación de dichas bacterias, mientras que los eventos de lluvias torrenciales favorecerían la diseminación de las bacterias

residentes en el suelo. Sin embargo, el aumento de la temperatura en condiciones de suficiencia de humedad (p. ej., periodos lluviosos) podría incrementar el riesgo de infección en muchos casos (p. ej., *Erwinia amylovora*), pero no en bacterias fitopatógenas que requieran temperaturas moderadas. El potencial de inóculo de las bacterias fitopatógenas que presentan una etapa saprofitica en su ciclo (i.e., en restos foliares/frutos, raíces infectadas, suelo infestado) podría aumentar durante inviernos más cálidos al multiplicarse más rápidamente; asimismo, podría anticiparse la reactivación de infecciones latentes y de chancros en huéspedes leñosos.

B2.3.3.3. Efecto del Cambio Climático sobre la fisiología de las interacciones entre la planta y el patógeno

El aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera, así como la frecuencia y magnitud del aumento de la temperatura y la disminución de la pluviometría en algunas áreas geográficas, pueden repercutir sobre la expresión de genes de la planta implicados en los mecanismos de defensa contra las enfermedades (Garret et al., 2006). Por ejemplo, las modificaciones que se producen en la anatomía, fisiología y morfología de las plantas en atmósferas con concentraciones elevadas de CO₂ pueden repercutir positivamente sobre la expresión de mecanismos defensivos, incluyendo una mayor formación de ceras cuticulares, el desarrollo de capas supernumerarias de células epidérmicas, y el incremento en la formación de papilas y acumulación de sílice en las zonas de primera penetración de dichas células por hongos y oomicetos (Chakraborty y Newton, 2011; Garret et al., 2006).

Por el contrario, uno de los efectos más negativos de la mayor frecuencia de temperaturas elevadas asociada con el Cambio Climático sobre las interacciones planta-patógeno, concierne a la supresión de la expresión de genes de resistencia termolábiles que ocurre de forma inespecífica en la resistencia contra hongos, bacterias y nematodos. Por ejemplo: (i) los cvs. Ayala y PV-1 de garbanzo son, respectivamente, moderada y altamente resistentes a la raza 1A de *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* (agente causal de la fusariosis vascular) a 24 °C pero altamente susceptibles a 27 °C; (ii) la resistencia en trigo a *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* (roya negra del tallo del trigo) regulada por el gen *Sr5* es efectiva a 18 °C pero no a 25 °C; y (iii) la resistencia en judía al nematodo *Meloidogyne incognita* regulada por los genes *me3* y *Me2* es operativa, respectivamente, a 26 o 28°C y anulada a 28 o 30 °C (Landa et al., 2006). No obstante, este fenómeno es complejo y la supresión de resistencia es difícil de predecir porque puede variar con los cultivares y sus genes de resistencia, así como con los patotipos y razas de los patógenos (Chakraborty et al., 2000; Garret et al., 2006; Kim y Bockus, 2003; Landa et al., 2006).

Una importante repercusión adicional de las variaciones meteorológicas extremas sobre la fisiología de las interacciones planta-patógeno, concierne al incremento en la incidencia y gravedad de algunas enfermedades derivado de la predisposición que confieren estreses hídricos y térmicos en las plantas a infecciones por patógenos que, en condiciones normales, son moderada o escasamente virulentos, especialmente en el caso de podredumbres de raíces y chancros en cultivos herbáceos y leñosos. Ejemplos del estrés hídrico como predisponente a enfermedad severa incluyen la podredumbre carbonosa de girasol, soja y sorgo causada por *Macrophomina phaseolina* (Blanco-López y Jiménez-Díaz, 1983), las necrosis de raíz y tallo de maíz y trigo causadas por *Fusarium graminearum* y *Fusarium fujikuroi*, y diversas podredumbres de raíces y chancros de cultivos leñosos y forestales causadas por *Armillariella mellea*, *Botryosphaeria dothidea* y *Gremmeniella (Scleroterris) lagerbergii* (Jiménez Díaz, 2008).

La densidad de artrópodos vectores de virus y bacterias vasculares también puede aumentar directamente por ciertos cambios fisiológicos en la planta; por ejemplo, el estrés hídrico puede incidir en el comportamiento y el ciclo vital de dichos vectores y el nivel de daño que ocasionen a las cosechas. De hecho, se ha observado un efecto sinérgico cuando se incrementa dicho estrés bajo una densidad cons-

tante de pulgones de cereales, lo que lleva a una reducción drástica en el rendimiento e índice de cosecha del trigo. En Lleida, los pulgones de cereales *Rhopalosiphum padi*, *Sitobion avenae* y *Metopolophium dirhodum* permanecen a lo largo de todo el año en gramíneas cultivadas en la zona, cereales forrajeros, cereales de invierno y maíz, y el solapamiento de los ciclos de estos cultivos permite el paso de los pulgones alados de uno a otro. El déficit hídrico en ciertos periodos, tiene un efecto indirecto importante sobre la actividad de estas especies a través de su efecto sobre la fisiología del cultivo, y constituye un factor determinante en la dinámica de poblaciones. Las formas aladas de aquellos pulgones que van de un cultivo a otro permiten que el inoculo del virus responsable del enanismo amarillo de la cebada (Barley yellow dwarf virus, BYDV) se pueda mantener a lo largo de todo el año en dicha zona.

Además, por un lado, los mecanismos de expresión génica en las respuestas de las plantas a los estreses abióticos -como los antes indicados-, pueden interaccionar negativamente con la expresión de mecanismos defensivos que subyacen en la resistencia a los agentes fitopatógenos (Fujita et al., 2006). Todo ello confiere más complejidad si cabe a los efectos del Cambio Climático sobre las enfermedades de las plantas, hasta el punto de que la diversidad de mecanismos que subyacen en ellos también puede propiciar la disminución de la severidad de los ataques por aquellas (Hunjan y Lore, 2020). Por otro lado, varios estudios sobre la respuesta de virus de plantas y de sus insectos vectores a los posibles nuevos escenarios de Cambio Climático concluyen que dicho cambio inducirá cambios en la morfología y fisiología de los cultivos que tendrá implicaciones en la durabilidad y nivel de resistencia genética frente a vectores de virus.

B2.3.3.4. Efecto del Cambio Climático sobre la eficiencia de las estrategias empleadas para la Gestión Integrada de las enfermedades

Los efectos sobre los diversos aspectos de las enfermedades de las plantas descritos en los Apartados anteriores repercuten necesariamente sobre la adecuación y eficiencia de las estrategias disponibles para el control de aquellas que, en consecuencia, deberán ser cuidadosamente revisadas ante los nuevos escenarios que plantea el Cambio Climático. Así, por ejemplo, será aconsejable **intensificar los esfuerzos para la práctica eficiente de las acciones de detección temprana y erradicación de los agentes fitopatógenos y de sus vectores exóticos** que puedan ser introducidos en un área geográfica, lo cual requerirá la dotación de recursos instrumentales y personal técnico adecuadamente formado en Fitopatología y en el uso de nuevas tecnologías de detección (cf., Capítulos C1. y C3.).

En particular, **el efecto del Cambio Climático sobre el control de enfermedades puede ser relevante en las estrategias de gestión integrada (GIP)**, y ser mediado por la influencia de aquel sobre la resistencia a los patógenos que es pilar clave en esta (Jiménez Díaz, 2008). Además, los efectos sobre los ciclos vitales de los agentes fitopatógenos y su supervivencia en los restos de cultivos afectados, pueden influir sobre la eficiencia de medidas de control basadas en el manejo del cultivo, o incidir sobre los efectos secundarios de prácticas agrícolas sostenibles, como el mínimo o no-laboreo. Ciertas prácticas culturales como los cambios en las fechas de siembra o la fenología de los cultivos para explorar condiciones ambientales desfavorables para los patógenos -de por sí frágiles a la influencia de los factores etiológicos-, pueden ser **menos consistentes como consecuencia de la tendencia al alza de las temperaturas mínimas invernales y el adelanto de la primavera**. Todo ello obliga a redefinir con base científica y periódicamente en cada zona las fechas óptimas de cada práctica de GIP, con la finalidad de evitar la coincidencia de mayores cantidades de inóculo o de vector con estados del cultivo especialmente susceptibles a la enfermedad.

De igual manera, la eficiencia y consistencia de los agentes de control biológico de enfermedades pueden verse comprometidas por las alteraciones en la temperatura y la pluviometría, porque la estabilidad

de dicho control está fuertemente influida por las variaciones medioambientales a que se ven sometidos los cultivos y por la vulnerabilidad de los agentes microbianos de control biológico a las variaciones extremas de los factores meteorológicos (Landa et al., 2013). También, los efectos sobre la morfología y fisiología de los cultivos pueden incidir negativamente sobre la eficiencia de los tratamientos fungicidas en las estrategias de uso sostenible de los productos fitosanitarios. Por ejemplo, la absorción, translocación y metabolismo de fungicidas sistémicos pueden ser interferidos por la formación de ceras cuticulares, el aumento de grosor de la epidermis vegetal y los cambios fisiológicos en la planta promovidos por concentraciones elevadas de CO₂ atmosférico. Igualmente, el incremento de la biomasa vegetal y de la densidad de la copa favorecidos por altas concentraciones de CO₂ pueden reducir la proporción de tejidos vegetales tratados que resulten adecuadamente cubiertos por el fungicida, y las tendencias al alza de las temperaturas y la pluviometría pueden repercutir sobre la dinámica temporal de los residuos de materias activas sobre el tejido tratado, dando lugar todo ello a incrementos en el número de tratamientos necesarios para asegurar el nivel de control perseguido (Coakley et al., 1999).

Las estrategias de GIP también se verían afectadas por el Cambio Climático debido a cambios en los umbrales de intervención para su control. Sin embargo, a medio-largo plazo es de esperar una adaptación de ciertas poblaciones, por ejemplo de algunas bacterias fitopatógenas, a las nuevas condiciones (Garrett et al., 2006), con lo que será necesario modificar los umbrales en los modelos predictivos de enfermedad, en especial los recomendados para iniciar los tratamientos fitosanitarios (Chakraborty y Newton, 2011) Por lo tanto, resulta lógico pensar que los sistemas predictivos de ayuda a la toma de decisiones (i.e., Maryblit para *E. amylovora*) deberán ser revalidados en las nuevas condiciones climáticas de cada zona.

B2.4. Modelos de distribución de organismos nocivos en relación con el Cambio Climático

El estudio de los efectos del Cambio Climático se ha abordado con métodos muy diversos, desde la experimentación de laboratorio en fitotrones, o a escalas mayores con experimentos en meso, macro y microcosmos, o mediante diversos tipos de modelos que consideran varias causas a la vez para explicar o predecir la distribución de las malas hierbas, artrópodos fitófagos y agentes fitopatógenos. Los modelos de distribución se empezaron a desarrollar primero para determinar las posibles zonas en riesgo de establecimiento de especies exóticas invasoras. Después, sin embargo, también se estudiaron y han empezado a utilizarse para predecir los cambios de distribución tanto de organismos nativos como exóticos ya establecidos como respuesta al Cambio Climático (Hill y Thomson, 2015). Una evaluación de estudios de simulación de riesgo por el Cambio Climático entre 2001 y 2100 en 30 cultivos publicados en el siglo XXI, concluyó que el riesgo de las enfermedades aumentó en 86 casos, disminuyó en 45 y en 12 fue similar en el periodo evaluado (Juroszek et al, (2022). Los resultados contradictorios fueron numerosos, pero hubo consenso en el aumento en Europa del riesgo de roya del trigo, entre otros problemas fitopatológicos.

B2.4.1. Modelos de nicho ecológico o correlativos

El gran desarrollo de redes y bases de datos climáticos de los últimos años hace que, hoy en día, la mayor dificultad para utilizar modelos de distribución de las especies radique en la escasez de datos relativos a la biología de esas últimas. Un tipo de modelo que salva en parte esa limitación se encuentra en los llamados modelos de nicho ecológico (ENMs en inglés, *ecological niche models*) o modelos correlativos, que se basan en caracterizar el nicho ocupado por la especie considerada según las variables limitantes identificadas en los hábitats actuales que sabemos que son adecuados para la especie. Esa descripción

(modelo) del nicho podemos proyectarla a futuros escenarios climáticos y predecir la nueva distribución de la especie, aunque no tengamos un conocimiento exhaustivo de su biología. Si en cambio, necesitamos tener abundantes datos fiables de la relación entre la presencia o ausencia y las variables del medio, es decir, **los muestreos deben ser suficientemente intensos para evitar que los datos de presencia y ausencia sean simplemente ocasionales**. Otro inconveniente de los modelos ENMs es que cuando se quieren utilizar para prever la distribución de especies invasoras en las nuevas regiones invadidas, puede ocurrir que las variables del medio que limitan la distribución en las zonas donde la especie es nativa no existan en las nuevas regiones invadidas. Por otra parte, los modelos ENMs no tienen por qué haber definido los nichos potenciales sino los ocupados realmente, y en las nuevas zonas podría ser que esa misma especie ocupara una parte mayor o menor del nicho potencial, en particular en lo que se refiere a las interacciones bióticas. Además, esos modelos ENMs precisan de un gran número de datos para que la correlación entre presencia del organismo y las variables ambientales sea suficientemente sólida. Obsérvese también que los datos meteorológicos que habitualmente se poseen proceden de estaciones meteorológicas que **pueden no estar próximas o estrechamente relacionadas con los valores reales experimentados por los organismos en sus microclimas**, especialmente cuando se trata de microorganismos patógenos y de insectos que viven en íntima relación con la planta huésped.

B2.4.2. Modelos mecanicistas

Los modelos más mecanicistas parten del conocimiento de las relaciones entre los procesos fisiológicos de una especie y las variables del medio que son claves para ella; esos modelos no precisan, como en el caso de los ENMs, conocer la distribución geográfica actual de aquella. Sin embargo, sí precisan disponer de datos sobre la respuesta fisiológica de las especies a los factores meteorológicos, una información que probablemente esté disponible sólo para las especies nocivas más virulentas y estudiadas. Ejemplos de algunos hechos biológicos que resultan clave para determinar la distribución de las especies son la supervivencia, la reproducción y determinados comportamientos relevantes. Los modelos mecanicistas son aptos para predecir cambios en la biología de una especie en respuesta al Cambio Climático, tales como el número de generaciones o la fenología a lo largo del año. **Uno de los modelos parcialmente mecanicistas más utilizado para predecir la distribución de una especie invasora, o para analizar la respuesta de los insectos y los fitopatógenos al Cambio Climático, es CLIMEX**. En algunos casos, el ajuste de este modelo se ha mejorado con datos de la distribución actual de las especies, que le permiten definir para cada una un índice eco-climático que sirve para determinar la idoneidad de una localización para mantener a una especie. Este modelo, sin embargo, está más focalizado en las relaciones de los procesos fisiológicos de las especies con el clima, y en menor extensión en las interacciones bióticas que también tienen un papel importante y muy a menudo decisivo en la distribución de las especies. Así, por ejemplo, los cambios en la fenología tanto de las especies de organismos nocivos como de sus huéspedes, enemigos naturales, competidores y antagonistas microbianos, pueden provocar asincronías entre sus poblaciones que alteren el crecimiento y la dinámica poblacional de todos ellos.

B2.4.3. Un ejemplo de utilización de modelos para predecir la distribución de especies en función del Cambio Climático: el caso de la mosca de la aceituna, *Bactrocera oleae*

Dada la importancia del cultivo del olivo en la cuenca mediterránea, la extensión del mismo y de nuevos cultivos a nuevas zonas, la creciente incidencia del Cambio Climático en esas zonas y la gravedad del daño causado por la mosca del olivo (*B. oleae*), se ha dedicado un cierto esfuerzo a modelizar la distribución geográfica de esta plaga para prever sus cambios futuros y por tanto zonas de riesgo potencial. Además de esas consideraciones, la mosca de la aceituna es un buen ejemplo a tal efecto porque se han utilizado tanto modelos correlativos como mecanicistas para estudiar su distribución geográfica y posibles restricciones y expansiones.

Recientemente, Benhadi-Marín et al. (2020) han publicado un estudio en el que se utiliza un modelo de nicho ecológico para determinar las variables meteorológicas que más influyen en la distribución de la mosca del olivo y poder predecir, con ese conocimiento, las zonas de la Península Ibérica donde esta plaga se puede instalar con riesgo de que cause daños al olivar. A través de: (i) registros de publicaciones científicas; (ii) datos de los servicios públicos de seguimiento; (iii) bases de datos internacionales (p. ej., la GBIF (*Geographical Biodiversity Information Facility*; GBIF, 2018); y (iv) registros obtenidos por los autores, porque se mapeó la distribución tanto de la mosca del olivo como del olivo (el único huésped cultivado de la plaga) en la cuenca mediterránea. Se utilizaron un total de 762 registros de presencia en esa zona y se obtuvieron de ella los datos climáticos de 19 variables de las cuales nueve fueron eliminadas a la hora de confeccionar el modelo por presentar multi-colinealidad. El estudio permitió identificar tres variables meteorológicas como las más influyentes en la distribución de la mosca de la aceituna: (i) la precipitación del trimestre más frío; (ii) la precipitación del mes más seco; y (iii) la media del intervalo térmico diario (diferencia entre las temperaturas máxima y mínima). El modelo permitió identificar tres zonas de cultivo del olivo que podían ser potencialmente ocupadas por la mosca, más allá de las zonas ocupadas actualmente, en algunas de las cuales el cultivo del olivo es relativamente reciente, como Galicia y las vertientes portuguesa y española del Parque Natural Internacional del Duero; mientras que en otras, dicho cultivo se ha expandido a localizaciones anteriormente no aptas para ello, como en la Comunidad Autónoma de Castilla y León. Naturalmente, los propios autores señalan que esas zonas puede que no sean finalmente ocupadas por la mosca de la aceituna debido a factores no introducidos en el modelo, en especial las interacciones bióticas o la capacidad evolutiva del insecto. En cualquier caso, el estudio sirve para señalar aquellas zonas en donde se debe intensificar la vigilancia para la detección precoz de *B. oleae* y preparar las medidas oportunas para la mitigación de los daños que ocasiona.

Otra aproximación al estudio de los posibles cambios en la distribución de la mosca de la aceituna por efecto del Cambio Climático fue realizada por Gutiérrez et al. (2009). A diferencia del estudio antes mencionado de Benhadi-Marín et al. (2020), el de Gutiérrez et al. (2009) se basó en un modelo mecanicista que recoge la influencia de la temperatura en diversos procesos fisiológicos del olivo y de *B. oleae*; y en el caso del fitófago se consideraron la tasa de desarrollo de los diversos estadios y los umbrales de desarrollo, la reproducción, y la mortalidad. El modelo predijo los cambios de distribución en California y Arizona en EE. UU., y en Italia, según tres escenarios distintos de Cambio Climático, con aumentos de 1, 2 y 3 °C de la temperatura media diaria. Ese modelo permitió, a diferencia del anterior, la previsión de la cantidad de plaga y daño en cada una de las zonas de distribución del olivo y de la plaga al incorporar la relación bi-trófica, huésped y plaga, en el estudio. En general, se previó el movimiento del insecto hacia latitudes y altitudes superiores de las zonas favorables para la plaga, y su restricción en zonas más meridionales por efecto de la elevación de las temperaturas estivales causantes de una mayor mortalidad del insecto.

B.2.5. A modo de conclusiones

El Cambio Climático afecta a todos los sistemas biológicos y de forma particular a los agroecosistemas, y en ellos a los componentes y fenómenos propios de la Sanidad Vegetal. En la mitad de todas las enfermedades emergentes de las plantas, los agentes causales se diseminan por los viajes y el comercio internacional, que se han triplicado en volumen en la última década; pero tras ellos, los cambios en la climatología son el segundo factor más importante en dicha diseminación (Gullino et al., 2021). Como se ha detallado, las modificaciones que estos cambios inducen en la fisiología, comportamiento y distribución geográfica de las malas hierbas, así como de los organismos nocivos fitófagos y fitopatógenos, pueden estar **causados directamente** por la modificación de los valores de las variables meteorológicas,

pero también **indirectamente** a través de sus relaciones con las plantas cultivadas o las masas forestales, los competidores y sus antagonistas o enemigos naturales. También **la eficacia de los métodos con los que hoy en día contamos para la gestión de los problemas causados por los agentes nocivos puede verse alterada**, ya que aparecerán con mayor frecuencia plagas emergentes que se expandirán a nuevas áreas, y resultará más difícil aplicar medidas preventivas y de manejo debido a las dificultades para predecir la respuesta de los agentes nocivos, las plantas y sus interacciones frente a los nuevos escenarios que irán apareciendo globalmente.

Ante problemas tan complejos, parece claro que el efecto del Cambio Climático en la evolución de las malas hierbas, los insectos fitófagos y los agentes fitopatógenos es difícil de predecir, aunque podemos deducir algunas consecuencias, basándonos en el ciclo biológico de los organismos nocivos, su previsible comportamiento y expansión, y la epidemiología de las enfermedades y dinámica de población de las plagas que causan. Los efectos del Cambio Climático pueden no ser necesariamente negativos y existen ejemplos en la bibliografía de **algunas plagas y enfermedades que podrían verse desfavorecidas como consecuencia del Cambio Climático**. Por ejemplo, algunos modelos predicen que el incremento de temperatura en países tropicales sería desfavorable para algunos insectos fitófagos, puesto que ya se encuentran a temperaturas óptimas para su desarrollo (Deutsch et al., 2018). Es importante señalar la necesidad de **analizar cada caso concreto para hacer predicciones sobre cómo puede evolucionar en el futuro**, y puesto que esto dependerá mucho de la localidad geográfica en la que se encuentre el organismo nocivo, la precisión de la predicción será tanto mayor cuanto menor sea el área geográfica analizada y mayor el número de factores implicados evaluados. **Todos los cambios en la naturaleza son complicados de prever y por tanto de prevenir, y sus efectos negativos difíciles de mitigar** con los conocimientos que tenemos actualmente, en particular los derivados de las interacciones tróficas. Además, **los modelos hoy día disponibles son, en el mejor de los casos, insuficientes para responder de forma holística ante la complejidad del escenario** en el que los cambios se están dando, especialmente en los últimos años.

Debido a la gravedad de los problemas actuales y previsibles, bajo los auspicios de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria, y como una de las iniciativas clave del Año Internacional de la Sanidad Vegetal, once expertos internacionales han realizado, a instancias de la FAO, un "Examen científico sobre el impacto del Cambio Climático en las plagas de las plantas" (Gullino et al., 2021) en el que se muestra claramente que el impacto del Cambio Climático es uno de los mayores desafíos globales que enfrenta la comunidad de la Sanidad Vegetal, ya que aumentará el riesgo de propagación de plagas en los ecosistemas agrícolas y forestales, especialmente en las regiones más frías del Ártico, boreal, templado y subtropical. Por ejemplo, se sabe que un solo invierno inusualmente cálido podrá ser suficiente para favorecer el establecimiento de nuevos artrópodos fitófagos invasores, y algunos insectos fitófagos, como las moscas tefritidas de la fruta o el lepidóptero *Spodoptera frugiperda* con más de 80 huéspedes, ya se han propagado debido al clima más cálido. A estas expansiones se prevé que puedan seguir otras, como la de la langosta del desierto, considerada como la plaga migratoria más destructiva del mundo, debido a cambios en sus rutas migratorias y con ello también su distribución geográfica debido al Cambio Climático.

La diseminación y expansión de los organismos nocivos inducidas por estos cambios constituyen una amenaza para la seguridad alimentaria en su conjunto. Los pequeños agricultores, cuyos medios de vida dependen de la sanidad de sus cultivos, y aquellos que viven en países acosados por la inseguridad alimentaria, son especialmente vulnerables a estos riesgos. Por ello, el citado *Examen científico* presenta una serie de recomendaciones para mitigar el impacto del Cambio Climático sobre la Sanidad Vegetal. La principal de ellas, **el aumento de la cooperación internacional, se considera crucial porque la gestión efectiva de las plagas por parte de agricultores de un país o zona afecta el éxito de la que tenga lugar en otros**. Asimismo, se señala la urgente necesidad de incrementar la investigación sobre el impacto

del Cambio Climático en las plagas, mediante evaluaciones multi-factoriales que combinen los efectos bióticos y abióticos de mayor interés para cada país, y de más inversiones en el fortalecimiento de los sistemas y estructuras fitosanitarios nacionales en todos los países.

Pero además, el Marco Estratégico de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria 2020-2030 incluye la evaluación y gestión de los impactos del Cambio Climático en la Sanidad Vegetal, como uno de los ocho puntos de la agenda que deberá abordar la comunidad fitosanitaria mundial en el presente decenio. La FAO cree que es crucial responder a los desafíos interconectados del Cambio Climático, la pérdida de biodiversidad y la degradación ambiental simultáneamente, opinión compartida por los autores que a lo largo de este y otros capítulos del Libro han pretendido dar cuenta de algunas lagunas y retos e identificar caminos y soluciones para mitigarlos.

B2.6. Bibliografía

- Baldasano, J.M. 2007. Evidencias del actual cambio climático. Págs. 43-56, en: Presidencia de la Generalitat Valenciana. Cambio Climático y sus Consecuencias. Fundación Premios Rey Jaime I. Valencia.
- Bell, J.R., Alderson, L., Izera, D., Kruger, T., Parker, S., Pickup, J., Shortall, C.R., Taylor, M.S., Verrier, P., y Harrington, R., 2015. Long-term phenological trends, species accumulation rates, aphid traits, and climate: five decades of change in migrating aphids. *J. Anim. Ecol.* 84: 21-34.
- Benhadi-Marin, J, Santos, S.A.P., Baptista, P., y Pereira, J.A. 2020. Distribution of *Bactrocera oleae* (Rossi, 1790) throughout the Iberian Peninsula based on a maximum entropy modelling approach. *Ann. Appl. Biol.* 177: 112-120.
- Blanco-López, M.A., y Jiménez-Díaz, R.M. 1983. Effect of irrigation on susceptibility of sunflower to *Macrophomina phaseoli*. *Plant Dis.* 67: 1214-1217.
- Boland, G.J., Melzer, M.S., Hopkin, A., Higgins, V., y Nassuth, A. 2004. Climate change and plant diseases in Ontario. *Can. J. Plant Pathol.* 26: 335-350.
- Chakraborty, S., Tiedemann, A.V., y Teng, P.S. 2000. Climate change: potential impact on plant diseases. *Environ. Pollut.* 108: 317-326.
- Chakraborty, S., y Newton, A.C. 2011. Climate change, plant diseases and food security: An overview. *Plant Pathol.* 60: 2-14.
- Coakley, S.M., Scherm, H., y Chakraborty, S. 1999. Climate change and plant disease management. *Annu. Rev. Phytopathol.* 37: 399-426.
- Cook, R.J., y Yarham, D.J. 2006. Epidemiology in sustainable systems. Págs. 260-277, en: D.G. Jones, ed. *The Epidemiology of Plant Diseases*. Kluwer Publishers, Dordrecht.
- DeLucía, E.H. Nabity, P.D., Zavala, J.A., y Berenbaum, M.R. 2012. Climate change: Resetting plant-insect interactions. *Plant Physiol.* 60: 1677-1685.
- Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Tigchelaar, M., Battisti, D. S., Merrill, S. C., Huey, R. B., et al. 2018. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science* 919, 916-919. <https://doi.org/10.1126/science.aat3466>
- Fereres, A., y Raccach, B. 2015. Plant virus transmission by insects, en: eLS. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0000760.pub3>.
- Fujita, M., Fujita, Y., Noutoshi, Y., Takahashi, F., Narusaka, Y., Yamagushi-Shinozaki, K., y Shinozaki, K. 2006. Crosstalk between abiotic and biotic stress responses: a current view from the points of convergence in the stress signalling network. *Curr. Opin. Plant Biol.* 9: 436-442.
- Garrett, K.A., Dendy, S.P., Frank, E.E., Rouse, M.N., y Travers, S.E. 2006. Climate change effects on plant disease: Genomes to ecosystems. *Annu. Rev. Phytopathol.* 44: 201-221.
- Garrett, K.A., Forbes, G.A., Savary, S., Skelsey, P., Sparks, A.H., Valdivia, C., van Bruggen, A.H.C., Willocquet, L., Djurle, A., Duveiller, E., Eckersten, H., Pande, S., Cruz, C.V., y Yuen, J. 2011. Complexity in climate-change impacts: An analytical framework for effects mediated by plant disease. *Plant Pathol.* 60: 15-30.
- GBIF. 2018. The global biodiversity information facility. What is GBIF? Available from: <https://www.gbif.org/what-is-gbif>
- Gullino, M.L., Albajes, R., Al-Jboory, I., et al., IPCC Secretariat. 2021. Climate-change impacts on plant pests: a global challenge to prevent and mitigate plant-pest risks in agriculture, forestry and ecosystems. FAO, Rome, in behalf of the IPCC Secretariat.
- Gutierrez, A. P., Ponti, L., y Cossu, Q. A. 2009. Effects of climate warming on olive and olive fly (*Bactrocera oleae* [Gmelin]) in California and Italy. *Clim. Change* 95, 95-217.
- Hannukkala, A.O., Kaukoranta, T., Lehtinen, A., y Rahkonen, A. 2007. Late-blight epidemics on potato in Finland, 1933-2002; increased and earlier occurrence of epidemics associated with climate change and lack of rotation. *Plant Pathol.* 56: 167-176.
- Harrington, R., Clark, S.J., Welham, S.J., Verrier, P.J., Denholm, C.H., Hullé, M., Maurice, D., Rounsevell, M.D., Cocu, N., y European Union Examine Consortium. 2007. Environmental change and the phenology of European aphids. *Global Change Biol.* 13: 1550-1564. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01394.x>

- Hill, M.P., y Thomson, L.J. 2015. Species distribution modelling in predicting response to climate change. Págs. 16-37, en: C. Björkman y P. Niemelä, eds. *Climate Change and Insect Pests*. CABI, Wallingford, OX10 8DE, UK.
- Hulle, M., Coeur d'Acier, A., Bankhead-Dronnet, S., y Harrington, R. 2010. Aphids in the face of global changes. *C.R. Biol.* 333: 497-503.
- Hunjan, M.S., y Lore, J.S. 2020. Climate change: Impact on plant pathogens, diseases, and their management. Págs. 85-100, en: K., Jabran, S, Florentine, y B.S. Chauhan, eds. *Crop Protection in Changing Climate*. Springer Nature Switzerland.
- Iglesias, A. 2008. Cambio climático y medidas de adaptación para la agricultura. Págs. 31-44, en: J. Lamo de Espinosa y P. Urbano Terrón, eds., *Repercusiones del Cambio Climático en la Agricultura y la Alimentación Mundial*. Eumedía S.A. Madrid.
- Jabran, K., Florentine, S., y Chauhan, B.S. 2020. Impacts of climate change on weeds, insect pests, plant diseases and crop yields: Synthesis. En: Jabran, K., Florentine, S., Chauhan, B., eds. *Crop Protection Under Changing Climate*. Springer, Cham.
- Jiménez Díaz, R.M. 2008. Impactos del cambio climático en las enfermedades de las plantas. Págs. 143-162, en: J. Lamo de Espinosa y P. Urbano Terrón, eds. *Repercusiones del Cambio Climático en la Agricultura y la Alimentación Mundial*. Eumedía S.A. Madrid.
- Jung, T. 2009. Beech decline in Central Europe driven by the interaction between *Phytophthora* infections and climatic extremes. *Forest Pathol.* 39: 73-94.
- Juroszek, P., Bartsch, L., Fontaine, J.F., Racca, P., y Kleinhenz, B. 2022. Summary of the worldwide available crop diseases review studies that were driven by climate change scenarios published during the past 20 years. *Plant. Pathol.* <https://doi.org/10.1111/ppa.13634>.
- Kim, Y.-K., y Bockus, W.W. 2003. Temperature-sensitive reaction of winter wheat cultivar AGSEECO 7853 to *Stagonospora nodorum*. *Plant Dis.* 87: 1125-1128
- Landa, B.B., Navas-Cortés, J.A., Jiménez-Gasco, M.M., Katan, J., Retig, B., y Jiménez-Díaz, R.M. 2006. Temperature response of chickpea cultivars to races of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris*, the causal agent of Fusarium wilt. *Plant Dis.* 90: 365-374.
- Landa, B.B., Montes-Borrego, M., y Navas-Cortés, J.A. 2013. Use of PGPR for controlling soilborne fungal pathogens: Assessing the factors influencing its efficacy. Págs. 259-292, en: D. K. Maheshwari, ed. *Series Microbiology Monographs. Bacteria in Agrobiolgy: Disease management*. Springer. Heidelberg, Alemania.
- Lehmann, P., Ammúnét, T., Barton, M., et al. 2020. Complex responses of global insect pests to climate warming. *Front. Ecol. Environ.* 18: 141-150. <https://doi.org/10.1002/fee.2160>.
- Manning, W.J., y Tiedemann, A.V. 1995. Climate change: Potential effects of increased atmospheric carbon dioxide (CO₂), ozone (O₃), and ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. *Environ. Pollution* 88: 219-245.
- Manter, D.K., Reeser, P.W., y Stone, J.K. 2005. A climate-based model for predicting geographic variation in swiss needle cast severity in the Oregon coast range. *Phytopathology* 95: 1256-1265.
- Marco, C.F., y Aranda, M.A. 2005. Genetic diversity of a natural population of cucurbit yellow stunting disorder virus. *J. Gen. Virol.* 86: 815-822.
- Mboup, M., Bahri, B., Leconte, M., De Vallavieille-Pope, C., Kaltz, O., y Enjalbert, J. 2012. Genetic structure and local adaptation of European wheat yellow rust populations: the role of temperature-specific adaptation. *Evol. Appl.* 5: 341-352.
- Moriones, E., y Navas-Castillo, J. 2000. Tomato yellow leaf curl virus, an emerging virus complex causing epidemics worldwide. *Virus Res.* 71: 123-134.
- Munkvold, G.P., y Yang, X.B. 1995. Crop damage and epidemics associated with 1993 floods in Iowa. *Plant Dis.* 79: 95-101.
- Navas-Cortés, J.A., Landa, B.B., Montesinos, E., Fereres, A., González-Andújar J.L., y Quesada-Moraga, E. 2019. Repercusiones potenciales del cambio climático en la Sanidad Vegetal. Págs. 441-484, en: R. Jiménez Díaz y López González M.M., eds. *Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España*. UCOPress. Editorial Universidad de Córdoba. Córdoba
- Perilla-Henao, L.M., y Casteel, C.L. 2016. Vector-borne bacterial plant pathogens: Interactions with hemipteran insects and plants. *Front. Plant Sci.* 7:1163. 10.3389/fpls.2016.01163.
- Richerzhagen, D., Racca, P., Zeuner, T., Kuhn, C., Falke, K., Kleinhenz, B., y Hau, B. 2011. Impact of climate change on the temporal and regional occurrence of cercospora leaf spot in lower saxony. *J. Plant Dis. Plant Prot.* 118: 162-177.
- Ruttledge, A., y Chauhan, B.S. 2020. Climate change and weeds of cropping systems. Págs. 57-84, en: K. Jabran, S. Florentine, S., y B.S. Chauhan, eds. *Crop Protection in Changing Climate*. Springer Nature Switzerland.
- Sun, Y.C., Yin, J., Chen, F.J., Wu, G., y Ge, F. 2011. How does atmospheric elevated CO₂ affect crop pests and their natural enemies? Case histories from China. *Insect Sci.* 18: 393-400.
- Van Mantgem, P. J., Stephenson, N.L., Byrne, J.C., Daniels, L.D., Franklin, J.F., Fulé, P.Z., Harmon, M.E., Larson, A.J., Smith, J.M., Taylor, A.H., y Veblen, T.T. 2009. Widespread increase of tree mortality rates in the western United States. *Science* 323: 521-524.
- Vilà, M., Beaury, E.M., Blumenthal, D.M., Bradley, B.A., et al. 2021. Understanding the combined impacts of weeds and climate change on crops. *Environ. Res. Lett.* 16. 034043. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe14b>.
- World Health Organization, WHO. 2018. Circular economy and health: risks and opportunities. WHO Regional Office for Europe United Nations City, 51DK-2100 Copenhagen Ø, Denmark.

B. Retos para la Sanidad Vegetal en la próxima década

B3. Los Productos Fitosanitarios y los Bioplaguicidas, y su papel en la Sanidad Vegetal del siglo XXI

B3.1. Productos Fitosanitarios convencionales: definiciones, tipos principales, y utilización en el siglo XXI

Entre los diversos nombres relativos a los Productos Fitosanitarios (PP. FF.) que podemos encontrar en la bibliografía especializada, la legislación, y otros foros de la Sanidad Vegetal, se encuentran: plaguicidas (o pesticidas para usar un barbarismo tomado del inglés), productos de protección vegetal, biocidas y otros varios. En el presente libro hemos preferido utilizar el término Productos Fitosanitarios para seguir al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) de España, -que traduce con ese nombre el término usado en la legislación de la Unión Europea (UE) que es *pesticide*- en un texto legislativo clave de la Sanidad Vegetal en España, como es el Real Decreto 1311/2012 (BOE, 2012), por el que se establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios. Mediante el mismo se traspone a la legislación española la *'Directive 2009/128/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009: establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides'*. Esta Directiva marca un hito esencial para la agricultura de la UE del siglo XXI en lo que se refiere al uso de este tipo de productos.

El tipo de sustancias que engloba el término Productos Fitosanitarios varía según la organización considerada en sus estadísticas -sean la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la Organización Mundial de la Salud (OMS), y la propia Comisión Europea (CE)- o los diferentes países incluidos en esas organizaciones. El Reglamento (CE) 1107/2009 (DOUE, 2009, 2011), en su artículo 2, incluye la definición siguiente de producto fitosanitario:

El presente Reglamento se aplicará a los productos, en la forma en que se suministren al usuario, que contengan o estén compuestos de sustancias activas, protectores o sinergistas, y que estén destinados a uno de los usos siguientes:

- a) proteger los vegetales o los productos vegetales de todos los organismos nocivos o evitar la acción de estos, excepto cuando dichos productos se utilicen principalmente por motivos de higiene y no para la protección de vegetales o productos vegetales;
- b) influir en los procesos vitales de los vegetales como, por ejemplo, las sustancias que influyen en su crecimiento, pero de forma distinta de los nutrientes;
- c) mejorar la conservación de los productos vegetales, siempre y cuando las sustancias o productos de que se trata no estén sujetos a disposiciones comunitarias especiales sobre conservantes;

- d) destruir vegetales o partes de vegetales no deseados, excepto las algas, a menos que los productos sean aplicados en el suelo o el agua para proteger los vegetales;
- e) controlar o evitar el crecimiento no deseado de vegetales, excepto las algas, a menos que los productos sean aplicados en el suelo o el agua para proteger los vegetales.

Estos productos se denominan, en lo sucesivo, Productos Fitosanitarios y por ello incluyen un amplio abanico de acaricidas, bactericidas, fungicidas, herbicidas, insecticidas, molusquicidas, rodenticidas, nematocidas, etc. según se utilicen contra ácaros, bacterias, hongos y oomicetos, malas hierbas, insectos, moluscos, roedores o nematodos, respectivamente (referidos de forma generalizada como "plaga" en lo que sigue). Además, algunas de las organizaciones anteriormente mencionadas incluyen también en sus estadísticas a los reguladores de crecimiento de plantas y protectores de la madera. En el caso de la FAO, los PP. FF. también incluyen a los productos biológicos utilizado para el control de los organismos nocivos de las plantas (<http://www.fao.org/faostat/en/#data/RP>).

Según la *Environmental Protection Agency*, Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) de EE. UU. las materias activas de los PP. FF. se pueden clasificar en: (i) convencionales, es decir las que no son plaguicidas biológicos; (ii) antimicrobianas, utilizadas para destruir o suprimir el crecimiento de microorganismos; y (iii) Bioplaguicidas o productos de origen natural utilizados especialmente en el control biológico y la agricultura ecológica (Atwood y Paisley-Jones, 2017).

Otra clasificación, basada en su modo de acción, agrupa los PP. FF. en: (i) no sistémicos, cuando el producto actúa mediante contacto directo con la plaga y permanece solo en el exterior de la planta; (ii) sistémicos, cuando el producto es absorbido por el tejido sobre el que se deposita y transportado en el xilema –o en el floema en contados casos- de la planta, y actúa solo después de que se incorpora al organismo nocivo por absorción o por consumo del tejido tratado, dependiendo de la plaga; (iii) de amplio espectro (de naturaleza no selectiva y utilizado para diversas plagas en general); (iv) curativos, cuando son aplicados una vez que el cultivo está afectado por la plaga; y (v) preventivos, cuando son aplicados antes de que se produzca la afección y antes de que comiencen los síntomas de ella (Zhang et al., 2011).

La Unión Europea (UE), en el Reglamento 1185/2009 (BOE, 2009), incluye entre los productos para protección de los vegetales los acaricidas, insecticidas, fungicidas, herbicidas, reguladores del crecimiento y repelentes. Se recogen también en dicho término los productos para uso en espacios verdes urbanos y para infraestructuras como canales, ferrocarriles y carreteras y el uso forestal.

Pero la UE tiene distinta regulación para los denominados Bioplaguicidas, o productos de origen natural que se describen con detalle en el Apartado B3.6. En este capítulo se ha adoptado ese criterio, para no crear confusión entre los PP. FF. y los Bioplaguicidas utilizados en la Sanidad Vegetal.

Los PP. FF. convencionales, por su naturaleza, están basados en: (i) Química básica: como los aceites, productos a base de azufre, cobre y sus compuestos, derivados de sustancias presentes en la naturaleza (extractos vegetales como las piretrinas, concentrados vegetales repelentes, etc); y (ii) Química de síntesis: comprende principios activos naturales con actividad contra organismos nocivos y su modificación mediante ingeniería química, para potenciar su actividad (misma eficacia con menor dosis), mejorar su estabilidad ante agentes físicos (calor, frío, rayos UV, lavado por lluvia) y su facilidad para penetrar en los tejidos vegetales. Todos los años las empresas realizan ensayos sobre miles de productos con posible acción fitosanitaria y mejoran su perfil químico.

El principio del siglo XXI supone una etapa de grandes novedades y cambios en el campo de los PP. FF. ya que entre 2000 y 2016 se descubrieron y aprobaron en la UE 120 sustancias activas, pero debido a la nueva legislación europea en materia fitosanitaria, también desaparecieron de la lista comunitaria más de 600 de ellas. Las aprobadas actualmente para su comercialización en los distintos Estados miembros han sido previamente evaluadas y cumplen los principios uniformes del Reglamento 1107/2009, lo que significa que el uso representativo evaluado para la aprobación no representa un riesgo para salud humana, salud animal ni para el medioambiente y algunas de estas sustancias han sido aprobadas como sustancias de bajo riesgo. Pero además se ha creado la categoría de sustancias básicas, para dar una oportunidad para la aprobación de sustancias, bajo la regulación de la UE, que no se utilizan principalmente para fines fitosanitarios, pero que se ha observado que son útiles para estos fines. Sin embargo, el coste y el plazo para su aprobación como sustancias activas eran prohibitivos para las pequeñas empresas y asociaciones de agricultores con el Reglamento (CE) 1107/2009 relativo a la comercialización de PP. FF., pero en la actualidad existe la posibilidad de aprobar este tipo de compuestos como sustancias básicas, que no requieren una evaluación tan rigurosa como los restantes PP. FF.

Según la definición de la FAO, la Gestión Integrada de Plagas (GIP) es la “consideración cuidadosa de todas las técnicas de control de plagas disponibles y la posterior integración de medidas apropiadas que reduzcan el desarrollo de poblaciones de plagas y mantengan los pesticidas y otras intervenciones a niveles que estén económicamente justificados y reduzcan o minimicen los riesgos para la salud humana y el medioambiente” (FAO, 2003, 2017). Este tipo de gestión, que es actualmente obligatoria en todos los Estados de la UE, requiere: (i) el uso coordinado de la información ambiental y de plagas con los métodos de control disponibles para prevenir niveles inaceptables de daño por los medios más económicos; (ii) la menor alteración posible de los agroecosistemas; y (iii) utilizar los mecanismos naturales de control de plagas, con el menor riesgo posible para las personas, las propiedades y el medio medioambiente. Para cualquier situación de plaga, habrá varias opciones a considerar conjuntamente, siendo el uso de PP. FF. el último recurso a utilizar y solo en los casos en que sea estrictamente necesario, según la legislación de la UE (cf., Capítulo C6., para una más detallada exposición del concepto de GIP).

B3.2. Uso actual de los Productos Fitosanitarios

A menudo se indica en la bibliografía que los aumentos de productividad de la agricultura en los últimos decenios se han conseguido en buena medida por un mayor uso y mejora de los PP. FF., en particular de los herbicidas (Oerke, 2006). Según dicho autor, la efectividad media de los PP. FF. para el control de plagas, enfermedades y malas hierbas en los seis cultivos con mayor superficie agrícola en el mundo se estimó en el 53 %. Por otra parte, también señala que la eficiencia de los mencionados productos varía ampliamente según zonas geográficas del mundo, desde un máximo del 71 % en el NO de Europa y el 63 % en América de Norte y la Europa meridional, hasta un mínimo del 32 % en África Oriental y la ex Unión Soviética

B3.2.1. Cantidad total de Productos Fitosanitarios utilizados

El uso de PP. FF. de síntesis se fue incrementando durante el siglo pasado e inicios del presente, aunque con variaciones según la naturaleza del producto fitosanitario (PF) y el país. En la UE, el uso de PP. FF. se ha estabilizado bastante desde 2010, con un ligero descenso de los herbicidas, si contabilizamos el uso de PP. FF. en toneladas de sustancia activa (Fig. B3.1.). Una estadística reciente indica que las ventas (toneladas) de PP. FF. en Europa en 2019 descendieron un 6 % respecto al año anterior y un 10 % respecto a 2016, año este último en que se había alcanzado un máximo de ventas, después del cual se ha producido un ligero descenso en la venta de PP. FF. durante 3 años consecutivos. Notemos, sin embargo, que

esos últimos datos se refieren a ventas de PP. FF. y no a su uso (no disponibles para 2019) que es al que se refieren los datos de la FAO expuestos en la Fig. B3.1.

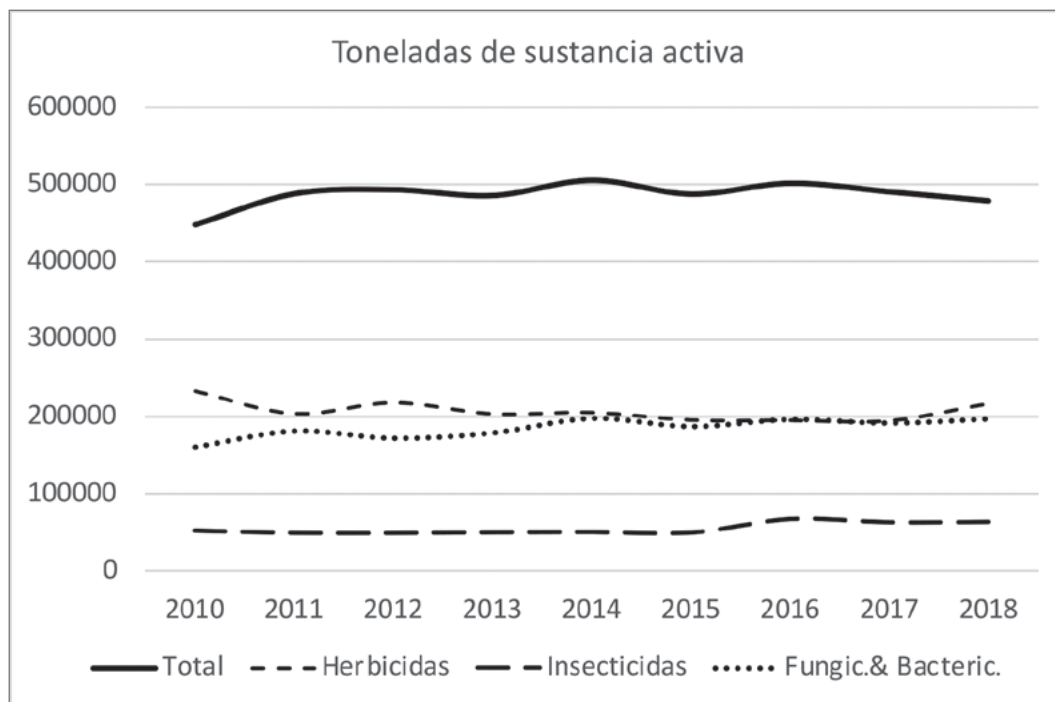


Figura 1. Uso de productos fitosanitarios en la Unión Europea en toneladas de sustancia activa en el periodo 2010 a 2018. Fuente FAO (<http://www.fao.org/faostat/en/#data/RP>).

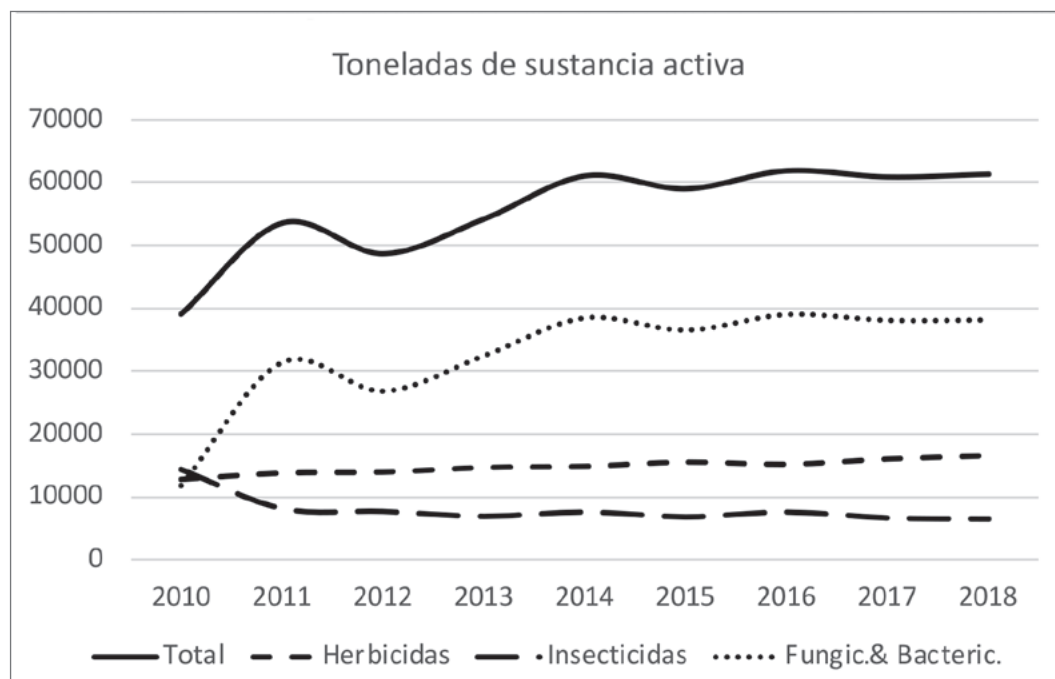


Figura 2. Uso de productos fitosanitarios en España en toneladas de sustancia activa en 2010 - 2018. Fuente FAO (<http://www.fao.org/faostat/en/#data/RP>).

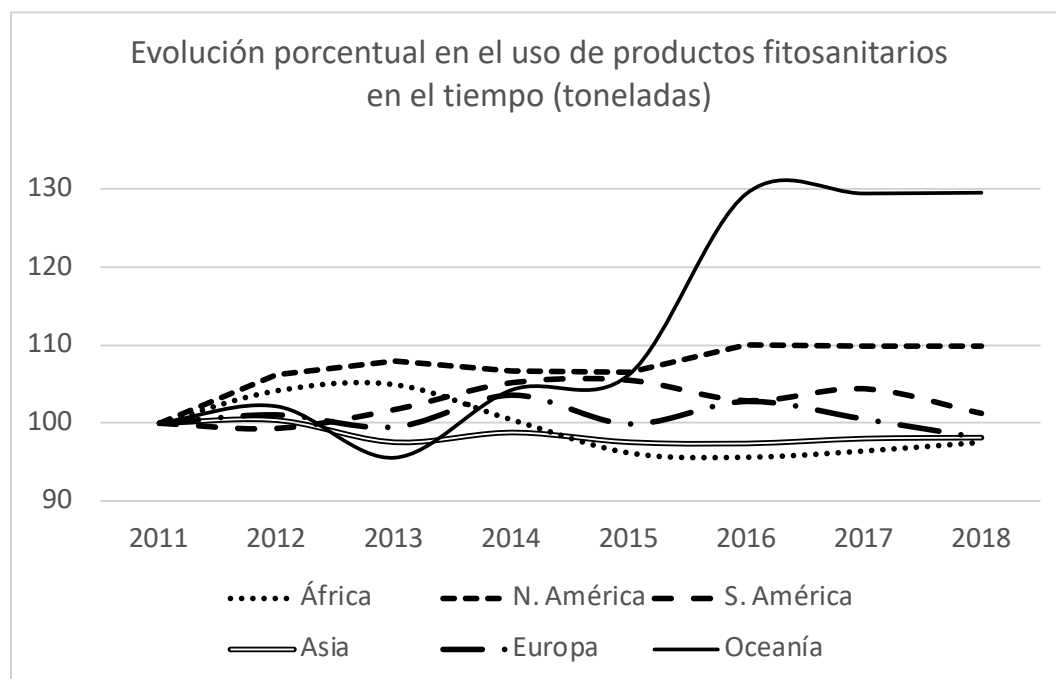
En España, la tendencia no ha sido muy distinta a la de la UE, aunque cabe resaltar el aumento significativo en el uso de fungicidas y bactericidas hasta 2014, tras el cual se estabilizó hasta los años más recientes (Fig. B3.2.). Según Hinarejos y Palomar (2019), el sector de los PP. FF. empleó a 26.000 personas en Europa, de las cuales el 20 % estaba relacionado con la I+D y servicios técnicos. En España, los empleos alcanzan 1.500 personas, unos 5.000 puntos de venta, ya sean privados o de cooperativas, alrededor de 6.000 empresas de tratamientos y 800.000 usuarios profesionales inscritos en el Registro Oficial de Productores y Operadores de Medios de Defensa Fitosanitarias (ROPO) (MAPA, 2018). Actualmente,

España está a la cabeza en la UE en el uso de PP. FF debido al aumento de la agricultura intensiva en las últimas décadas.

B3.2.2. Cantidad de Productos Fitosanitarios utilizados por continente

Si observamos la evolución en el uso de sustancias activas (toneladas) por continente (Fig. B3.3.) en el periodo de 2011-2018, la **tendencia general es de un consumo estable**, con un aumento significativo en Oceanía y un ligero descenso en los últimos años en África y Asia.

Figura 3. Cambios en el uso de productos fitosanitarios por continente en toneladas de sustancia activa en el periodo 2011 a 2018 referidos a 100 % del uso en el año 2011. Fuente FAO (<http://www.fao.org/faostat/en/#data/RP>).



Hay que tener en cuenta, al observar las mencionadas cifras de evolución en el uso de los PP. FF., que la productividad de la agricultura ha aumentado sensiblemente en los últimos quinquenios y por ello encontraríamos valores decrecientes si se hubieran utilizado las cantidades de PP. FF. en toneladas por unidad de producción. Además, esas cifras comparativas podrían cambiar ligeramente si consideráramos: (i) que los PP. FF. más recientes tienen contenidos de sustancias activas cada vez menores; y (ii) que el uso del suelo con finalidades agrícolas ha aumentado o variado en cultivos en varias regiones del mundo. No obstante, parece ajustada a la realidad la afirmación de que **el progreso en la aplicación de métodos de control distintos a los PP. FF. no se está reflejando en la disminución significativa del uso de estos**. Lógicamente, esta es una conclusión poco precisa, que no puede obviar los avances que se están produciendo en ciertos sistemas de cultivo intensivo, ej., frutales y productos hortícolas, fruto de la investigación científico-técnica y la transferencia que se están llevando a cabo en las regiones tecnológicamente más avanzadas. Por el contrario, es necesario recalcar: (i) que en cultivos más extensivos la disminución en el uso de PP. FF. es insuficiente, siendo que aquellos, a fin de cuentas, son los usuarios mayoritarios de dichos productos; y (ii) que el uso de Bioplaguicidas se ha incrementado, aunque la utilización de estos es todavía baja en comparación con los PP. FF. de síntesis.

En definitiva, queda un largo trecho para conseguir los objetivos que se marcó la Directiva 2009/128/EC y los respectivos Planes de Acción Nacionales de los Estados miembros (véanse al respecto los Apartados B3.7. y B3.8. de este Capítulo) en los que se aborda el presente y futuro de los PP. FF. y de los Bioplaguicidas en la Sanidad Vegetal).

B3.3. Cara y cruz de los Productos Fitosanitarios convencionales

Como se ha indicado anteriormente (cf., Capítulo A1.), los PP. FF. están contribuyendo de manera decisiva al aumento de la productividad de los cultivos, uno de los objetivos clave en la agricultura del siglo XXI. A ello deberíamos añadir, en el lado positivo, su papel en la prevención de la transmisión de patógenos humanos y del ganado. Aunque no parece necesario hacer un balance comparativo de esos beneficios con los efectos adversos que indudablemente tienen, sí es de interés exponer esos últimos con la finalidad de que puedan ser evitados o, al menos, mitigados.

Hay que señalar que los beneficios del uso de los PP. FF. no son solo los directamente relacionados con un mayor rendimiento de los cultivos y las ganancias directas que se esperan de su uso. Por ejemplo, el efecto de eliminar los insectos fitófagos que se alimentan de un cultivo trae el beneficio directo de mayor rendimiento y una mejor calidad del producto del mismo. Estos efectos principales dan como resultado un número variable, pero muy elevado, de beneficios primarios que van desde la protección del paisaje hasta mejoras en la vida humana. Los beneficios secundarios son los beneficios menos inmediatos o menos obvios que resultan de los beneficios primarios, que pueden ser menos intuitivamente obvios o a más largo plazo. De ello se deduce que para los beneficios secundarios es más difícil establecer la causa y el efecto, pero sin embargo pueden ser poderosas justificaciones para el uso de PP. FF. Por ejemplo, el mayor rendimiento del cultivo podría generar ingresos adicionales que podrían destinarse a la educación o atención médica, lo que daría lugar a una población más saludable y mejor educada. Hay varios beneficios secundarios identificados, que van desde personas más en forma hasta la conservación de la biodiversidad. A nivel global se han obtenido enormes beneficios del uso de PP. FF. en la silvicultura, la salud pública y el ámbito doméstico y, por supuesto, en la agricultura.

Como un ejemplo de las ventajas e inconvenientes de estos productos, se puede citar el caso de los compuestos cúpricos que se utilizan tanto en agricultura convencional como en agricultura ecológica, y que tienen una larga trayectoria de utilización en los cinco continentes, desde los inicios de uso del caldo bordelés allá por 1865 como fungicida para el control del mildiu de la vid (*Plasmopara viticola*) en Francia. Desde entonces, una gran cantidad de productos fungicidas y bactericidas basados en distintos compuestos de cobre (Cu) han sido desarrollados y comercializados en la mayoría de los países. Según Lamichhane et al. (2018), las principales ventajas de este tipo de PP. FF. son: (i) la toxicidad relativamente alta para numerosos hongos y bacterias fitopatógenos de las plantas; (ii) el bajo costo; (iii) la baja toxicidad para los mamíferos de los compuestos de Cu fijados; y (iv) su estabilidad química y efectos residuales prolongados. Pero también se han detectado un número creciente de inconvenientes como: (i) la fitotoxicidad en determinados estados fenológicos de muchas especies de frutales y plantas hortícolas; (ii) el desarrollo de cepas de bacterias resistentes al cobre; (iii) la acumulación en el suelo; y (iv) los efectos negativos en la microbiota del mismo, así como en los parámetros de calidad de los alimentos. Por ello, hay actualmente una presión regulatoria en la agricultura mundial para limitar el uso de PP. FF. basados en Cu, que ha dado lugar a varias restricciones, limitando el número de tratamientos incluida la impuesta por el Reglamento 473/2002 (DOUE-L-2002-80482) y por el Reglamento 2018/1981 (DOUE-L-2018-317), y se están desarrollando estrategias de mitigación para limitar los efectos negativos de los compuestos a base de Cu que incluyen su uso optimizado, la remediación del suelo y el desarrollo y aplicación de alternativas a los mismos para una protección sostenible de los cultivos (Lamichhane et al., 2018).

Mucho se ha investigado y escrito desde la publicación del famoso libro de la bióloga marina Rachel Carson '*Silent Spring*' en 1962, en el que se exponían los riesgos del uso masivo de PP. FF. de síntesis y que planteó, por primera vez, preocupación entre el público estadounidense acerca de los problemas ambientales derivados del uso de compuestos sintéticos. Un resultado directo de la alarma creada fue

la prohibición nacional del uso del insecticida DDT en 1972, y uno indirecto, la creación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

Sesenta años después, se dispone de un gran número de datos sobre diversos tipos de riesgos, muchos de ellos obtenidos con una metodología muy rigurosa y con potentes herramientas de análisis, no sólo de laboratorio sino también de cultivos en condiciones reales (Gill y Garg, 2014). Los efectos adversos de los PP. FF. de síntesis se dan no solo sobre los organismos diana, sean estos artrópodos fitófagos, agentes fitopatógenos o malas hierbas, sino también sobre otros que no son diana. Se ha demostrado que los PP. FF. contribuyen a la disminución de organismos no objetivo, como abejas y aves, y afecta a la biodiversidad acuática, lo que contribuye a la crisis mundial de la biodiversidad. El uso desenfrenado de estos productos químicos en muchos países, bajo el adagio, "si poco es bueno, mucho más será mejor", ha tenido impactos negativos en los seres humanos y en otras formas de vida. Entre los efectos adversos destacaremos principalmente dos: (i) el desarrollo de resistencia en los organismos diana; y (ii) el resurgimiento subsiguiente de estos últimos.

B3.3.1. Resistencia de los organismos nocivos a los Productos Fitosanitarios

La resistencia a la sustancia activa de un PF es la **reducción heredable de la sensibilidad de un organismo a aquella por efecto de la exposición repetida** a la sustancia activa, que se hace **patente porque las dosis habituales y recomendadas del PF no consiguen disminuir la población** del organismo, como ocurría antes de la aparición de la resistencia. Este efecto adverso es una de las principales limitaciones en el uso de PP. FF. y a pesar de los esfuerzos innovadores de las empresas productoras para el desarrollo y comercialización de nuevas sustancias activas, hoy en día se cuentan por centenares el número de casos de PP. FF. con citas de poblaciones resistentes del organismo diana en el mundo. De hecho, el fenómeno de la resistencia a los PP. FF. fue uno de los problemas emergentes más importantes de la Sanidad Vegetal detectados en una encuesta llevada a cabo por la *International Plant Protection Convention* (IPPC) de la FAO (IPPC) en 2016. La frecuencia con la que se emplea un PF es uno de los factores cruciales a la hora de propiciar la aparición de resistencias y, de hecho, **la disminución creciente del número de PP. FF. autorizados tiene el riesgo de acelerar la aparición de organismos resistentes a ellos, al dificultar la puesta en práctica de la alternancia de productos con distintos modos de acción para el tratamiento de ciertos organismos nocivos, que es una estrategia clave para mitigar el riesgo de la aparición de resistencias.** Además de prevenir el uso frecuente de un mismo PF, la preservación de una fracción de la población de organismo nocivo sin estar sometida a la acción de este -denominada creación de refugios-, es otra estrategia que evita, o por lo menos retrasa, la aparición de la resistencia. La creación de refugios opera así porque los individuos resistentes al PF no tienen ventajas adaptativas respecto a los no-resistentes si no sometemos ambos al PF. El riesgo de desarrollo de resistencia a un PF en un organismo nocivo depende tanto de la naturaleza del PF como de las características del organismo nocivo, y a partir de ambos factores se puede estimar la probabilidad y rapidez de aparición de la resistencia y diseñar estrategias para su prevención. Así, por ejemplo, un organismo nocivo con una tasa reproductora alta tiene una mayor probabilidad de desarrollar resistencia y de que esta se extienda entre la población, que otro organismo nocivo con menor capacidad reproductora; además, dicha probabilidad será todavía mayor si el PF se emplea a dosis inferiores a la recomendada que permita la supervivencia de parte de la población tratada.

B3.3.2. Resurgimiento rápido de los organismos diana

Este problema suele aparecer **poco después de la aplicación frecuente de un PF** y se explica a través de varios mecanismos (Dutcher, 2007). En insectos fitófagos, cuando la dosis del PF aplicada no es suficiente para eliminar un número relevante de organismos nocivos, los supervivientes se pueden ver favorecidos

bien por la eliminación o disminución de competidores, bien por la mejora en su fisiología que le hace aumentar la fecundidad y alimentación sobre la planta, un fenómeno llamado hormesis. Sin embargo, la causa contrastada del resurgimiento del organismo nocivo es, en un gran número de casos, la eliminación de enemigos naturales expuestos colateral y directamente al PF, sean depredadores, parasitoides o entomopatógenos antagonistas. Además de estos, diversos organismos también se pueden ver afectados directamente por las aplicaciones de un PF, caso de los insectos polinizadores y los habitantes del suelo. Todos estos organismos no diana pueden ser expuestos indirectamente a los PP. FF. o a las sustancias resultantes de su degradación por la contaminación de varios factores del medioambiente, tales como el agua, el suelo o el aire, a través de varias vías de diseminación o a través de la cadena trófica por el fenómeno de la bio-magnificación, por el cual la concentración de un tóxico en un organismo aumenta desde nudos tróficos primarios a los superiores. El impacto medioambiental y la toxicidad para las personas de un PF se ha intentado estimar a través del 'Cociente de Impacto Ambiental' (EIQ, *Environmental Impact Quocient* en inglés), que se obtiene a partir de las características más importantes de la toxicidad para los distintos componentes del medioambiente y de la diseminación del PF. Periódicamente se publican los EIQ de los nuevos PP. FF. y la revisión de los anteriores todavía autorizados.

B3.4.Efectos de los Productos Fitosanitarios en la salud humana, medioambiental, y animal

B3.4.1. Efectos negativos en la salud humana

El impacto directo e indirecto de los PP. FF. en las personas por la presencia de residuos de ellos en los alimentos o por la contaminación del medioambiente ha merecido una particular atención en la legislación y la bibliografía científica. La prevención de los residuos tóxicos en los alimentos, incluidos los piensos para el ganado, se consigue con el establecimiento de los límites máximos de residuos (LMR) para cada PF y alimento. El LMR es la máxima cantidad de residuo de un PF que es legalmente autorizado en un alimento concreto en el momento de su comercialización, cuando el PF es aplicado según la normativa para su uso. Los LMR pueden variar de un país a otro en función de una dieta estándar que permite calcular la cantidad máxima de residuo que puede ingerir un consumidor sin que se menoscabe su salud. La UE publica los valores del LMR para cada PF y alimento y esos valores son comunes para todos los Estados de la UE. Asimismo, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria o *European Food Safety Authority* (EFSA) realiza anualmente una encuesta acerca de los residuos hallados en muestras de alimentos consumidos en la UE (cf., Apartados B3.4.1. y B3.4.2.).

La EFSA y la ECHA (Agencia Europea de Químicos o *European Chemicals Agency*) son dos organismos de la UE que desempeñan funciones distintas pero complementarias en la evaluación de las sustancias activas utilizadas en los PP. FF. La ECHA es responsable de la valoración del peligro de una sustancia determinada, mientras que la EFSA evalúa los riesgos que puede plantear la exposición a una sustancia determinada. La valoración del peligro realizada por la ECHA complementa la *evaluación del riesgo* de la EFSA.

El envenenamiento humano por plaguicidas ha sido visto durante mucho tiempo como un grave problema de salud pública. Ya en 1990, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estimó que alrededor de 1 millón de intoxicaciones accidentales con PP. FF. ocurrían anualmente, lo que provocaba aproximadamente 20.000 muertes. Treinta años después, no existe una imagen actualizada del envenenamiento por PP. FF. a nivel mundial a pesar de un aumento en el uso global de los mismos. Boedeker et al. (2020) revisaron sistemáticamente la prevalencia de intoxicación aguda no intencional por plaguicidas y esti-

maron el número global anual de la misma mediante una revisión de la bibliografía científica publicada entre 2006 y 2018, complementada con datos de mortalidad de la OMS, que cubrían 141 países. Se informaron aproximadamente 740.000 casos anuales de dicha intoxicación con el resultado de más de 7.000 muertes. La implementación de las recomendaciones internacionales para eliminar las sustancias activas altamente peligrosas por parte del Consejo de la FAO podría reducir significativamente este tipo de intoxicaciones.

Los problemas de salud humana que se intentan evitar en la UE con legislación de prohibición de sustancias activas por su comprobada peligrosidad, contrastan con la amplitud en la comercialización de esos mismos productos. Una decena de países europeos, entre ellos España, siguen exportando a naciones en vías de desarrollo o emergentes algunos de dichos productos, y el 90% de las exportaciones va a parar países que son en muchos casos áreas cruciales para la biodiversidad (<https://www.businessinsider.es/espana-sigue-exportando-paises-pobres-pesticidas-prohibidos-ue-967395>). Las multinacionales productoras de estos PP. FF. aprovechan las debilidades de la reglamentación en países como Argentina, Brasil, o India para continuar vendiendo sus plaguicidas más rentables. El principal mercado es Brasil donde, como ejemplo, un estudio de los datos de 2018-2019 del Programa Gubernamental de protección del agua en ese país detectó profenofós -insecticida prohibido en la UE desde 2015 por ser un potente neurotóxico- en agua de varias zonas de Brasil, con valores que serían considerados impropios para el consumo en países europeos.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) llegaron a la conclusión de que los PP. FF. "reconocidos por presentar niveles altos de toxicidad aguda o crónica para la salud o el medio ambiente – designados como PP. FF. extremadamente peligrosos o *Highly Hazardous Pesticides*-, deben ser retirados del mercado y reemplazados por alternativas más seguras". Si bien ya en 2006 se establecieron criterios claros para identificar dichos productos químicos nocivos, hasta el momento no se ha logrado establecer una lista clara y excluyente de estos PP. FF. Las trabas de las grandes multinacionales químicas y las debilidades de muchos Estados (o sus representantes) explican la falta de voluntad política efectiva para aplicar los criterios. Esa realidad llevó a la Red de Acción en Plaguicidas (PAN, por las siglas del nombre inglés *Pesticide Action Network International*) -plataforma que agrupa a organizaciones públicas y privadas- a evaluar cerca de 1.000 sustancias activas presentes en el mercado. En base a las referencias de las agencias de la ONU e introduciendo otros índices complementarios -como la toxicidad para las abejas o las perturbaciones endocrinas-, la PAN elaboró una lista de 310 plaguicidas peligrosos- y llegó a la conclusión que ese mercado específico representó cerca de 22.000 millones de dólares USA en 2017, como resultado de la venta de 1,8 millones de toneladas de sustancias activas. Según dicha fuente, España exportó productos de este tipo a 27 países.

Un ejemplo reciente de las dificultades de la prohibición de los PP. FF., que resulta muy ilustrativo de las dificultades y la complejidad de su regulación, es el de los insecticidas neonicotinoides -los más vendidos en el mundo en la actualidad-, que se han intentado prohibir en la UE con varias largas campañas a nivel público en la década de 2010 y con varios informes de la EFSA sobre los riesgos de estos productos para numerosos insectos, porque afectan a su sistema nervioso. Especialmente grave es el caso de las abejas, que son los principales polinizadores mundiales. Se alertaba de que su población no ha dejado de disminuir en los últimos años, incluso hasta el 50 % en algunos países. Continuó en 2018, con un nuevo informe de la EFSA que alertaba del peligro no sólo para las abejas melíferas, sino también para los polinizadores silvestres y advertía, además, que el riesgo no se limitaba a los cultivos en los que se utilizaban este tipo de productos, sino que la contaminación se transmitía al suelo y el agua, afectando a flores silvestres y cultivos posteriores. Son estas conclusiones las que impulsaron la propuesta de la CE para ampliar la restricción del uso de estos compuestos

hasta llegar a la prohibición casi absoluta del uso de tres plaguicidas del grupo de los neonicotinoides (clotianidina, imidacloprid y tiametoxam) en la UE desde 2018. A pesar de la prohibición, la legislación de la UE sigue permitiendo su uso en invernaderos permanentes. Este uso se permite, pese a que la evidencia científica muestra que los neonicotinoides se filtran en el suelo alrededor de los invernaderos, contaminando los cursos de agua y amenazando a las abejas y otras especies. Y además, la clotianidina, uno de estos insecticidas cuyo uso en la UE no está autorizado desde 2018, ha sido durante varios años objeto de autorizaciones excepcionales otorgadas por el MAPA para que la industria azucarera pueda utilizar semillas de remolacha azucarera con dicho insecticida. La repetición de la autorización año tras año hace que no sean casos puntuales y únicos, sino un abuso de la medida de autorización excepcional que debe emplearse sólo en casos de emergencia y si no existen otras alternativas razonables al uso de este neonicotinoide, aunque su implantación posiblemente reduciría el beneficio inmediato del sector azucarero español.

El caso del glifosato es también muy mediático y todavía no ha terminado. Este herbicida, el más usado a nivel mundial, se comenzó a comercializar en la década de 1970 y en 2015 fue clasificado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como “probablemente cancerígeno para los humanos”. Pero dicho riesgo no ha sido aceptado hasta ahora por la EPA -que considera que el glifosato es seguro cuando se usa con precaución-, ni por la EFSA (<https://www.efsa.europa.eu/es/topics/topic/glyphosate>). En 2016, un informe conjunto de la OMS y la ONU concluyó que el glifosato “es poco probable que represente un riesgo carcinogénico para los seres humanos debido a la exposición a través de la dieta”. El producto comercial está autorizado como herbicida en la UE hasta finales de 2022, con gran rechazo de los medios y del público en muchos países y pendiente de una nueva evaluación. El informe de 2022 de la ECHA (*European Chemicals Agency*) confirma el peligro del glifosato para los ojos y para la fauna acuática, pero no los efectos carcinogénicos. En España se ha reducido a la mitad el número de productos fitosanitarios autorizados que contienen glifosato, pero todavía hay más de 50 productos de uso en agricultura, jardinería, silvicultura, y aplicaciones domésticas que incluyen este herbicida en su formulación. En EE. UU. se han presentado más de 125.000 demandas por los posibles efectos cancerígenos del glifosato, y la empresa Bayer AG aceptó pagar casi 11.000 millones de dólares USA en indemnizaciones, para terminar con los procesos judiciales en curso.

B3.4.2. Impacto negativo en el medioambiente

Se ha demostrado que los PP. FF. pueden contaminar el suelo, el agua, y cualquier tipo de vegetación (Kovach et al., 1992) y que, además, pueden ser tóxicos para una gran cantidad de otros organismos, incluidos pájaros, peces, insectos benéficos y plantas no diana. Los insecticidas son generalmente los PP. FF. con mayor toxicidad aguda, pero los herbicidas también pueden presentar riesgos para otros organismos. La mayoría de los estudios realizados el siglo pasado fueron realizados en EE. UU. y la UE se incorporó más recientemente a la realización de este tipo de evaluaciones. La revisión de Aktar et al. (2009) señala distintos tipos de impacto en el medioambiente:

- i) **Contaminación de aguas superficiales.** Los PP. FF. pueden llegar a las aguas superficiales a través de la escorrentía de plantas y suelo tratados. La contaminación del agua por plaguicidas está muy extendida. Por ejemplo, los resultados de un conjunto completo de estudios realizados por el Servicio Geológico de los EE.UU. (USGS, por sus siglas en inglés) en las principales cuencas fluviales de todo el país hacia 1990 arrojaron resultados sorprendentes. Más del 90 % de las muestras de agua y peces de todos los arroyos contenían a menudo varios PP. FF. y se detectaron hasta 40 PP. FF. en algunas de las vías fluviales. Según el USGS, en 1995 se detectaron más plaguicidas en los arroyos urbanos que en los agrícolas con datos del Departamento del Interior de los EE. UU.
- ii) **Contaminación de aguas subterráneas:** Según el USGS, se encontraron al menos 143 compuestos diferentes y 21 productos de transformación en aguas subterráneas, incluidos PP. FF. de todas las clases

químicas principales en EE. UU. Durante las últimas dos décadas, se han encontrado residuos de PP. FF. en el agua subterránea de más de 43 Estados. Una vez que el agua subterránea está contaminada con PP. FF. tóxicos, la contaminación puede tardar muchos años en diluirse o limpiarse y la limpieza también puede ser muy costosa y compleja, si no imposible.

- iii) **Contaminación del suelo.** Se ha documentado una gran cantidad de productos de transformación de una amplia gama de PP. FF. en el suelo, que pueden agruparse en hidrofóbicos y polares. Los primeros son persistentes, bioacumulables, y se adhieren fuertemente al suelo, como muchos organoclorados, que, aunque en su mayoría están ahora prohibidos en agricultura, sus residuos aún se encuentran presentes en el suelo. Los PP. FF. polares están representados principalmente por herbicidas, aunque también incluyen carbamatos y otros fungicidas y algunos insecticidas organofosforados. Pueden ser movidos del suelo por escorrentía y lixiviación, constituyendo así un problema para el abastecimiento de agua potable a la población.
- iv) **Efecto sobre la fertilidad del suelo.** Está asociada a microorganismos edáficos benéficos del suelo. Los PP. FF. son retenidos por los suelos en diferentes grados, dependiendo de las interacciones entre el suelo y las propiedades del producto. La característica del suelo más influyente es el contenido de materia orgánica y cuanto mayor sea el contenido de la misma, mayor será la adsorción de los PP. FF. El tratamiento intensivo del suelo con estos productos puede hacer que disminuyan las poblaciones de microorganismos benéficos del suelo (ej., rizobacterias, rizobios, hongos micorrízicos, hongos y nematodos entomopatógenos) lo que podría ser un fenómeno similar al uso excesivo de antibióticos en humanos. Por ejemplo, las plantas dependen de una variedad de microorganismos del suelo para transformar el N_2 atmosférico en nitratos, que las plantas pueden usar; los herbicidas como el glifosato, reducen el crecimiento y la actividad de los rizobios fijadores de nitrógeno (N_2) de vida libre en el suelo, y algunos PP. FF. reducen la absorción de determinados oligoelementos por las plantas que es propiciada por rizobacterias (cf., Capítulo C4.). Los hongos micorrízicos que crecen con las raíces de muchas plantas y ayudan en la absorción de nutrientes también pueden ser dañados por herbicidas.
- v) **Contaminación del aire, el suelo y la vegetación no diana.** La aplicación de los PP. FF. mediante pulverización pueden dar lugar a que, por deriva, se depositen directamente sobre la vegetación colindante, o puedan diseminarse o volatilizarse del área tratada y contaminar el aire, el suelo y las plantas. La deriva de PP. FF. que ocurre durante cada aplicación es muy elevada en los tratamientos aéreos que aún se realizan en muchos países, pero incluso en los realizados con equipos terrestres la deriva puede representar una pérdida del 2 al 25 % del producto químico que se está aplicando y en ciertos casos el 80-90 % puede volatilizarse a los pocos días de la aplicación. Según el USGS, se han detectado numerosos PP. FF. en la atmósfera en todas las áreas muestreadas de EE. UU. en la lluvia, aire, niebla o nieve en todo el país en diferentes épocas del año (U.S. Geological Survey, 1999) e incluso en el Ártico en dichas muestras ambientales.

B3.4.3. Impacto en artrópodos: sin insectos no hay vida

Según un estudio de 2022 de la Asociación Española de Entomología y Ecologistas en Acción, el declive actual de las poblaciones de insectos observado en los países desarrollados es consecuencia de la pérdida de su hábitat, especialmente de prados, zonas inundables y masas forestales, debido a los usos agrícolas o industriales, la utilización de PP. FF. (insecticidas, herbicidas y fungicidas), la incidencia de entomopatógenos y el Cambio Climático. Se estima que el 40 % de las especies de insectos polinizadores se hallan en peligro de extinción como consecuencia de las actividades humanas. A la indudable e incalculable importancia ecosistémica de los insectos se une la importancia económica, social y cultural que tienen muchas de sus especies. La polinización es uno de los procesos ecosistémicos más importantes para la agricultura y la

sociedad, y depende en gran parte de los insectos. Según las estimaciones realizadas por la UE, el 84 % de las especies vegetales y un 76 % de la producción alimentaria en Europa dependen de la polinización realizada por las diferentes especies de abejas. La FAO estima que la producción agrícola mundial que depende directamente de los polinizadores está valorada entre 235.000 y 577.000 millones de dólares USA al año. Especialmente grave es el caso de las diferentes especies de abejas silvestres, ya que sus poblaciones están sufriendo una gran regresión por la acción antrópica, principalmente por la utilización de plaguicidas, entre ellos distintos herbicidas, fungicidas e insecticidas y especialmente los neonicotinoides.

La Asociación Española de Entomología y Ecologistas en Acción señalan que actualmente los insectos tienen una tasa de extinción ocho veces más rápida que la de mamíferos, aves y reptiles (<http://www.entomologica.es/sin-insectos-no-hay-vida#:~:text=Sin%20insectos%20no%20hay%20vida%20pretende%20sensibilizar%20a%20la%20sociedad,urgentes%20para%20favorecer%20su%20conservaci%C3%B3n>). En 2017, se demostró que se había reducido más del 75 % de la biomasa de insectos voladores en áreas protegidas de Alemania, y publicaciones posteriores han analizado situaciones semejantes a nivel mundial, europeo e ibérico. Mariposas, abejas, libélulas y escarabajos, entre otros, son los grupos con las especies más amenazadas. Y resulta incomprensible que no exista suficiente información científica en España para conocer el estado de conservación actual de la mayoría de estas especies y no se tomen medidas urgentes.

B3.5. Legislación europea en materia de Productos Fitosanitarios

El registro y la utilización de PP. FF. en la UE están regulados básicamente por legislación de la UE, -en cuya redacción juegan un papel especialmente relevante las opiniones científicas de la EFSA- y que deben adoptar los Estados miembros. En Giner y Alonso-Prados (2019) se puede consultar una síntesis de legislación UE sobre PP. FF. Esta armonización en la UE ha tenido ventajas incuestionables, al someter las distintas zonas productoras con amplio intercambio comercial de alimentos a reglas en buena parte comunes, aun cuando todavía se podría hacer un mayor esfuerzo para igualar y acelerar los procedimientos y usos, sin olvidar las distintas características de las variadas zonas productoras europeas. Un ejemplo para ilustrar la necesidad de una mayor armonización es el desarrollo apenas iniciado de indicadores de riesgo armonizados (HRI), tal como se reconoce en la Directiva 2019/782 de la CE, que son indicadores necesarios para supervisar las tendencias en la reducción del riesgo derivado del uso de PP. FF. a escala de la UE, como se exponía en el RD 3111/2012 de uso sostenible de PP. FF. (ver la evolución del HRI en la UE en el Apartado B3.7.4. de este capítulo).

B3.5.1. Registro de productos fitosanitarios en la UE y su problemática

La comercialización y el uso de PP. FF. y sus residuos en los alimentos está regulada por un gran cuerpo de legislación de la UE. Los PP. FF. no pueden comercializarse ni utilizarse sin autorización previa. Existe un sistema dual en el que la EFSA evalúa las sustancias activas utilizadas en los PP. FF. y los distintos países evalúan y autorizan los productos a nivel nacional, por lo que la disponibilidad de los mismos puede variar de un país a otro. Los PP. FF. están regulados principalmente por el Reglamento marco (CE) 1107/2009. Una parte importante del trabajo de evaluación de riesgos de la EFSA en el área de los PP. FF. se centra en las sustancias activas (<https://www.efsa.europa.eu/en/topics/topic/pesticides>).

Una exposición crítica de la situación actual del registro de PP. FF. y de su uso en la UE se puede encontrar en Hinarejos y Palomar (2019), que en buena parte refleja el punto de vista de la Asociación Empresarial para la Protección de las Plantas (AEPLA) -que representa a las empresas fabricantes de PP. FF. en España- y de IBMA-España (*International Biocontrol Manufacturers Association*) que agrupa a los proveedores de

productos de control biológico. Algunas propuestas razonadas recientes para la mejora de la evaluación de los riesgos del uso de PP. FF. se pueden encontrar en Schäfer et al. (2019).

La EFSA es responsable desde 2003 de la revisión por pares de las evaluaciones de riesgo de las sustancias activas utilizadas en los PP. FF. en estrecha cooperación con los Estados miembros de la UE. La evaluación de riesgos de las sustancias activas determina si, cuando se usan correctamente, es probable que estas sustancias tengan efectos nocivos. Además, la evaluación de riesgos ambientales tiene como objetivo evaluar el impacto potencial en otros organismos no diana.

B3.5.1.1. Metodología de evaluación de riesgos por Productos Fitosanitarios

La autorización de un PF requiere la realización de una evaluación de riesgo con objeto de demostrar que tanto los residuos generados por una aplicación siguiendo buenas prácticas fitosanitarias, como el propio producto fitosanitario, no tienen efectos nocivos directos o indirectos sobre la salud humana o animal -por ejemplo, a través del agua potable, los alimentos o los piensos- o sobre la calidad de las aguas subterráneas, ni efectos inaceptables en el medioambiente. Como se ha indicado anteriormente el **Reglamento 1107/2009, permitió armonizar los criterios de evaluación y toma de decisiones a la hora de autorizar productos fitosanitarios**, los llamados principios uniformes de evaluación y toma de decisión establecidos por el Reglamento (UE) 546/2011.

Para la evaluación del riesgo para especies no objetivo se requiere que la concentración de exposición ambiental prevista esté por debajo de una concentración considerada segura para organismos no diana. Según Schäfer et al. (2019), en el primer paso de la evaluación de riesgos en la UE, esta concentración segura la establece la EFSA en cooperación con las agencias nacionales de los Estados miembros de la UE, mediante una combinación de factores de seguridad (también llamados factores de evaluación) que dan cuenta de las incertidumbres en la extrapolación a ecosistemas reales. Si la exposición prevista excede la concentración segura [como es el caso de 2/3 de los insecticidas, según Stehle y Schulz (2015), citados por Schäfer et al. (2019)], el PF todavía puede ser autorizado si la empresa solicitante de registro puede demostrar a través de más estudios, principalmente de alto nivel, que sus impactos ambientales y de salud humana son aceptables. Dichos niveles más altos integran procesos y características que ocurren en ecosistemas naturales, como los sistemas de pruebas de semi-campo de múltiples especies en la UE, así como la reducción de la exposición a través de medidas de mitigación en la gestión de riesgos. Se basa en dos suposiciones: (i) el primer nivel proporciona una medida de protección excesiva de los efectos potenciales en el campo; y (ii) los niveles más altos proporcionan predicciones más relevantes desde el punto de vista ecológico de los efectos de campo o de las concentraciones que no conducen a efectos inaceptables. Por lo tanto, a pesar de tener factores de seguridad más bajos, se supone que todavía el PF concreto es suficientemente protector.

Una vez aprobadas las sustancias activas, las empresas pueden presentar en los Estados miembros solicitudes de autorización de comercialización y uso de los PP. FF. que las contengan. Las sustancias activas solo pueden aprobarse para su uso en productos comerciales si cumplen los criterios de aprobación establecidos en el Reglamento (CE) 1107/2009. **Todas las sustancias activas aprobadas se enumeran en el Reglamento (UE) 540/2011 y se incluyen en la base de datos de plaguicidas de la UE** (https://ec.europa.eu/food/plants/pesticides/eu-pesticides-database_en). Esta base de datos de PP. FF. permite a los usuarios buscar información sobre sustancias activas utilizadas en productos fitosanitarios, valores máximos de LMR en productos alimenticios y autorizaciones excepcionales de PP. FF. Contiene información sobre sustancias activas (incluidas aquellas de bajo riesgo o candidatas a sustitución) y sustancias básicas, estén o no aprobadas.

Los residuos de plaguicidas son las cantidades medibles de las sustancias activas (sustancias químicas utilizadas en los PP. FF.) y de los metabolitos o productos de degradación relacionados que

se pueden encontrar en los cultivos cosechados o en los alimentos de origen animal y que pueden ocasionar los problemas descritos en el Apartado B3.4. En la UE se han establecido LMRs para más de 500 PP. FF. en más de 370 productos alimenticios. Se pueden buscar en un producto alimenticio en particular (por ejemplo, manzanas) y recuperar los LMR de todos los residuos de plaguicidas que se aplican a ese cultivo. También figuran los residuos de PP. FF. y los LMR que se aplican a dichos residuos en los productos alimenticios. Se puede seleccionar un residuo de PF en particular en productos alimenticios específicos y encontrar los LMR actuales o históricos que se aplican legalmente.

B3.5.1.2. Niveles máximos de residuos de Productos Fitosanitarios en alimentos

Según el Reglamento (CE) 396/2005, los límites máximos de residuos (LMR) son los niveles superiores de residuos de PP. FF. que están legalmente permitidos en los alimentos o piensos, sobre la base de las buenas prácticas agrícolas (BPA) y la exposición mínima necesaria para proteger a los consumidores vulnerables.

La encuesta disponible para 2018 señala que la media de muestras con residuos por encima de los LMR en 2018 fue del 3,1 % en los alimentos producidos en la UE y del 8,3 % en los producidos fuera del territorio de la UE (EFSA, 2020). Los datos más recientes, recopilados en 2019, indican que, del total de 96.302 muestras analizadas, el 3,9 % superó los LMR autorizados, valores ambos que, a nuestro juicio, deberían ser rebajados sustancialmente.

En línea con años anteriores, en 2019 se registraron múltiples residuos en algo más de una cuarta parte de las muestras (27 %). La presencia de múltiples residuos no constituye un incumplimiento de la legislación sobre los LMR siempre que los PP. FF. individuales no excedan los límites legales. Sin embargo, las autoridades nacionales deben evaluar cuidadosamente los productos con múltiples residuos (por ejemplo, para considerar si se están utilizando combinaciones de PP. FF. con el fin de rebajar la dosis de los productos individuales y disminuir los riesgos de rebasar los límites de LMR en esas sustancias individuales).

En todas las evaluaciones de LMR de la EFSA, la exposición dietética crónica (a largo plazo) y aguda (a corto plazo) de los consumidores a los residuos de plaguicidas se estima utilizando un modelo de cálculo desarrollado por la EFSA (PRIMo, *Pesticide Residue Intake Model*). El modelo se basa en datos de consumo nacional de alimentos y pesos unitarios proporcionados por cada Estado e implementa metodologías de evaluación de riesgos acordadas internacionalmente.

Los Estados miembros están obligados a realizar controles para garantizar que los alimentos comercializados cumplen los límites legales. Los programas de seguimiento europeos comprenden uno de los programas de encuestas alimentarias más completos del mundo, analizando anualmente más de 90.000 muestras de alimentos para más de 600 compuestos diferentes. Utilizando los datos de 2019, la EFSA concluyó que, según los conocimientos científicos actuales, es poco probable que la exposición alimentaria aguda y crónica a residuos de plaguicidas plantee problemas para la salud de los consumidores, y está implementando actualmente una metodología para permitir evaluaciones de riesgo que tengan en cuenta la exposición dietética a múltiples residuos.

B3.5.2. Residuos de plaguicidas en los productos importados por la UE procedentes de países terceros

Según Sanfeliu (2021), en 2020 la CE informó a través del sistema RASFF (Sistema de alerta rápida para alimentos y piensos de la UE) sobre la notificación de 87 alertas sanitarias correspondientes a cítricos importados en la UE de todos los orígenes, por superar los límites máximos de residuos (LMRs) o tener re-

siduos de productos prohibidos en la UE; y dichas alertas fueron más de 250 en 2021, mayoritariamente de Turquía (72,4 %) y Egipto (18 %). Después de ello, la frecuencia de los controles físicos y de identidad (tanto documentales, como identificativos y físicos, incluyendo análisis de laboratorio) se elevó al 5 % en mandarinas y al 10 % en naranjas. Y ahí terminaron todas las medidas adoptadas por la UE sobre esta grave anomalía. Debe señalarse que los rechazos de importaciones de cítricos se producen únicamente de entre las partidas o lotes muestreados por los inspectores oficiales en los Puntos de Inspección de los puertos europeos, de lo que se puede concluir que es muy posible la entrada de múltiples lotes de cítricos contaminados con PP. FF. de entre los no muestreados. Ello significa que el restante 90-95 % de mercancía no controlada, por pura lógica, está producida con los mismos estándares de cultivo y conteniendo los mismos niveles de residuos.

Como Turquía exporta más de 330.000 t de varias especies de frutos cítricos a distintos países de la UE, el riesgo de consumir frutos con PP. FF. prohibidos en la UE, puede ser alto. **De las 250 alertas en cítricos, 165 lo fueron por insecticidas del grupo clorpirifos (un 66 %) que fueron prohibidos en la UE desde 2020, en base al informe de la EFSA que concluyó la peligrosidad de los insecticidas clorpirifos y metil-clorpirifos para la salud de las personas por su posible potencial genotóxico, efectos de la neurotoxicidad para el desarrollo y toxicidad para la reproducción, por lo que se prohibieron de manera definitiva en todos los Estados miembros.**

En el año 2022, la CE propuso por primera vez, una medida que dé continuidad a su compromiso de tener en cuenta las consideraciones medioambientales mundiales a la hora de decidir los LMR en los alimentos, en consonancia con su política de uso sostenible de los plaguicidas. **Los alimentos importados que contengan residuos cuantificables de sustancias activas prohibidas no deberán, en el futuro próximo, comercializarse en la UE, indicando a los países exportadores la conveniencia de prohibirlos también en su territorio.**

B3.6. Bioplaguicidas: definiciones y tipos principales

Los productos naturales y no de síntesis, incluyendo los extractos de plantas, se han venido utilizando para proteger los cultivos de plagas y enfermedades, desde hace siglos. Respecto a bioinsecticidas, ya en 1879 se utilizó el hongo *Metarhizium anisopliae* para controlar larvas de escarabajo en trigo y remolacha en Rusia. En 1920 se descubrieron en Japón las posibilidades del uso de la bacteria *Bacillus thuringiensis*, pero no fue hasta 1961 cuando se registró como Bioplaguicida en EE. UU. Y respecto a los biofungicidas, en 1930 se registró el primer producto basado en especies fúngicas del género *Trichoderma*, también en EE. UU.

Pero estos productos de control biológico o Bioplaguicidas y muchos compuestos naturales, fueron sustituidos en buena parte a mediados del siglo XX por sustancias activas químicas convencionales, que aquí se han denominado PP. FF., que supusieron un gran avance en la lucha contra las plagas, pero que también crearon grandes problemas, ya señalados. Por ello, desde hace años su uso se ve enfrentado a la necesidad de aumentar la utilización de métodos alternativos de la gestión de la sanidad de los cultivos que tengan menos efectos secundarios adversos para los seres humanos y el medio ambiente (Vikas et al., 2013).

Según la EPA de EE. UU., los Bioplaguicidas son productos naturales derivados de organismos tales como animales, plantas, o bacterias, así como ciertas sustancias minerales. Hace unos años, también se denominaron productos fitosanitarios biorracionales, un término más propagandístico que técnicamente fundamentado, en comparación con otros tipos de PP. FF. En 2016, había registrados como Biopla-

guicidas en EE. UU. 299 sustancias activas y 1401 productos comerciales. Siguiendo la nomenclatura de la EPA, los Bioplaguicidas incluyen tres clases de compuestos: (i) aquellas sustancias bioquímicas que existen de manera natural y que ejercen la acción de control con mecanismos no tóxicos (ej., feromonas, atrayentes); (ii) plaguicidas microbianos, que contienen microorganismos como sustancia activa (ej., bacterias, hongos, protozoos, virus, o nematodos con sus bacterias asociadas); y (iii) sustancias protectoras existentes en las plantas (llamadas *Plant-incorporated Protectants* (PIPs) en muchos documentos internacionales), que son producidas por estas a partir de material genético que ha sido introducido en ellas; este es el caso de las toxinas producidas por la bacteria *Bacillus thuringiensis* (Bt) en los cultivares Bt transformados genéticamente con ella, aunque no todas las PIPS son producidas por plantas transgénicas. Esta tercera clase no es considerada como tal en la UE y otras partes del mundo, y por tanto no está incluida en las estadísticas de consumo de Bioplaguicidas en ellas.

Sin embargo, el término Bioplaguicida no se recoge como tal en la legislación actual de la UE y aquí los consideraremos similares a los productos usados en los métodos de control biológico, que incluyen sustancias naturales, microorganismos, extractos vegetales, sustancias producidas por fermentación bacteriana (p.ej., el Spinosad) y otro tipo de sustancias de origen natural.

Por el contrario, los depredadores y parasitoides no son considerados en esta categoría en la UE ya que su uso no viene regulado por el Reglamento 1107/2009. En el Capítulo C4. se describen con detalle las características y mecanismos del Control Biológico de insectos fitófagos, patógenos y malas hierbas con enemigos naturales y antagonistas.

Según Hinarejos y Palomar (2019), la FAO ha propuesto las siguientes categorías principales de productos de control biológico, y son las que actualmente se entienden globalmente como recursos de biocontrol en la Sanidad Vegetal: (i) microorganismos (bacterias, hongos y virus); (ii) sustancias naturales / productos bioquímicos (incluidos los extractos botánicos), sustancias extraídas/aisladas/purificadas de organismos biológicos, como plantas, microorganismos y otros, análogos, miméticos, sustancias idénticas a las naturales pero de síntesis y otros; (iii) semioquímicos (feromonas y aleloquímicos); y (iv) macroorganismos (agentes de control biológico invertebrados y otros).

También hay varias formulaciones disponibles en el mercado global que comprenden consorcios de diferentes microorganismos como hongos, bacterias, virus, nematodos, algas, etc., es decir, diferentes agentes que tienen diversos modos de acción, pero que interactúan sinérgicamente entre sí, y son efectivos en la promoción del crecimiento de las plantas y la protección de ellas contra los patógenos. Varios Bioplaguicidas fúngicos, bacterianos, virales y de nematodos han demostrado resultados notables en el manejo eficiente de ciertos agentes nocivos de los vegetales. A pesar de que los resultados de la experimentación indican inequívocamente la eficiencia de las formulaciones basadas en consorcios debido a su multifuncionalidad, no se está prestando suficiente atención al desarrollo de productos de calidad para su registro en la UE, probablemente por la complejidad de la evaluación de las interacciones entre ellos. Este es un campo en el que la UE está trabajando y es probable que pronto se publique legislación que permita la aprobación de sustancias que incluyan distintas cepas de distintos microorganismos.

En la UE, la Directiva 2009/128/CE sobre el uso sostenible de plaguicidas estableció que para 2014 todos los Estados miembros deberían haber implementado la gestión integrada de plagas (*sensu amplo*) (cf., Capítulo C6.), en la que los enfoques alternativos que no impliquen la aplicación de sustancias químicas activas convencionales deberían ser las primeras opciones, si estaban disponibles. Además, una legislación más estricta ha determinado la retirada del mercado de la UE de muchos PP. FF. que no cumplían las normas de seguridad actuales, lo que se suma a la escasez de soluciones de control disponibles para los agricultores. Por ello, un enfoque alternativo como es el control mediante Bioplaguicidas, en el que se

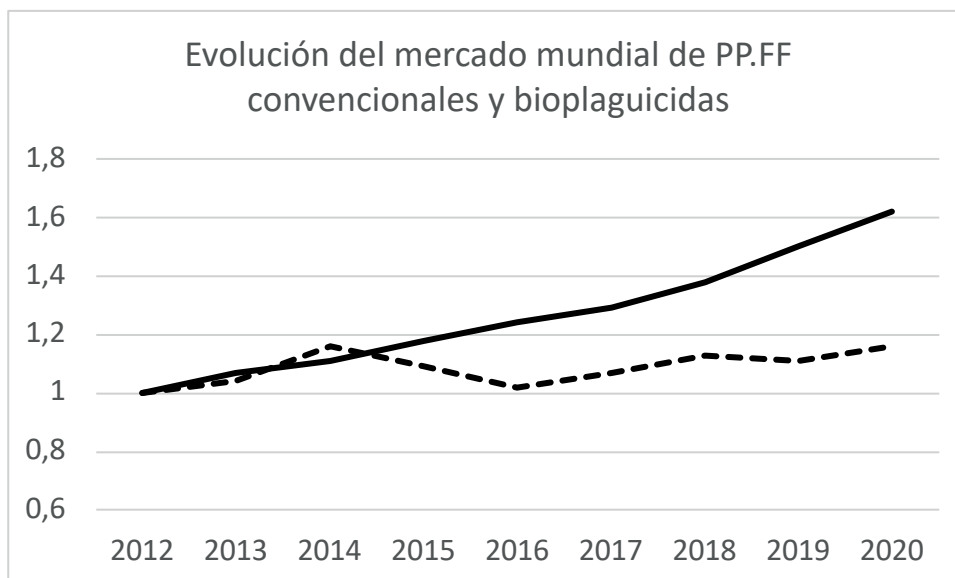
utilizan productos o enemigos naturales de los insectos fitófagos, agentes fitopatógenos y malas hierbas para el control de las plagas, es una opción que despertó el máximo interés. Los microorganismos antagonistas o patógenos de insectos (hongos, bacterias, virus y otros), los nematodos entomopatógenicos, y los depredadores y parasitoides de artrópodos, se han aplicado y se siguen aplicando con éxito desde hace décadas en el control biológico. Además, continuamente se están aislando nuevas cepas microbianas que son prometedores agentes de control biológico de numerosas enfermedades.

B3.6.1. Evolución del uso de Bioplaguicidas

Resulta útil analizar también la evolución del uso de los productos utilizados para el control biológico de plagas en la UE, que denominaremos Bioplaguicidas y compararla con la del total de PP. FF. El mercado global de aquellos productos supone actualmente el 6 % del total de los PP. FF, aunque su crecimiento anual es rápido, casi del 10 % (Damalas y Koutroubas, 2018). Cerca del 90 % de los Bioplaguicidas comercializados actualmente en el mundo son a base de *B. thuringiensis* o de sus derivados. Es de esperar que el notable crecimiento que está experimentando el número de publicaciones científicas sobre los productos de control biológico, se refleje pronto también en la diversificación de los Bioplaguicidas disponibles y en el aumento de su uso.

Un informe de IHS Markit (2022) señala que Europa con el 31 % y Norteamérica con el 29 % son los continentes que suponen más de la mitad del mercado global de Bioplaguicidas, seguidos de Asia y Sudamérica con el 20 y 15 %, respectivamente, y que el número de empresas que comercializan las más de 1.000 sustancias activas disponibles en cada continente, sigue las mismas proporciones.

Figura 4. Evolución del índice de ventas de productos fitosanitarios convencionales (línea discontinua) y Bioplaguicidas (línea continua) en el mundo. Las ventas de 2012 se han considerado de índice igual a 1 para ambos tipos de productos fitosanitarios (Fuente IHS Markit, 2022).



En la Figura 4 se compara la evolución del índice de ventas mundiales de los Bioplaguicidas con el de los PP. FF. convencionales desde 2012 a 2020, y se observa el mayor incremento de los primeros, frente a la estabilidad de los segundos. Se estima que el mercado global de los Bioplaguicidas se ha incrementado un 60 % en los últimos 8 años, frente al solo 14 % de los PP. FF. convencionales. IHS Markit estima también que el 70 % de ellos se usan contra insectos, el 25 % para el manejo de enfermedades, el 3 % contra nematodos y el 2 % como herbicidas. Estos productos son mayoritariamente utilizados en el sector de las frutas y hortalizas y plantas ornamentales, que se cultivan en muchos casos en invernaderos con mayor estabilidad de las condiciones medioambientales y donde se consigue mayor homogeneidad de los resultados del control biológico, y que además pueden soportar los mayores costes de

los Bioplaguicidas frente a los de los productos convencionales. Se estima que el mercado global de productos de control biológico tiene un valor de alrededor de 3.000 millones de dólares USA y crece a una tasa del 7 % anual. Comprende ingredientes activos, distribuidos en cuatro sectores: microbianos, extractos de plantas, semioquímicos, y macrobianos. De los cuatro sectores, el microbiano es, con mucho, el más importante, ya que representa alrededor del 60 % del mercado mundial (<https://ihsmarkit.com/index.html>). Actualmente hay alrededor de 60 productos de origen microbiano autorizados en la UE.

Entre las ventajas que ofrecen los Bioplaguicidas respecto de los PP. FF. de síntesis, están la selectividad y la menor persistencia de los primeros, y en esas ventajas residen precisamente sus limitaciones. Por ejemplo, para su aplicación eficiente es necesario identificar con exactitud el organismo nocivo a controlar y acertar con gran precisión en el momento de su aplicación, ya que esta se debe hacer cuando dicho organismo diana esté en la situación de máxima susceptibilidad o de máxima densidad de población; esa exigencia solo se puede satisfacer con técnicas adecuadas de seguimiento poblacional de los organismos nocivos y con personal preparado y dedicado, circunstancia ésta última que no siempre se da en la agricultura actual. Puede obtenerse información adicional de los PP. FF. basados en enemigos naturales en el capítulo de Control Biológico de esta obra (cf., Capítulo C4)..

B3.6.2. Cara y cruz de los Bioplaguicidas

Un informe del Parlamento de la UE, en el que se basa la definición de la Estrategia “De la granja a la mesa” (Legislative Observatory, 2020/2260, INI), expresó su preocupación por la deficiente implementación de las disposiciones de la Directiva sobre el uso sostenible de plaguicidas y concluyó que se había avanzado poco en la estrategia de técnicas de control alternativas. Sin embargo, en dicha estrategia la UE identificó recientemente acciones para promover aún más el uso de enfoques alternativos para la protección de cultivos y facilitar la comercialización de productos que contienen sustancias activas biológicas para ser utilizadas en los cultivos y masas forestales.

Todos los años, las empresas identifican los principios activos de muchos potenciales Bioplaguicidas, feromonas y otros productos, su formulación y dosificación (Hinarejos y Palomar, 2019), pero se requieren muchas evaluaciones para conseguir su aprobación.

En la UE, los Bioplaguicidas son aprobados (los agentes activos) y autorizados (los productos formulados) según los sistemas desarrollados inicialmente para plaguicidas químicos. Pero el desarrollo de un producto de este tipo necesita, tras el aislamiento y la identificación de cepas del microorganismo o de las sustancias efectivas en el control biológico, numerosas etapas y ensayos hasta el desarrollo comercial del producto, como: producción mediante fermentación húmeda o seca, formulación en polvo o líquido, determinación de la vida útil, determinación de la temperatura y humedad óptima durante el almacenamiento, requisitos de formulación y sus tipos –líquido, granulado, polvo-, compatibilidad con tecnologías existentes, mezclas posibles con otros productos y mezclas no adecuadas, métodos de aplicación -a la planta o al suelo-, posibilidad de tratamiento de semillas (recubrimiento de semillas, biocebado), uso de equipo existente o especializado o incorporación a sustratos de crecimiento. Luego se debe obtener la aprobación regulatoria e industrial, hacer una evaluación de riesgos (UE, EPA, etc.) y verificar su eficacia en campo: eficacia en ensayos de campo y/o invernadero, escala y alcance de los ensayos, ecología de la cepa antagonista seleccionada, estudio de las interacciones patógenas desfavorables, etc. Todo ello es previo a la comercialización completa y tras un estudio del tamaño del mercado e introducción en el mismo, socios, asesoramiento, publicidad, política de precios, etc., en muchos casos se llega a la triste conclusión de que el nicho de mercado para el producto es demasiado pequeño para recuperar los costes de su desarrollo y comercialización.

Las dificultades del registro de estos productos a base de productos naturales y microorganismos se pueden deducir de la gran cantidad de publicaciones científicas en revistas del *Science Citation Index* que aparecen anualmente y el elevado número de patentes que se desarrollan y se aprueban, frente a una proporción muy pequeña de ellas que luego llega a los mercados. La razón detrás de ello, en la UE, es el estricto marco regulatorio debido a consideraciones medioambientales o de bioseguridad, que aumenta los costes generales y provoca grandes retrasos en la comercialización de estos productos.

Así pues, la cantidad y disponibilidad de Bioplaguicidas en la UE está lastrada por el procedimiento para su registro, ya que la documentación necesaria para el mismo es bastante mimética de la necesaria para los PP. FF. de síntesis y resulta muy compleja para los productos biológicos. La comercialización es el paso final y más difícil en el desarrollo y la introducción en el mercado de la UE de un nuevo producto para el control biológico de plagas, ya que los costes totales de su desarrollo y el tiempo de comercialización son esenciales para el éxito de una empresa. Así, los costes pueden alcanzar un valor total de 10 a 15 millones de euros para una empresa que normalmente aún debe constituirse, y en el caso de una empresa ya existente los costes suelen ser de 5 a 10 millones de euros. **Similarmente, el tiempo para la comercialización del producto, incluido el registro, era de 5 a 7 años según Ravensberg (2011).** Esta circunstancia anacrónica hizo que fuera necesario y urgente crear normativas de registro adaptadas a la naturaleza de los Bioplaguicidas, a la vez que se agilizaba el proceso del mismo. Otro camino para acelerar la llegada al mercado de los progresos que se están realizando sobre estos productos mediante la investigación científico-técnica, sería facilitar que la pequeña y mediana empresa pudiera comercializarlos, porque en muchos casos estos aportan soluciones a problemas puntuales y con pequeño mercado (Collinge et al., 2022).

La EFSA brinda asesoramiento científico independiente a los gestores de riesgos en las evaluaciones de los Bioplaguicidas y la CE y los Estados toman decisiones de gestión de riesgos sobre cuestiones reglamentarias, incluidas la aprobación de sustancias activas y el establecimiento de límites legales para residuos de Bioplaguicidas en alimentos y piensos (niveles máximos de residuos o LMR).

Las evaluaciones de Bioplaguicidas han sido criticadas de manera recurrente en la UE y en menor medida, también en EE. UU. por poner demasiado énfasis en la toxicología química y la ecotoxicología y, por lo tanto, en los riesgos químicos, en lugar de hacerlo en las propiedades biológicas y ecológicas y los riesgos potenciales específicos asociados con los microorganismos. El proceso de la UE para dicha evaluación todavía no está bien adaptado y quizá no sea del todo sorprendente que este sistema haya sido subóptimo, o incluso deficiente, para evaluar los riesgos potenciales asociados con los productos basados en microorganismos vivos.

Por lo tanto, los problemas en las regulaciones de la UE y el posterior desarrollo de documentos regulatorios específicos, se deben a la falta de atención al conocimiento biológico relevante disponible con respecto a la evaluación de la seguridad microbiológica y el control de plagas con productos de control biológico. De acuerdo con el principio de seguridad jurídica, una ley debe ser precisa y comprensible para aquellos a quienes se aplica. Los factores que aumentan la incertidumbre legal incluyen los largos e impredecibles tiempos de registro de los Bioplaguicidas, que supuestamente han desanimado a las empresas a registrar sus productos para la UE.

Debido a las deficiencias apuntadas en los dos últimos párrafos, la UE inició el trabajo de **revisión de los reglamentos de los requisitos de datos de sustancias activas y productos fitosanitarios basados en productos de control biológico que serán publicados a finales del año 2022.** En esta nueva versión de los requisitos de datos no se ha seguido la aproximación de la evaluación de riesgo de sustancias químicas y se han adaptado al conocimiento científico actual (Alonso-Prados y Guijarro, 2020).

Los Bioplaguicidas pueden en algunos casos (pero ciertamente no en todos) tener menor eficiencia que los PP. FF. convencionales, pero tienen otros beneficios relacionados con su posible reemplazo de compuestos químicos más peligrosos y la inclusión de otras consideraciones no solamente relacionadas con la seguridad, sino éticas y socioeconómicas. Otro beneficio de muchos de estos compuestos es que, **dado que su modo de acción es más complejo que el de una sola sustancia química, es menos probable que las plagas diana desarrollen resistencia a los mismos**, e incluso si la resistencia evoluciona, se puede contrarrestar usando otras cepas microbianas (Damalas y Koutroubas, 2018).

Un campo de enormes posibilidades en el que pueden tener una gran utilidad es el de las enfermedades de post-cosecha, para las que no hay soluciones eficaces en muchos casos y este tipo de productos por su baja toxicidad se sitúan en posición preferencial frente a otras alternativas.

En 2018 se publicó en la UE, una lista de sustancias activas potencialmente de bajo riesgo, y en la cual se incluyen varias decenas de microorganismos con acción insecticida y fungicida, así como otras sustancias naturales y minerales con acción principalmente atrayente, repelente o directamente insecticida o fungicida. La consideración de los Bioplaguicidas como sustancias de bajo riesgo por la legislación de la UE puede hacer que se aceleren los procedimientos del registro de productos fitosanitarios que las contengan, que son tremendamente lentos y que podrían explicar, según Damalas y Koutroubas (2018), el que **en Europa haya bastantes menos productos registrados que en otros países como EE. UU. o China**.

B3.7. Perspectivas de mejora en el uso de los Productos Fitosanitarios

Los aspectos que se resumen a continuación se refieren en su mayor parte a los PP. FF. químicos o de síntesis, aunque algunos de ellos son también aplicables a los Bioplaguicidas, especialmente los relativos a la mejora de la persistencia, las nuevas formulaciones y a las técnicas de aplicación, que obviamente pueden ser mejoradas y deben ser optimizadas para cada caso concreto.

B3.7.1. Implantación de la Gestión Integrada de Plagas y Enfermedades.

La mejora en el uso de los PP. FF. en la línea expresada por la Directiva de la UE 2009/128/CE -que ya hemos mencionado anteriormente- es decir, la utilización de los PP. FF. como última barrera defensiva para el control de plagas, enfermedades y malas hierbas, pasa por una doble dirección. En primer lugar, **la mejora debe basarse en el desarrollo de métodos alternativos de control que sean integrables** en programas de Gestión Integrada de Plagas, Enfermedades y Malas Hierbas (GIP), a lo cual nos hemos venido refiriendo en varios capítulos de este libro y volveremos a hacerlo en extenso en el Capítulo C6. En segundo lugar, otra dirección que permite dar cumplimiento a la citada Directiva es **la mejora de los PP. FF. en varios aspectos, incluyendo entre otros las propiedades de toxicidad, selectividad y persistencia**, la formulación del producto y las técnicas para su aplicación.

B3.7.2. Mejoras para baja toxicidad y alta persistencia

Respecto a la toxicidad y persistencia, un informe elaborado por el Departamento de Agricultura de EE. UU. (USDA), aunque con datos desfasados, de 2008, nos puede dar una idea de la tendencia de los modernos PP. FF. a rebajar su toxicidad y persistencia medias. Cuando se comparan los valores medios de las mismas en 1968 y 2008 en **los cuatro cultivos con un mayor uso de PP. FF. en EE. UU. (algodón, maíz, soja y sorgo)** (Fernández-Cornejo et al., 2014), se puede apreciar que **la toxicidad crónica de los PP. FF. descendió casi en un 90 %, de 1968 a 1980, sobre todo por la prohibición de los compuestos**

organoclorados, y en aproximadamente un 80 % de 1980 a 2008. La persistencia de los PP. FF. utilizados en EE. UU. en el periodo indicado no bajó hasta entrado el presente siglo, cuando empezaron a utilizarse PP. FF. con una persistencia media de casi la mitad de la correspondiente a los PP. FF. utilizados anteriormente. Junto con la reducción de la persistencia también se produjo una reducción notable en la dosis de aplicación, que alcanzó a un 50 % hasta finales del siglo XX y luego se ha mantenido más constante. Recordemos que estas estadísticas en los EE. UU. recogen datos de los cultivos genéticamente modificados -utilizados ya generalizadamente en aquel país a principios del siglo XXI en los cuatro cultivos mencionados-, así como de los bioplaguicidas. Es razonable suponer que esa tendencia se haya consolidado en EE. UU. después de 2008, e incluso se haya acentuado en la UE por el aumento de las exigencias en el registro y autorización de PP. FF.

B3.7.3. Mejoras en las formulaciones

Este aspecto de la utilización de los PP. FF. es otra vía importante para disminuir las dosis de aplicación aun conservando su efectividad, y de reducir los efectos adversos anotados anteriormente. Tengamos en cuenta que la mayor parte de los PP. FF. que se aplican en los cultivos no alcanzan su objetivo, sino que se depositan en lugares distintos de la diana a la que estaban destinados -hasta un 90 % se ha mencionado en la bibliografía (Perlatti et al., 2013), - y ello contribuye a la contaminación del medioambiente con emisiones de 20-30 % de producto perdido en ellas, que incluso puede llegar a ser del 50 % (Van den Berg et al., 1999) y contribuye a malbaratar el PF.

La mejora de la formulación de muchos productos puede corregir sustancialmente esa situación, en particular aquellas formulaciones de liberación controlada (CRF, *Controlled Release Formulations*) que permiten liberar una cantidad adecuada de PF durante un tiempo que se puede fijar para cada formulación. Los materiales que se están empleando actualmente son diversos, y suelen estar encapsulados en nano partículas que favorecen su liberación controlada. El objetivo final de estos sistemas es ser lo suficientemente inteligentes en el dominio del tiempo y prudentes en la dosificación de la cantidad de productos químicos para conseguir el impacto deseado en las plagas objetivo (Nair et al., 2010). La liberación controlada se define como una reubicación impulsada por la permeación de una sustancia activa a una superficie específica, con el objetivo de retener un nivel de concentración predeterminado durante un período determinado (Mihou et al., 2007). Los perfiles de liberación de las formulaciones de liberación controlada y a granel habían definido que el uso a granel proporciona inicialmente una dosis alta, que cae rápidamente por debajo del nivel activo, momento en el que se hace necesaria la administración repetida, mientras que la formulación de liberación controlada mantiene un nivel adecuado durante un período prolongado. Con este tipo de formulaciones se pretende mantener la concentración entre los niveles máximo y mínimo de una dosis única eliminando las dosis múltiples. La tecnología de aplicación controlada o inteligente de plaguicidas es una de las áreas de más rápido avance, en la que se intenta mejorar la productividad de los cultivos con un impacto medioambiental mínimo. Por lo general, se usa un vehículo para la administración y ayuda de PP. FF. para refinar la selectividad, la eficacia y/o para una aplicación más segura. Estos sistemas portadores con plaguicidas encapsulados/atrapados mejoran los aspectos de seguridad y manipulación de estos productos químicos (Nair et al., 2010). Se han propuesto o desarrollado varios sistemas para encapsular PP. FF. como polímeros, tanto sintéticos como naturales, sílice (Si), polifosfatos, ceras, arcilla/arcilla orgánica, nanometales diseñados, hidrogeles, cápsulas, residuos agrícolas, etc. (Singh et al., 2020).

A pesar de la enorme cantidad de recursos que se están invirtiendo en el campo de los sistemas de liberación controlada a base de dichas partículas -la mayor parte en países asiáticos-, todavía hoy son relativamente pocos los PP. FF. formulados con esta tecnología en la UE. La dificultad de seguimiento de cada PF en la planta cultivada diana, incluidos el floema y xilema, así como en el medioambiente, hace

que todavía no haya suficientes datos acerca de su comportamiento, una vez aplicados. Algo parecido podría mencionarse sobre las lagunas en el conocimiento del comportamiento de otras formulaciones de liberación controlada que se están ensayando, como la micro-encapsulación o las emulsiones (Singh et al., 2020).

B3.7.4. Mejoras en la aplicación de los Productos Fitosanitarios

Las técnicas de aplicación son otra vía para la mejora del uso de los PP. FF., bien aumentando su eficacia, bien disminuyendo sus efectos adversos sobre las personas, animales y el medioambiente. **Los objetivos para la innovación en técnicas de aplicación se insertan en la llamada Agricultura de Precisión** (cf., Capítulo C2. de este libro). Esta ha sido definida como “una estrategia de gestión que recoge, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales, y los combina con otras informaciones para respaldar las decisiones en la gestión de acuerdo con la variabilidad estimada, a fin de mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola”. En otras palabras, se trata de **ajustar el uso de estos insumos a las necesidades reales de cada cultivo y situación, que son calculadas a partir de los datos de todos los factores implicados en cada caso**. Para un uso eficiente y preciso de los datos en tiempo real es necesario digitalizarlos para que puedan ser procesados, y darles respuesta a través de algoritmos que permitan a la maquinaria de tratamiento del PF ajustar el volumen y la superficie diana a las necesidades reveladas por los datos. Un ejemplo de ello es el sistema DOSA3D desarrollado por la Universidad de Lleida y Agrotecnio Center, que permite ajustar la dosis y volumen de tratamiento en cultivos (ej., cítricos, frutales, y viñedo) en 3D porque son particularmente difíciles de tratar por su tupida vegetación y configuración tridimensional. El sistema DOSA3D establece la dosis óptima a partir del volumen de caldo requerido para satisfacer las necesidades calculadas con los datos de cultivo, plaga o enfermedad a controlar, el producto a aplicar y el equipo de tratamiento. Así, por ejemplo, en el proyecto ‘Gophytovid’ de tratamientos fitosanitarios de la vid se tomaron datos del cultivo en base a los mapas de vigor del MAPA, y se ha utilizado el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) proporcionado por la Agencia Espacial Europea (ESA) para generar mapas de prescripción zonal de dosis de productos fitosanitarios. Con ese sistema se ha calculado en un 20- 40 % el ahorro de PF en viñedos. Además, el sistema permite el registro de la cantidad de PF aplicado para la gestión de la explotación y la comunicación de los insumos utilizados si fuera necesario.

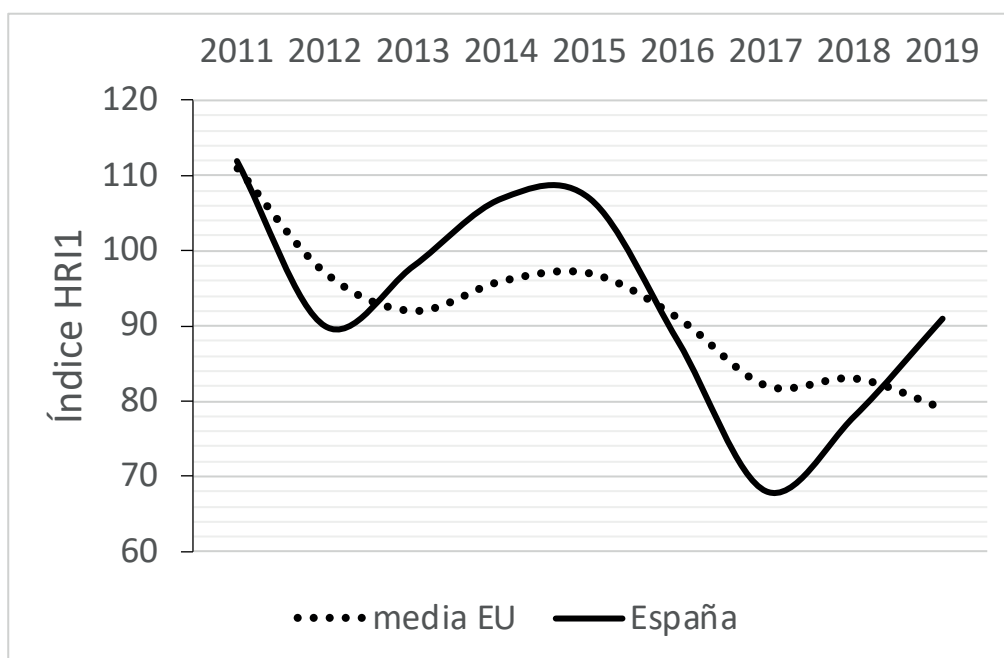
B3.7.5. Disminución del riesgo de los efectos negativos de los Productos Fitosanitarios

En la ya famosa comunicación de la CE al Parlamento Europeo de 2020 en la que se expone la estrategia ‘Del Campo a la Mesa’, (https://ec.europa.eu/food/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en) se fija el **objetivo de reducir al 50 % el uso y riesgo de los PP. FF. para 2030, como una de las iniciativas clave en el marco del Pacto Verde Europeo** y a fin de contribuir al logro de la neutralidad climática de aquí a 2050, para hacer evolucionar el sistema alimentario actual de la UE hacia un modelo sostenible.

Con los datos mostrados en la Figura 1 sobre la evolución del uso de PP. FF. en la UE en los últimos años, parece bastante difícil conseguir ese objetivo para 2030. Quizás **resulte más asequible reducir al 50 % el riesgo en la aplicación de PF** –determinado por el uso y la toxicidad del PF-. Indicábamos anteriormente en este Capítulo la utilidad de los indicadores de riesgo armonizados (HRI) relativos a los PP. FF., tal como se reconoce en la Directiva 2019/782 de la CE. Para poder seguir la evolución de los riesgos de uso de PP. FF. se emplean **dos tipos de indicadores armonizados**: el HRI1 basado en las estadísticas de comercialización de PP. FF. en la UE y el HRI2 que es relativo al número de autorizaciones excepcionales o de emergencia según el Reglamento 1107/2009 (Cobos, 2021). En ambos indicadores se ponderan los datos de utilización con un factor que refleja la peligrosidad de la sustancia activa, factor que va de 1 (los menos peligrosos) a 64 (los más peligrosos) y con valores intermedios de 8 y 16 en virtud del regla-

mento de la CE (1107/2009) (https://ec.europa.eu/sdg_02_51). En la Figura 5 se refleja la evolución del indicador HRI1 en España en los últimos años, en comparación con la media de la UE.

Figura 5. Evolución del HRI1 en España en comparación con la media de los países de la UE en los últimos años.



En líneas generales, la evolución del HRI1 en España sigue una pauta similar a la media de la UE, aunque el aumento en los 2 últimos años merece ser vigilado por si persiste en los años siguientes. Digamos también que la legislación de la UE, y por tanto la española, va siendo cada año más exigente en el registro de transacciones y utilización de PP. FF. en la UE, con la finalidad de mejorar la transparencia del mercado y garantizar la trazabilidad y uso correcto. No obstante, es necesario insistir en la necesidad de mejorar todavía en varios aspectos en el campo de los PP. FF, tal como se ha intentado explicar anteriormente y en el apartado siguiente.

B3.8. Luces, sombras y futuro de los Productos Fitosanitarios y los Bioplaguicidas en la UE

El examen del papel de los PP. FF. en la agricultura del futuro a corto y medio plazo se ha planteado a menudo como un debate entre lo blanco y lo negro. En este Capítulo hemos tratado de presentar los beneficios aportados por los PP. FF. para el aumento de la productividad de la agricultura, a la vez que advertido de sus efectos adversos para las personas, el medioambiente y también para la propia agricultura. Conscientes de la necesidad de mantener, e incluso acrecentar, los primeros y mitigar los segundos, la investigación científico- técnica está aportando innovaciones diversas para conseguirlo, y se han seleccionado algunas significativas.

Crear que los productores tienen que elegir entre sufrir afecciones generalizadas de plagas y seguir echando de menos los productos ahora no autorizados es un falso dilema, porque desde que la UE implementó una prohibición parcial de los mismos en 2013, muchos agricultores eficientes que han dejado de usar los PP. FF. no autorizados, ya defienden otros métodos más sostenibles para controlar las plagas. Entre ellos, la rotación de cultivos y el control biológico, así como la aplicación de insecticidas solamente cuando la población de las plagas rebasa ciertos niveles como aconseja la GIP. Ello les exige un gran esfuerzo en tiempos muy difíciles y con ganancias bajo mínimos, pero la renovación generacional debería implicar también la puesta en marcha de las prácticas agrícolas más sostenibles y siempre con base científica, para lo cual la formación en Medicina

de los Vegetales es imprescindible (cf., Capítulo A2.). Pero igual que es **urgente que se investigue en nuevas alternativas para los cultivos y problemas fitosanitarios que no disponen ahora de los PP. FF.** que necesitan -y que rápidamente se disponga de herramientas eficaces y sostenibles en respuesta a los consumidores que demandan productos más seguros-, **también es necesario aplicar el mismo rasero a todas las importaciones de países terceros.**

El control biológico debe ser considerado como una alternativa, o en otros casos como un complemento que debe ser compatible con el uso de plaguicidas químicos, y cada vez hay más cepas bacterianas, fúngicas o productos de origen natural que se comercializan como Bioplaguicidas y que se utilizan especialmente en la agricultura ecológica y otras. De igual forma, nuevos plaguicidas no microbianos pueden ofrecer posibilidades para el manejo sostenible de enfermedades, y algunos como los péptidos antimicrobianos se han propuesto como novedosos para superar los problemas causados por patógenos fúngicos y bacterianos de las plantas (Camó et al., 2019), pero todavía no están autorizados. Además, aunque el manejo de dichas enfermedades en la agricultura convencional se ha basado en atacar directamente a los patógenos, se están orientando esfuerzos considerables para identificar compuestos que activen y potencien la expresión de los mecanismos defensivos existentes en la planta, y la protección contra enfermedades de los cultivos se orienta actualmente a un enfoque multiobjetivo, que consiste en combinar la acción contra los patógenos y las que estimulen las defensas de las plantas (Damalas y Koutroubas, 2018).

La CE alerta de que las normas vigentes de la Directiva sobre el uso sostenible de los plaguicidas "han demostrado ser demasiado débiles y se han aplicado de forma desigual". De la misma manera, no se ha avanzado lo suficiente en el uso de la GIP, ni en otros enfoques alternativos. Pero sí se ha demostrado que los plaguicidas químicos perjudican la salud humana, reducen la biodiversidad en las zonas agrícolas y contaminan el aire, el agua y el medioambiente en general. Por ello, **los Estados miembros fijarán sus propios objetivos nacionales de reducción del uso de PP. FF. dentro de parámetros definidos para garantizar la consecución de los objetivos fijados a escala europea hasta 2030.**

Las nuevas medidas deberán garantizar que todos los agricultores y otros usuarios profesionales de PP. FF. practiquen la GIP, que prioriza el uso de métodos alternativos para la prevención y control de plagas y deja el control químico con PP. FF. como último recurso (cf., Capítulo C6.). En este sentido, los países deberán establecer normas específicas por cultivos, que indiquen las alternativas a los plaguicidas químicos que han de utilizarse. Además, la CE quiere prohibir el uso de todos los PP. FF. en áreas verdes urbanas, así como en cualquier zona ecológicamente sensible por la presencia de insectos polinizadores.

En esta transición a sistemas de producción más sostenibles, la UE se plantea un paquete de medidas para ayudar a los agricultores y usuarios incluyendo: (i) nuevas normas de la política agrícola común para garantizar que los productores sean compensados por cualquier coste relacionado con la aplicación de las nuevas normas, durante un período transitorio de 5 años; (ii) aumentar la variedad de alternativas biológicas y de bajo riesgo en el mercado; (iii) apoyar la investigación y el fomento de las nuevas tecnologías y técnicas, incluidas las englobadas en la agricultura de precisión; y (iv) un plan de acción ecológico. Todas estas medidas resultan imprescindibles en la situación actual y para poder asesorar a los agricultores con bases científicas en las mejores técnicas para la Sanidad de los cultivos y masas forestales.

Los cambios previstos en la evaluación actual de riesgos que se realiza actualmente en la UE, tanto para los PP. FF. como para los Bioplaguicidas, no solo ofrecen la opción de mejorar sustancialmente nuestra comprensión y mitigación de los riesgos de los mismos, sino que también brindarán oportunidades para combinar diferentes medidas de gestión de los cultivos y masas forestales que sean compatibles. Si los indicadores agroambientales de riesgo para la biodiversidad y los servicios ecosistémicos se definieran claramente, todas las partes interesadas, incluidas la industria, las autoridades políticas, los agricultores y los conservacionistas, estarían

facultados para mejorar su entorno local por los medios más adecuados para ellos. Esto podría implicar mejoras estructurales para la conectividad del ecosistema, reducción del uso de PP. FF., creación de refugios para mitigar el riesgo de resistencia a ellos y otras medidas necesarias.

El marco actual para los productos de control biológico cumple deficientemente con los principios de que la legislación debe tener previsibilidad legal, proporcionalidad y que no debe ser discriminatoria, por ejemplo, en comparación con las reglamentaciones correspondientes en otras jurisdicciones comparables. Pero para poder racionalizar la autorización de la UE de estos productos de control, tanto la legislación básica como las evaluaciones de agentes y productos necesitan una base más fuerte de la ciencia básica.

Los sistemas regulatorios deberían tener mayor adaptabilidad científica, es decir, la capacidad de tener en cuenta nuevos hallazgos científicos y técnicos con rapidez. Si se identifican nuevos riesgos, es posible que se necesiten medidas de precaución adicionales. Por el contrario, si el progreso científico muestra que los riesgos sospechados no son realistas, las exigencias reglamentarias pueden relajarse. En la última década, ha habido grandes avances en la comprensión de la filogenia, la ecología y la biología molecular de los microorganismos. Pero las regulaciones en la UE no siempre se han alineado con el conocimiento microbiológico actual y salvo excepciones, la EFSA no desarrolla regularmente guías actualizadas para las evaluaciones de productos de control biológico.

Por otra parte, aunque los Bioplaguicidas llevan mucho tiempo atrayendo la atención mundial como una estrategia fiable y más segura, todo ello debe ser demostrado en cada caso concreto. La introducción en un nuevo hábitat de billones de nuevos microorganismos de uno o varios tipos -cuyas propiedades han sido poco estudiadas en muchos casos- o de productos naturales -que cambien el pH y la composición química del hábitat de los cultivos-, producirán nuevas interacciones de origen desconocido y desajustes en la microbiota de los órganos vegetales tratados, del suelo, del agua, etc., cuyos efectos sobre todo tipo de organismos y no solo sobre los diana, será necesario estudiar a corto y medio plazo. Hay que ser consciente de que, con el previsible incremento exponencial en la utilización de estos Bioplaguicidas, se tratarán con ellos millones de hectáreas y ello creará nuevos problemas de imprevisible naturaleza y desequilibrios que habrá que conocer y evaluar. La disponibilidad de (i) la secuencia del genoma de los microorganismos utilizados en el control biológico y su análisis detallado; (ii) de los resultados de estudios de transcriptómica y multi-ómicos sobre los distintos modos de acción; y (iii) de datos completos de los metabolitos que produzcan, deberían ser necesarios para tener información sobre sus posibles propiedades in vivo, previamente a ser evaluados en campo por equipos pluridisciplinarios. Como ya se ha indicado, el origen natural de los microorganismos utilizados o de las sustancias activas tampoco garantiza su inocuidad en todo tipo de seres vivos.

Según Köhl et al. (2019), las regulaciones actuales de la UE sobre el registro de Bioplaguicidas microbianos deberían hacer una diferenciación basada en la ciencia, entre la mayoría de los compuestos con modos de acción que se consideran seguros y que no son relevantes para la evaluación de riesgos detallada y los de riesgo elevado. El mayor riesgo potencial lo presentan los productos donde los metabolitos secundarios están presentes como ingredientes activos en las formulaciones en altas concentraciones y en ellos se deberían concentrar las evaluaciones de riesgos, porque además su número es limitado.

Según un informe de EFSA (2015), los conocimientos relevantes sobre el control biológico de plagas, la ecología microbiana y la evaluación de la seguridad microbiológica han estado disponibles durante varias décadas, pero no se han aplicado lo suficiente. La inexperiencia con los Bioplaguicidas y la escasez de experiencia en microbiología en las instituciones reguladoras probablemente hayan contribuido a las evaluaciones largas y complicadas. Para evitarlo, sería necesario: (i) asignar más recursos para la investigación en la evaluación de los mismos ya que la cantidad de recursos -incluido el tiempo- dedicados a las autorizaciones de la UE no son proporcionales a los peligros asociados con los microorganismos para los humanos o el medio

ambiente; y (ii) desarrollar políticas regulatorias con base científica que sean más pertinentes con respecto a su uso en alimentos, piensos u otros tipos de aplicaciones ambientales. Todo ello indica que el enfoque principal de los marcos regulatorios para cualquier organismo o sustancia de origen biológico debe estar en el enfoque pluridisciplinar de los peligros intrínsecos y los riesgos correspondientes.

Las predicciones mejoradas de riesgo para escenarios específicos del mundo real deberían ser holísticas y requerirían la consideración de al menos, los siguientes factores en los sistemas y modelos de análisis de riesgos de PP. FF.: (i) **contexto ecológico**, es decir, las propiedades ecológicas como las funciones de los organismos y la composición de las comunidades de organismos de todo el ecosistema a proteger; (ii) **contexto del paisaje**, es decir, la situación en la que se inserta el ecosistema. Comprende las condiciones ambientales generales, como el tipo de hábitat y el clima, y aspectos específicos del lugar, como la conectividad con otros sitios y la presencia de factores de estrés adicionales; y (iii) **contexto de gestión**, incluidos los patrones de uso de los agricultores según lo prescrito por los administradores de riesgos gubernamentales. La integración de todos estos factores en los sistemas y modelos de riesgos representa un gran desafío, dado que el aumento de la complejidad de los sistemas de prueba tiene el costo de una menor fiabilidad y que hay que ser conscientes de que los modelos todavía están en la infancia de su desarrollo (Schäfer et al., 2019).

Desde una perspectiva de política social, las medidas regulatorias para cualquier producto deben adaptarse a los peligros y riesgos potenciales específicos que plantean. **Las regulaciones innecesariamente estrictas pueden desalentar la innovación, retrasar el progreso científico y tecnológico y conducir al desperdicio de recursos. Por el contrario, una política excesivamente permisiva puede dejar al público y al medio ambiente expuestos a riesgos impredecibles y potencialmente muy graves.**

Según Singh et al. (2020), la adopción de nuevas tecnologías para la liberación controlada de PP. FF., por ejemplo, la nanotecnología, la microencapsulación, la emulsión, etc., es atractiva y ventajosa para la liberación controlada de PP. FF. y puede ayudar a mitigar la carga de plaguicidas en el ecosistema. Además, **el enfoque de liberación dirigida y sostenida reducirá sustancialmente la dosis efectiva de las sustancias activas disponibles para lixiviación y volatilización.** Eventualmente, estos sistemas prometen ser una tecnología innovadora para reducir el uso indiscriminado de PP. FF. convencionales y sus impactos adversos, y contribuir a la transformación del sector agrario hacia una mayor seguridad alimentaria. Pero es muy necesario un aumento considerable de la investigación en este campo, porque además **los métodos de liberación controlada en el medio ambiente suponen un avance, pero su evaluación rigurosa es necesaria para arbitrar la biodisponibilidad, durabilidad y toxicidad de los polímeros y sus metabolitos biodegradables. Ambos pueden producir ecotoxicidad, aunque se podría manejar mejor si se utilizaran polímeros naturales.** Al igual que los polímeros, las formulaciones basadas en emulsiones también representan una amenaza ecológica por tratarse de productos tensioactivos, que son tóxicos para los ecosistemas acuáticos (Singh et al., 2020). Todo esto indica que algunas de estas formulaciones controladas son potencialmente ecotóxicas y, por lo tanto, los esfuerzos concertados basados en la evidencia científica son esenciales para garantizar su seguridad antes de los ensayos de campo, junto con la evaluación de su toxicidad y estudios detallados en todos los niveles tróficos del ecosistema, incluidos los organismos diana y no diana.

Un tema sin resolver aún y de importancia primordial, es la **gestión de las resistencias a fungicidas, insecticidas y herbicidas de síntesis, especialmente en los cultivos con varias y graves plagas, enfermedades y malas hierbas que requiere investigación científico-técnica en nuevas estrategias.** Las más usadas son las mezclas, o alternancias muy estrictas de sustancias activas con diferentes modos de acción, a fin de evitar el desarrollo de cepas resistentes de los organismos diana, dado que las nuevas familias de productos son muy específicas en cuanto al mecanismo y modo de acción. Pero las demandas de las grandes cadenas de supermercados de la UE limitando el número de trazas de PP. FF. en los alimentos (fundamentalmente frutas y hortalizas), impide las mezclas y obliga al uso continuado de pocos productos de baja persistencia, lo cual pone en riesgo su vida útil y

la sostenibilidad general del sistema (Hinarejos y Palomar, 2019). En el caso de los Bioplaguicidas, la aparición de resistencias a productos de origen microbiológico se conoce solo para algunos de ellos, como en el caso de la conocida cepa K84 de *Rhizobium rhizogenes* (sinónimo *Agrobacterium radiobacter*), utilizada en los cinco continentes como método de control de los tumores causados por distintas especies de *Agrobacterium*, *Rhizobium* y *Allorhizobium*. Este modelo demuestra que a pesar de ejercer un biocontrol eficaz basado en múltiples mecanismos, también se pueden observar resistencias, en este caso debidas a la conjugación de plásmidos, cuando se buscan con bases científicas en ensayos dirigidos y a medio plazo (Penyalver et al., 2000).

En general, para los productos de control biológico, Köhl et al. (2019) concluyen que el desarrollo de resistencias es mucho menos probable que frente a la acumulación de los productos químicos. Solo los productos que contienen metabolitos secundarios altamente concentrados y purificados producidos in vitro o el uso de cepas de microorganismos modificados genéticamente con una expresión extraordinariamente alta de un solo metabolito antimicrobiano, podrían a priori generar presiones de selección comparables a los fungicidas de sitio único.

Se requiere también incrementar la cooperación entre los sectores público y privado para facilitar el desarrollo, fabricación y comercialización de los Bioplaguicidas como una alternativa ecológica. En este contexto, el descubrimiento de nuevas sustancias y la investigación científico-técnica sobre formulación y distribución impulsarían la comercialización y el uso de Bioplaguicidas, pero se necesita investigación adicional sobre la integración de los agentes biológicos en sistemas de producción convencionales. También es importante mantener un bajo costo de estos productos para los agricultores, particularmente en los países en desarrollo. Si bien las nuevas sustancias podrían servir como una opción prometedora para su uso en el control de plagas, se requiere más investigación de campo para optimizar las dosis y momentos oportunos de tratamiento y evaluar su eficacia en problemas específicos en varios sistemas de cultivo a medio y largo plazo. La microencapsulación basada en nanotecnología podría también mejorar la acción residual de los productos de control biológico y esto podría incrementar su uso en campo. Para una mejor comprensión de las interacciones entre agentes de biocontrol y organismos diana, se deben considerar también los perfiles genómicos y realizar bioensayos de los compuestos microbianos considerando la variabilidad genética de los agentes nocivos plaga y de los cultivos. Además, las tecnologías postgenómicas como CRISPR/Cas9 han reformado las tecnologías de edición de los genomas y han aumentado las posibilidades de desarrollar nuevos Bioplaguicidas editados. Estos nuevos productos microbianos modificados requerirán desafíos regulatorios adicionales para definir contendientes de bajo riesgo a fin de facilitar su comercialización y lanzamiento al mercado (Tilman et al., 2011).

Para el crecimiento y la sostenibilidad del sector de PP. FF. y de biocontrol en España hacen falta medidas a nivel nacional y europeo que permitan: (i) facilitar, agilizar y simplificar desde el MAPA su registro en nuestro país y acelerar el procedimiento de aprobación de los PP. FF. y de los Bioplaguicidas de bajo riesgo en la UE, que puedan ser usados solos o sean compatibles con productos químicos, con el fin de promover su uso en la GIP; (ii) el desarrollo de nuevas formulaciones de mayor eficiencia y persistencia y la utilización de nuevas tecnologías de precisión para los tratamientos tanto de productos de síntesis como de control biológico; y (iii) el incremento de la disponibilidad de Bioplaguicidas para los distintos cultivos y especialmente para usos menores porque ayudaría a conseguir la disminución los niveles de residuos de PP. FF. en los alimentos.

La propuesta de Hinarejos y Palomar (2019) de convertir a las compañías de PP. FF. en integradores de nuevas tecnologías para llegar a ser proveedores de soluciones, debería incluir tanto a los **proveedores de productos químicos de síntesis como de los productos biológicos y favorecer la investigación en las interacciones entre ambos**. Por otro lado, los agricultores deberían ser los receptores de las novedades fitosanitarias y estar abiertos al necesario cambio frente a los nuevos retos de la agricultura del siglo XXI. Ello requiere mejorar su formación y la de los asesores en las nuevas posibilidades para una Medicina de cultivos y masas forestales más sostenible. Pero también que las empresas relacionadas con los

PP. FF. y con los Bioplaguicidas colaboren con la investigación tanto académica como de otros organismos públicos, en los numerosos aspectos que todavía requieren aportaciones científicas para la optimización de la Sanidad Vegetal del siglo XXI.

B3.9. Bibliografía

- Aktar, M.W., Sengupta, D., y Chowdhury, A. 2009. Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdiscip. Toxicol.* 2:1-12. doi: 10.2478/v10102-009-0001-7.
- Alonso Prados, J.L., y Guijarro, B. 2020. Sustancias activas y productos fitosanitarios de bajo riesgo. Marco legislativo, requisitos de datos y evaluación, importancia y oportunidades. *Phytoma* 323: 46-53.
- Atwood, D., y Paisley-Jones, C. 2017. Pesticides industry sales and usage: 2008–2012 Market Estimates. US Environmental Protection Agency, Washington DC.
- Berg, van den, F., Kubiak, R., Benjey, W.G., Majewski, M.S., Yates, S.R., Reeves, G.L., Smelt, J.H., y van der Linden, A.M.A. 1999. Emission of pesticides into the air. *Water, Air & Soil Pollution* 115, 195–218. <https://doi.org/10.1023/A:1005234329622>.
- BOE. 2009. Reglamento 1185/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de noviembre de 2009 relativo a las estadísticas de plaguicidas. *Boletín Oficial del Estado* L 324/1.
- BOE. 2011. Reglamento de ejecución (UE) no 540/2011 de la Comisión de 25 de mayo de 2011 por el que se aplica el Reglamento (CE) no 1107/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que respecta a la lista de sustancias activas autorizadas. *Boletín Oficial del Estado* L 153/1.
- BOE. 2012. Real Decreto 1311/2012, de 14 de septiembre, por el que se establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios. *Boletín Oficial del Estado* L223.
- Boedeker, W., Watts, M., Clausing, P., y Marquez, E. 2020. The global distribution of acute unintentional pesticide poisoning: estimations based on a systematic review. *BMC Public Health*. 20:1875. doi: 10.1186/s12889-020-09939-0.
- Camó, C., Bonaterra, A., Badosa, E., Baró, A., Montesinos, L., Montesinos, E., Planas, M., y Feliu, L. 2019. Antimicrobial peptide KSL-W and analogues: Promising agents to control plant diseases. *Peptides* 112: 85-95.
- Cobos, J.M. 2021. Novedades legislativas en el uso sostenible de productos fitosanitarios: Real Decreto 555/2019 y Real Decreto 285/2021. *Phytoma* 334: 112-114.
- Collinge, D.B., Jensen, D.F., Rabiey, M., Sarrocco, S., Shaws, M.W., y Shaw, R.H. 2022. Biological control of plant diseases – What has been achieved and what is the direction?. *Plant Pathol.* 71: 1024-1047.
- Damalas, C.A., y Koutroubas, S.D. 2018. Current status and recent developments in biopesticide use. *Agric.* 8: 13.doi.org/10.3390/agriculture8010013.
- DOUE. 2002. Reglamento (CE) 473/2002 de la Comisión, de 15 de marzo de 2002, por el que se modifican los anexos I, II y VI del Reglamento (CEE) n° 2092/91 del Consejo sobre la producción agrícola ecológica y su indicación en los productos agrarios y alimenticios, y por el que se establecen disposiciones de aplicación relativas a la transmisión de información sobre la utilización de compuestos de cobre. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L-2002-80482.
- DOUE. 2005. Reglamento (CE) 396/2005 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de febrero de 2005 relativo a los límites máximos de residuos de plaguicidas en alimentos y piensos de origen vegetal y animal y que modifica la Directiva 91/414/CEE del Consejo. *Diario Oficial de la Unión Europea* L-2005-80504
- DOUE. 2009. Directiva 2009/128/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de octubre de 2009 por la que se establece el marco de la actuación comunitaria para conseguir un uso sostenible de los plaguicidas. *Diario Oficial de la Unión Europea* L 2009-242.
- DOUE. 2009. Reglamento (CE) 1107/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de octubre de 2009, relativo a la comercialización de productos fitosanitarios y por el que se derogan las Directivas 79/117/CEE y 91/414/CEE del Consejo. *Diario Oficial de la Unión Europea* L-2009-82202.
- DOUE. 2011. Reglamento (UE) 546/2011 de la Comisión de 10 de junio de 2011 por el que se aplica el Reglamento (CE) 1107/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo a los principios uniformes para la evaluación y autorización de los productos fitosanitarios L-155/127.
- DOUE. 2019. Directiva 2019/782 de la Comisión de 15 de mayo de 2019 por la que se modifica la Directiva 2009/128/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que respecta al establecimiento de indicadores de riesgo armonizados. *Diario Oficial de la Unión Europea* L 127.
- Dutcher, J.D. 2007. A review of resurgence and replacement causing pest outbreaks in IPM. Págs. 27-43, en: A. Ciancio y K.G. Mukerji, eds. *General Concepts in Integrated Pest Management*. Springer, Dordrecht.
- EFSA (European Food Safety Authority). 2015. Literature search and data collection on RA for human health for microorganisms used as plant protection products. EFSA supporting publication 2015: EN-801. 173 pp.
- EFSA (European Food Safety Authority), Medina-Pastor, P., y Triacchini, G. 2020. The 2018 European Union report on pesticide residues in food. *EFSA Journal* 18: 6057, 103. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6057> ISSN:1831-4732©2020
- FAO. 2017. The International Plant Protection Convention. *Emerging Issues in Plant Health*. FAO, Roma, Italia.
- Fernandez-Cornejo, J., Nehring, R., Osteen, C., Wechsler, S., Martin, A., y Vialou, A. 2014. Pesticide Use in U.S. Agri-

- culture: 21 Selected Crops, 1960-2008, EIB-124, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service.
- Gill, H.K., y Garg, H. 2014. Pesticides: environmental impacts and management strategies. Págs. 187-230, en: Soloneski, S., ed. Pesticides: Environmental Impacts and Management Strategies. Intechopen, Londres.
- Giner, M., y Alonso Prados, J.L. 2019. Disponibilidad de sustancias activas eficientes en el control de plagas, enfermedades y malas hierbas de cultivos estratégicos y usos menores: de la Directiva 91/414/CEE al Reglamento 1107/2009. Págs. 503-526, en: R.M. Jiménez-Díaz y M.M. López, eds. Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España. UCOPress. Editorial Universidad de Córdoba. Córdoba.
- Hinarejos, E., y Palomar, C. 2019. El sector de los productos fitosanitarios y productos biológicos relacionados con la Sanidad Vegetal. Págs. 199-220, en: R.M. Jiménez-Díaz y M.M. López, eds. Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España. UCOPress. Editorial Universidad de Córdoba. Córdoba.
- IHS Markit 2022. Report on biological control agents 2022. Biopesticides and related BCAs. <https://ihsmarkit.com/info/0422/biological-control-agents-2022.html>.
- Köhl, J., Kolnaar, R., y Ravensberg, W, 2019. Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases: relevance beyond efficacy. *Front. Plant Sci.*, 10: 845. doi: 10.3389/fpls.2019.00845.
- Kovach, J., Petzoldt, C., Degni, J., y Tette, J. 1992. A method to measure the environmental impact of pesticides. *New York's Food and Life Sci. Bull.* 139:1-8.
- Lamichhane, J.R., Osdaghi, E., Behlau, F., Köhl, J., Jones, J.B., y Aubertot, J.-N. 2018. Thirteen decades of antimicrobial copper compounds applied in agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 38. doi: 10.1007/s13593-018-0503-9.
- Legislative Observatory, European Parliament. 2021. Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally friendly food system. 2020/2260(INI) - 30/09/2021 - Committee report tabled for plenary.
- MAPA, 2018. <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sanidad-vegetal/productos-fitosanitarios/ropo>.
- Mihou, A.P., Michaelakis, A., Krokos, F.D., Mazomenos, B. E., y Couladouros, E.A. 2007. Prolonged slow release of (Z)-11-hexadecenyl acetate employing polyurea microcapsules. *J. Appl. Entomol*, 131: 128-133.
- Nair, R., Varghese, S.H., Nair, B.G., y Maekawa, T. 2010. Nanoparticulate material delivery to plants. *Pl. Sci.* 179:154-163.
- Oerke, E.C. 2006. Crop losses by pests. *J. Agric. Sci.* 14: 31-43.
- Penyalver, R., Vicedo, B., y López, M.M. 2000. Use of the genetically engineered Agrobacterium strain K1026 for biological control of crown gall. *Eur. J. Plant Pathol.* 106: 801-810. <https://doi.org/10.1023/A:1008785813757>.
- Perlatti, B., de Souza Bergo, P. L., Fernandes, M.F., das G.F. da Silva Fernandes, J.B., y Forim, M.R. 2013. Polymeric nanoparticle-based insecticides: a controlled release purpose for agrochemicals. En: S. Trdan, ed. Insecticides - Development of Safer and More Effective Technologies Intechopen, London. <https://www.intechopen.com/chapters/42208> doi: 10.5772/53355.
- Ravensberg, W.J. 2011. Critical factors in the successful commercialization of microbial pest control products. Págs., 295-356, en: W. Ravensberg, ed. A Roadmap to the Successful Development and Commercialization of Microbial Pest Control Products for Control of Arthropods. Progress in Biological Control, vol. 10. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0437-4_7.
- Sanfeliu, I. 2021. La pérdida de credibilidad moral de la Unión Europea. *Valencia Fruits.* 2 nov: 12-13.
- Schäfer, R.B., Liess, M., Altenburger, R., Filser, J., Hollert, H., Nickoll, M.R., Schäffer, A., y Scheringer, M. 2019. Future pesticide risk assessment: narrowing the gap between intention and reality. *Environ. Sci. Eur.* 31: 1-5.
- Singh, A., Dhiman, N., Kar, A.K., Singh, D., Purohit, M.P., Ghosh, D., y Patnaik, S. 2020. Advances in controlled release pesticide formulations: Prospects to safer integrated pest management and sustainable agriculture. *J. Hazard. Mater.* 385: 1-20.
- Stehle, S., y Schulz, R. 2015. Pesticide authorization in the EU—environment unprotected?. *Environ Sci Pollut Res* 22:, 19632-19647. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5148-5>.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., y Befort, B.L. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 108: 20260-20264.
- USGS. 1995. Pesticides in the atmosphere; current understanding of distribution and major influence. Fact sheet 152-95. http://water.usgs.gov/nawqa/pnsp/pubs/fs152-95/atmos_4.
- Vikas J., Dhaliwal, G.S., y Opende, K. 2013. Pest management in 21st Century: Roadmap for future. *Biopestic. Int.* 9: 1-22.
- Zhang, W., Jiang, F., y Ou, J. 2011. Global pesticide consumption and pollution: with China as a focus. *Proc. Int. Acad. Ecol. Environ. Sci.* 1: 125-144.

B4. Capítulo B4. Situación actual y retos de la Sanidad Vegetal en la Agricultura Ecológica

B4.1. Principales tipos actuales de agricultura y sus características

B4.1.1. Agricultura convencional y gestión integrada de enfermedades, plagas y malas hierbas

La agricultura convencional se puede definir abreviadamente como un sistema productivo de carácter no natural basado en el consumo de insumos externos, que comprende el laboreo intensivo del suelo, el uso de semillas y de material vegetal de cultivares tradicionales u obtenidos mediante mejora genética convencional o por transgénesis, el monocultivo frecuente, el uso de abonado orgánico y fertilizantes químicos, y el control de plagas, enfermedades, vectores y malas hierbas -que denominaremos plagas de forma general- basado en tratamientos con productos fitosanitarios (PP. FF.). Es la parte productiva de la actual agroindustria.

Esta forma de agricultura tiene como objetivos la máxima rentabilidad y la mayor producción, y aunque se basa en la agricultura tradicional practicada desde hace siglos, va integrando todas las herramientas y mejoras que van surgiendo fruto de la innovación tecnológica. Sin embargo, la práctica intensiva de la agricultura convencional causa problemas medioambientales que no se han tenido en cuenta hasta las últimas décadas, y que hacen que este tipo de agricultura se esté considerando como difícilmente sostenible en muchos países. En 2008, el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) calculó que el sector agrario generaba el 10-12 % de las emisiones de gases con efecto invernadero y el 84 % y 52 % de la cantidad global de emisiones de óxido nitroso y de metano, respectivamente. Pero posteriormente, en 2019, la FAO anunció que la agricultura, los usos forestales y otros similares ya causaban aproximadamente el 25 % de las emisiones totales de gases con efecto invernadero, que la degradación del suelo por los usos agrícolas y ganaderos ha producido 78 giga toneladas de CO₂ en la atmósfera, y que la escasez de agua afecta al 40 % de los habitantes del planeta Tierra. En España, el estudio auspiciado por la Real Academia de Ingeniería estimó que el porcentaje de gases de efecto invernadero que el sector agrario produce en su conjunto era del 17 % (Aguilera et al., 2020). Por todo ello, producir más, pero con menos consumo de insumos y menor perjuicio para el medioambiente deben ser objetivos estratégicos de la agricultura del siglo XXI a nivel global, tal como ya señalamos en el capítulo A1.

Otro de los inconvenientes reconocidos de la agricultura convencional es el uso indiscriminado de fertilizantes, PP. FF. de síntesis y de otros productos químicos que se ha venido realizando, la mayoría de los cuales no se degradan fácilmente, y tanto sus residuos como los productos resultantes de su descomposición contaminan en mayor o menor grado el suelo agrícola y los terrenos adyacentes, así como las aguas superficiales y subterráneas, llegando al mar. Por otra parte, el manejo continuado de determinados PP. FF. supone un serio riesgo a medio plazo para la salud del agricultor, especialmente si no se toman todas las precauciones necesarias. Y los residuos en los alimentos, especialmente de PP. FF. sistémicos y de los aplicados en postcosecha, tienen un riesgo potencial para la salud del consumidor, especialmente en el caso de estos últimos, al realizarse los tratamientos en fases más próximas al consumo de los productos vegetales, lo cual hace que haya menos tiempo para que los residuos se puedan degradar. Además, la aplicación continuada de una misma sustancia activa, o de sustancias activas químicamente relacionadas, está provocando la aparición de estirpes de artrópodos fitófagos, bacterias, hongos, y oomicetos fitopatógenos, y malas hierbas resistentes a insecticidas, bactericidas, fungicidas y herbicidas, respectivamente, lo que a su vez obliga al desarrollo de nuevos PP. FF. para su control; y el uso de productos desinfectantes de amplio espectro está afectando negativamente a la microbiota edáfica dando lugar a

suelos microbiológicamente empobrecidos y a la creciente contaminación del agua, medioambiente y suelo. Por todo ello, la legislación europea y por tanto la española, promueven el uso sostenible de productos fitosanitarios y las acciones para lograrlo (BOE, 2012). Se puede encontrar una exposición crítica del uso de PP. FF. en el capítulo B3 de esta obra.

Un aspecto negativo adicional de la intensificación de la agricultura convencional es la alarmante **pérdida de biodiversidad**, tanto vegetal como animal en ecosistemas terrestres y acuáticos a nivel mundial, a la que contribuyen el monocultivo y ciertas rotaciones demasiado intensivas, junto con la intensificación en el uso de determinados PP. FF. y otras prácticas como la deforestación para implantar agricultura extensiva. Por ejemplo, en Australia y en países europeos se han observado reducciones significativas de las poblaciones de invertebrados acuáticos, incluso a concentraciones de PP. FF. inferiores a las consideradas como no dañinas para el medioambiente por la legislación de esos países (Beketov et al., 2013). En la misma línea, un estudio reveló que la diversidad de plantas, de ciertos escarabajos, y de aves que anidan en el suelo, fueron consistentemente afectadas por ciertos insecticidas y fungicidas en varios países (Geiger et al., 2015); y también se ha observado que los tratamientos herbicidas reducen la diversidad vegetal y la de las especies de pájaros herbívoros.

La necesidad de mitigar los efectos negativos de la intensificación de la agricultura convencional antes descritos, **ha promovido el concepto y utilización en ella de la Gestión Integrada de Plagas (s. l.) o (GIP)** –en la que el término plagas incluye a artrópodos fitófagos, enfermedades y malas hierbas de cultivos agrícolas y masas forestales como lo usa el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación o MAPA-. El concepto, complejidad y estrategias de aplicación de la GIP se estudian en extenso en el Capítulo C6 del presente libro. Implica la **prevención y el manejo simultáneo de todas las plagas, su monitorización periódica y la de sus enemigos naturales y de los antagonistas presentes en la explotación durante todo el periodo vegetativo, el uso concurrente de múltiples prácticas culturales necesarias para evitar o reducir las poblaciones de las distintas plagas de una explotación, la introducción de enemigos naturales o antagonistas de los artrópodos fitófagos y patógenos en las decisiones y requiere el uso de umbrales económicos o poblacionales de las plagas para realizar los tratamientos con PP. FF., que siempre deben ser considerados como el último recurso en el manejo de las mismas, y solo cuando se superan determinados umbrales, dando además prioridad a los métodos sostenibles biológicos, físicos y otros no químicos (Kogan, 1998; Ehler, 2006)**. Según la legislación actual, (BOE,2012) la GIP es de obligado cumplimiento en todos los países de la Unión Europea (UE). Pero existe otra denominación más general que es la de Producción integrada, un concepto que va más allá de la GIP, porque aplica esta, pero también incluye otros aspectos relacionados con la sostenibilidad como riego, fertilización, plantación, recolección, etc.

B4.1.2. Agricultura Ecológica

En el año 2019, el entonces Director General de la FAO declaraba “Hemos llegado al límite del paradigma de la revolución verde”, que fue una transformación de las formas de producción agrícola de éxito mundial promovida para alimentar a una sociedad hambrienta tras dos guerras mundiales, centrada en el incremento de la productividad, con semillas mejoradas, explotaciones intensivas, mecanización y uso de fertilizantes y PP. FF. de síntesis. Y fue muy efectiva en su cometido, pero lleva años revelándose como un sistema con un alto coste medioambiental. Para contrarrestar este efecto se han promovido durante las últimas décadas otras formas de agricultura presumiblemente menos perjudiciales para el medioambiente, que incluyen diferentes nomenclaturas tales como la Agricultura Ecológica, agroecológica, biodinámica, de conservación, urbana, vertical, y permacultura, entre otras, para las que no se dispone de conceptualización clara en un contexto académico y legislativo y cuyas diferencias a veces resultan difíciles de definir. La más conocida es la Agricultura Ecológica y en ella se centran los siguientes

apartados, por ser la que ocupa mayor extensión actual de cultivo y la que más perspectivas de futuro tiene en España y la UE; aunque también se definirá brevemente (cf. B4.1.3.7) la producción agroecológica por su posible interés para determinadas zonas.

Según la nomenclatura oficial en España, la Agricultura Ecológica (*organic agriculture* u *organic farming* en los países de lengua inglesa) es un sistema holístico de gestión de la producción agrícola que, de acuerdo con los *International Food Standards of the Codex Alimentarius*, se caracteriza por enfatizar el uso de prácticas agronómicas, biológicas y mecánicas de manejo de los cultivos frente al uso de insumos como fertilizantes y productos químicos de síntesis para el control de diversas plagas (FAO/WHO Joint Standards Programme, 2001). Se trata de una definición mediada por medios y métodos de producción, pero carente de razón de ser sobre la armonización de las relaciones entre los componentes bióticos de los agroecosistemas y su interacción con el medioambiente. Comparte por ello principios de la GIP, pero la Agricultura Ecológica pretende fomentar y mejorar la salud del agroecosistema, y en particular la biodiversidad, los ciclos biológicos, y la actividad biológica del suelo, mediante un diseño apropiado y manejo de los procesos biológicos y los recursos naturales, con el ánimo de crear sistemas agrícolas de gran resiliencia (IFOAM, 2020). Como norma general, en esta forma de agricultura únicamente se admite la utilización de productos biodegradables de origen natural, además de algunos no biodegradables, como los derivados de cobre y siempre se aconseja: (i) el uso de cultivos antiguos, de origen local; (ii) el cultivo intercalado de varias especies; (iii) la rotación de cultivos; y (iv) proteger la fertilidad del suelo utilizando abonos naturales como el estiércol, si bien la limitación a esta única forma de fertilización hace cuestionable para algunos autores la sostenibilidad de la Agricultura Ecológica, porque no garantiza necesariamente el mantenimiento de la fertilidad del suelo en el tiempo y en ciertos cultivos (Rabbinge, 1993).

La Agricultura Ecológica también se propone fomentar la biodiversidad microbiana, para lo cual promueve el uso exclusivo de suelos libres de agroquímicos durante 3 o más años, y de semillas e insumos en cuya producción no hayan utilizados estos; así como el control de agentes nocivos mediante prácticas culturales y productos de origen natural. Sin embargo, paradójicamente, se autoriza para este último fin el uso de algunos compuestos de azufre (S) y especialmente de cobre (Cu) aunque su uso se ha demostrado muy perjudicial por su acumulación en el suelo.

La promoción de la Agricultura Ecológica puede ser debida a las nuevas exigencias de los consumidores o del mercado, y/o a las prioridades medioambientales de muchos países; pero también a los propios agricultores, ya que cada vez es mayor el número de los que la practican por el mayor precio de sus productos y por considerar la agricultura convencional, o incluso la GIP, como no sostenibles a corto o medio plazo. Actualmente en la UE los agricultores deben seguir obligatoriamente las normas de GIP, pero en otros muchos países se continúa practicando agricultura convencional a gran escala.

Los esfuerzos en promocionar la Agricultura Ecológica llevan en ocasiones a etiquetarla inadecuadamente como agricultura natural por parte de productores, comerciantes y consumidores, soslayando que no lo es en sentido estricto, ni en sus orígenes, ni en sus métodos, ya que la producción natural no requeriría intervención humana, mientras que este tipo de intervención subyace en la actividad agrícola desde la domesticación primigenia de las especies vegetales.

Los principios de la Agricultura Ecológica se han formulado de diferentes formas y con variados niveles de exigencias en los distintos países. Entre ellos, la Unión Europea (UE) ha legislado los estándares que debe cumplir la producción ecológica certificada en los Estados miembros, mediante el Reglamento (UE) 2018/848 sobre producción ecológica y etiquetado de los productos ecológicos y comercialización de sus productos, que fue complementado por otro posterior (DOUE, 2021).

Además, existe abundante legislación sobre las normas que deben cumplir los productos de Agricultura Ecológica en terceros países que exportan a la UE, que se pueden introducir en mercados de la UE si están amparados por la certificación de un organismo de control reconocido en el país de origen. No obstante, la importación de productos ecológicos no es una actividad medioambientalmente sostenible, especialmente si es intercontinental, porque su transporte tiene asociadas unas emisiones importantes de CO₂, en contraste con los productos generados en la Agricultura Ecológica de cercanía o proximidad.

La mejor percepción de los productos ecológicos, especialmente en los países europeos más ricos, promueve la preferencia del consumidor a pesar de que su precio sea superior a los de GP, ante la creencia extendida de que aquellos son más sanos, sostenida por una propaganda agresiva sin bases científicas adecuadamente demostradas. Por otro lado, cada vez se dispone de más datos sobre los riesgos para la salud humana y/o el medio ambiente de ciertos PP. FF., que se siguen comercializando a pesar de fundadas sospechas sobre su peligrosidad, probablemente por presiones de *lobbies* y de asociaciones de agricultores que los consideran imprescindibles para la rentabilidad de sus empresas y cultivos, respectivamente. Y cuando se importan alimentos ecológicos de terceros países, se ha comprobado que no siempre cumplen los exigentes estándares europeos respecto a residuos de fitosanitarios y este hecho ha obligado a adecuar la legislación al respecto.

La superficie mundial de producción ecológica se sitúa ya en 74,9 millones de ha según los datos de la Federación Internacional de Movimientos de Agricultura Orgánica (IFOAM) y el Instituto de Investigación de Agricultura Orgánica (FIBL), y se estima que hay unos 3 millones de productores ecológicos -80 % de ellos en países en desarrollo que los exportan a USA y Europa- (Agence BIO, 2020). El mercado de productos ecológicos a nivel mundial ha registrado un gran crecimiento en los últimos años y se sitúa ya en más de 120.000 millones de euros en 2020 (Shahbandeh, 2022). Este dato es una prueba de que los consumidores optan, cada vez más, por incorporar los productos ecológicos en su dieta.

A pesar de su gran presencia en medios de comunicación, el consumo de productos ecológicos aumenta sobre todo en los países desarrollados, pero en muchos países es todavía minoritario. Y surge la pregunta ¿saben todos los consumidores lo que quiere decir que un alimento sea ecológico? Realmente, el sello de producción ecológica solo garantiza que el producto obtenido mediante la Agricultura Ecológica ha superado un proceso de certificación y que cumple la normativa, que supuestamente garantiza que sea más sano y su cultivo más respetuoso con el medioambiente. El consumidor medio cree, erróneamente, que los productos con certificación de Agricultura Ecológica homologada oficialmente se cultivan a partir de una adecuada selección de semillas, y solo y exclusivamente con el apoyo de los recursos que les aporta el suelo, el clima y el agua de riego. Pero la realidad es, en la práctica, bastante diferente. Los productos ecológicos en la UE, se pueden tratar con sustancias y principios activos según el Reglamento (UE) 2021/1165 por el que se autorizan determinados productos y sustancias para su uso en la producción ecológica y se establecen sus listas: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2021/1165/oj.

Actualmente, es necesario añadir que algunos compuestos de síntesis desarrollados recientemente se pueden considerar sostenibles por su bajo impacto ambiental, ahorro de energía y sobre todo por a su efectividad; mientras que ciertos compuestos autorizados para la Agricultura Ecológica tienen una efectividad limitada, deben ser aplicados de forma preventiva -a veces en cantidades elevadas- y tienen un efecto medioambiental que puede llegar a ser grave como ocurre con los populares productos cúpricos. Otro ejemplo en esta línea, es el de los productos elaborados con azufre, que tiene efectos deletéreos sobre la microbiota del suelo y cierta fauna, requieren frecuentes tratamientos, y suelen resultar poco eficaces contra muchas enfermedades. Tal brecha entre algunos principios y prácticas de la Agricultura Ecológica, si no son modificados, puede arrojar dudas sobre la contribución real de dicha forma de agricultura a la sostenibilidad agrícola real a corto y medio plazo en la UE y otros países.

B4.1.3. Comparaciones entre agricultura convencional y ecológica

Según la Asociación Empresarial para la Protección de las Plantas (AEPLA) que agrupa a las principales empresas de la industria fitosanitaria en España, en algunos sectores de la sociedad subyace el propósito de generar antagonismo entre la Agricultura Ecológica y aquellas entidades que se dedican a la investigación, desarrollo y comercialización de PP. FF. para la GIP. La mayor parte de las publicaciones en las que se comparan diferentes tipos de agriculturas **enfrentan los resultados de la agricultura convencional y la ecológica, y en cambio se dispone de mucha menos bibliografía que utilice meta-análisis para comparar la GIP y la Agricultura Ecológica.** Esta carencia es relevante para la agricultura española y de toda la UE en la actualidad, porque la agricultura convencional ya no se debería considerar el sistema de referencia a efectos comparativos con la ecológica, sino que la GIP se debería tomar a dichos efectos para evaluar indicadores de eficiencia, medioambientales, sociales y económicos. Existe una importante interacción entre estas dos últimas opciones, la ecológica y la GIP que debería mejorar todo lo posible en beneficio mutuo, ya que ambos tipos de agricultura se retroalimentan mutuamente en la actualidad.

El desarrollo de la GIP a nivel mundial en la mayoría de los países desarrollados y en numerosos cultivos ha contribuido al de la Agricultura Ecológica de distintas formas. Según Deguine y Penvern (2014), dicha contribución concierne particularmente la investigación y desarrollo de nuevos métodos y tecnologías de manejo de plagas, para: (i) aumentar la eficiencia de los plaguicidas mediante nuevos instrumentos de decisión y mejora en precisión de la maquinaria de tratamientos; (ii) reducir los inconvenientes de los métodos de protección de los aplicadores y los riesgos medioambientales; y (iii) proporcionar alternativas para la sustitución de los plaguicidas no autorizados tras la evaluación de sus riesgos. Se puede considerar, siempre según esos autores, que la GIP constituye una etapa esencial en términos de vías de transición entre la agricultura convencional y la ecológica; y a su vez, la Agricultura Ecológica representa: (i) un buen prototipo para la puesta en práctica y evaluación de los principios de la GIP; y (ii) un marco con restricciones específicas que puede servir para catalizar innovaciones tecnológicas para una gestión más sostenible de distintas plagas, enfermedades y malas hierbas.

Las comparaciones entre los parámetros de distintos tipos de agricultura que se han publicado hasta ahora no suelen conducir a conclusiones claras, porque no es fácil disponer de datos de explotaciones de los distintos tipos en la misma zona y con los mismos cultivos, y porque existe una gran variabilidad tanto en la agricultura convencional como en la ecológica. Pero como ya se ha señalado antes, existen limitadas comparaciones entre explotaciones de GIP y ecológica, y en lo que sigue las comparaciones expuestas son las publicadas respecto a la agricultura convencional, que en absoluto las hace representativas de la GIP. Además, es necesario tener en cuenta que para ello se debería disponer de datos de múltiples parcelas, durante varios años, así como considerar distintos parámetros y no solo la productividad como se ha hecho en muchos casos. Por ejemplo, **los resultados de las comparaciones pueden ser muy distintos en cultivos de secano (teniendo en cuenta los años más secos en este caso), o de regadío. Además, están muy relacionados también con la calidad del suelo y el tipo de rotación empleada;** y tampoco se suele tener en cuenta en los estudios el factor humano, el nivel de conocimiento local y sobre todo la experiencia, que tienen un enorme peso en los resultados de la Agricultura Ecológica (McBride y Greene, 2008). Es conveniente señalar, además, que las denominaciones de 'producción integrada,' que incluye la aplicación de GIP o 'mediante GIP', que han sido lanzadas por diversas CC. AA. en España han recibido un escaso reconocimiento en el mercado, tal como se menciona en el capítulo C6. de esta obra.

B4.1.3.1. Reconversión de agricultura convencional en ecológica

Dado el gran número de variables implicadas, los datos de reconversión de la agricultura convencional en Agricultura Ecológica a gran escala también suelen ser contradictorios. Se desconocen meta-análisis comparativos, pero Langley et al. (1982) ya utilizaron un modelo para calcular la manera en que una transformación total de la agricultura en EE. UU. hacia prácticas ecológicas afectaría a distintos aspectos. Dichos autores estimaron las cosechas y costes de producción de siete cultivos en 150 regiones productoras en el país para ambos métodos, y concluyeron que una transformación total permitiría fácilmente a la nación producir productos suficientes para el consumo nacional, pero sería necesario reducir las exportaciones. Asimismo, se estimó que el ingreso neto del sector agrícola norteamericano resultaría superior con la Agricultura Ecológica, debido a los menores gastos de producción y superiores precios de venta de los productos ecológicos, pero dichos precios elevarían también el coste de los alimentos a nivel nacional, y dado el nivel inferior de producción con los métodos ecológicos de la época, se reduciría la reserva productiva de la nación. Los ingresos en efectivo para ambos tipos de agricultura se estimaron similares, pero dado el inferior coste de los insumos de la Agricultura Ecológica y los precios de venta más altos, los retornos netos para el agricultor ecológico serían mayores, al menos en la década de 1980.

B4.1.3.2. Productividad

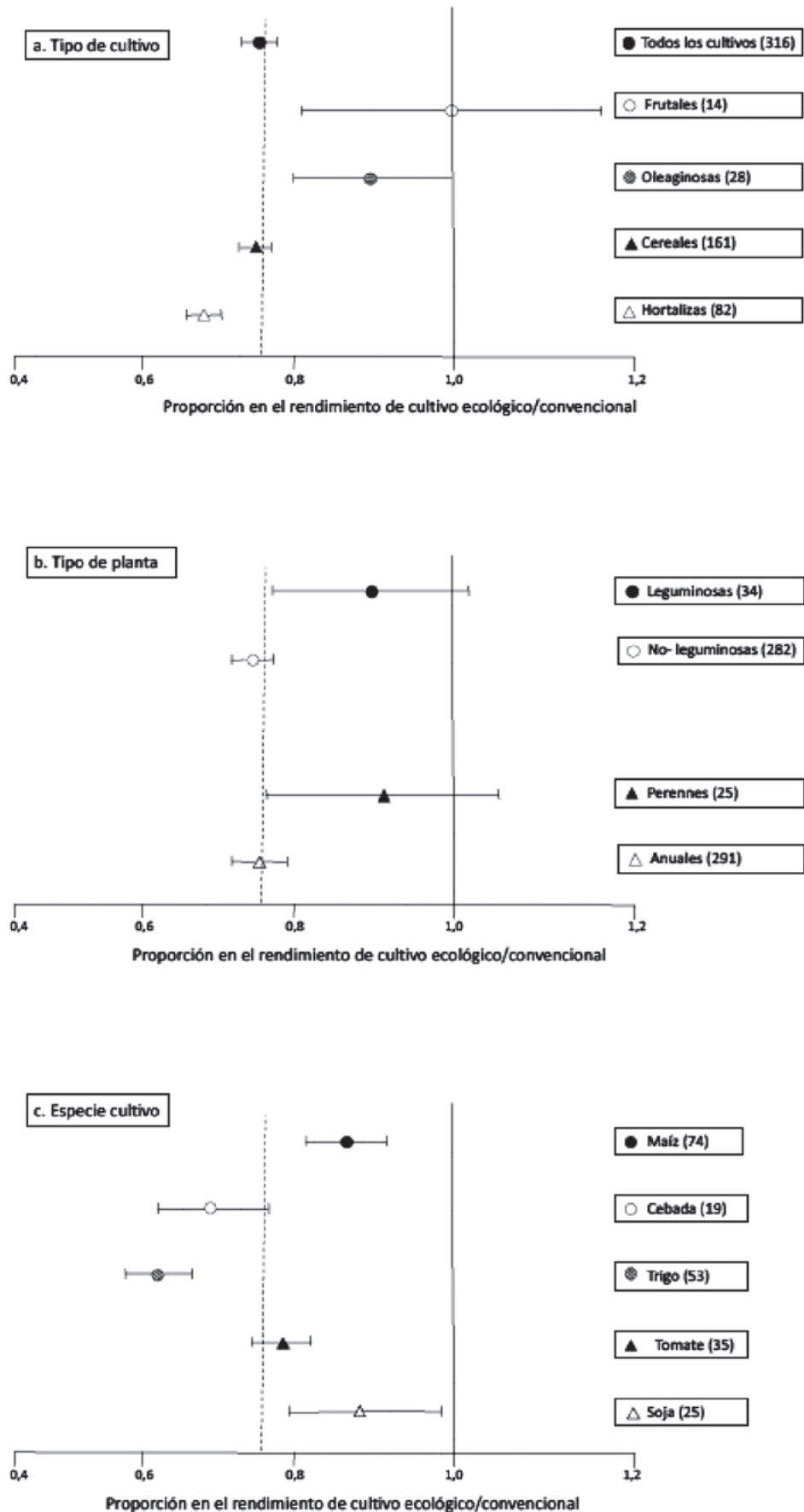
El bajo rendimiento de los cultivos ecológicos es el argumento más usado en contra de este tipo de agricultura. Para evaluar las diferencias en productividad entre la agricultura convencional y la ecológica se han realizado numerosos estudios -en los que ambas no siempre eran comparables- y diversos meta-análisis. En uno de ellos, Deguine y Penvern (2014) estimaron que las cosechas de cultivos ecológicos eran del 5 al 34 % inferiores a las de cultivos convencionales. También, el meta-análisis de Seufert et al. (2012) -uno de los más completos y basado en datos de 66 publicaciones -mostró que, en general, las cosechas ecológicas eran inferiores a las convencionales, como se muestra en la Figura 1 con datos de distintos tipos de cultivos. No obstante, también concluyó que tales diferencias fueron muy dependientes del contexto del cultivo, de sus características y del lugar de producción, y que variaban entre cosechas. El rendimiento de los sistemas ecológicos varió sustancialmente según el cultivo, tipos y especies vegetales (Fig. 1 a-c); por ejemplo, los rendimientos de frutales y oleaginosas mostraron, respectivamente, una reducción del 3 % y 11 % no estadísticamente significativa con respecto a los cultivos convencionales, mientras que los rendimientos de cereales y hortalizas fueron, respectiva y significativamente, 26 % y 33 % más bajos que los cultivos convencionales. Los autores concluyeron que cuando se utilizan las mejores técnicas de manejo del cultivo, los cultivos ecológicos de variadas especies -aunque no de todas-, pueden obtener rendimientos prácticamente similares a los convencionales, mientras que en otros casos la diferencia entre ellos es muy importante, a favor de la agricultura convencional.

B4.1.3.3. Biodiversidad

Otro importante factor en las comparaciones entre la agricultura convencional y la ecológica es la posibilidad de mejora de la biodiversidad, también controvertida y aún más difícil de evaluar. Un estudio mostró que la Agricultura Ecológica aumentaba la riqueza de especies (biodiversidad) y su abundancia, pero dicho efecto era mediado por las características del entorno natural o paisaje (Winqvist et al., 2012). La biodiversidad parece no aumentar significativamente con el cultivo ecológico en casos de entornos muy heterogéneos, y mejora significativamente con el cultivo ecológico si el entorno natural es muy simple y homogéneo, pero solo si aún existe una cantidad mínima de hábitats seminaturales próximos (Gabriel et al., 2013). La disminución de las poblaciones de numerosos insectos y especialmente de los polinizadores que es alarmante, también se ha señalado como un inconveniente de la agricultura convencional, aunque sus causas probablemente son muy variadas y no solo relacionadas con la agricultura. Pero en su revisión

Figura 1. Proporción del rendimiento de producciones ecológicas en comparación con convencionales, en distintos tipos de cultivo, plantas y especies. Entre paréntesis se expresa el número de observaciones para calcular la media (intervalo de confianza 95 %). Traducido del meta-análisis de Seufert et al. (2012).

Figuras a-c: Influencia del tipo de cultivo (a), tipo de planta (b) y especie de cultivo (c) en las proporciones de rendimiento ecológico a convencional. Solo los tipos y especies de cultivos que estaban representados por al menos diez observaciones y dos estudios, se muestran en la figura. La línea punteada indica el tamaño del efecto acumulativo en todas las clases.



global, Kennedy et al. (2013) observaron la mayor abundancia de abejas en los hábitats naturales de mayor calidad ecológica, que podrían ser más equivalentes a las zonas de cultivo ecológico que convencional.

B4.1.3.4. Medioambiente

Respecto al efecto sobre la calidad medioambiental, el indicador del incremento de carbono del suelo es de gran interés en la sostenibilidad en términos de calidad de este, y distintos estudios -algunos de resultados controvertidos- sugieren que el cultivo ecológico incrementa el contenido de carbono durante la rotación, presentando ventajas frente al monocultivo convencional. Las pérdidas de nutrientes del suelo también parecen ser inferiores cuando se usan cubiertas vegetales en la Agricultura Ecológica, pero no en todos los casos, lo cual dificulta la generalización (Shennan et al., 2017). La comparación de las emisiones de los gases de efecto invernadero en los meta-análisis resulta aún más complicada, porque son necesarios estudios con más de 100 muestras comparables de cada tipo, lo que no suele resultar factible en la práctica. No obstante, el meta-análisis de Lee et al. (2015) sugiere que los cultivos ecológicos tienden a ser más eficientes energéticamente y a generar menores emisiones, comparados con los de agricultura convencional. Sin embargo, estos efectos pueden no tener lugar si los productos ecológicos no se comercializan en circuitos de cercanía, - en consecuencia tienen mayor huella de transporte si los productos se importan de países terceros o de zonas alejadas del lugar de consumo-; o incluso pueden tener una elevada huella de producción si se cultivan en invernaderos, que requieren abundante consumo de agua y plástico o cristal y energía y pueden requerir algunos productos que hay que importar o traer desde largas distancias, de manera que su sostenibilidad real puede estar sobreestimada.

B4.1.3.5. Economía

Valorar los resultados económicos basados en macroestudios es primordial en las comparaciones entre Agricultura Ecológica y agricultura convencional, pero los análisis de esta naturaleza son escasos. Según Crowder y Reganold (2015), el análisis financiero comparativo de la Agricultura Ecológica y convencional a partir de trabajos de 40 años -que cubren 55 cultivos cultivados en los cinco continentes-, demuestra que, a pesar de los rendimientos más bajos, la Agricultura Ecológica fue significativamente más rentable que la agricultura convencional y tiene por ello espacio para expandirse a nivel mundial. Una revisión realizada por Shennan et al. (2017) aporta varias evidencias de los beneficios socioeconómicos de la gestión ecológica de los cultivos.

En EE. UU., algunos trabajos basados en datos del Departamento de Agricultura (USDA) sobre los costes y precios de la producción ecológica y la convencional de soja y trigo de un único año en cientos de explotaciones de cada tipo en distintos Estados indicaron: (i) el relevante papel del tamaño de la explotación sobre el resultado económico, ya que el cultivo ecológico fue más rentable en pequeñas explotaciones y menos rentable en grandes explotaciones por la mayor necesidad de mano de obra; (ii) el superior precio general de venta del producto ecológico, pero también los mayores costes de producción relacionados con la necesidad de más laboreo, de eliminación de malas hierbas, y otras prácticas de cultivo; y (iii) una gran dependencia del coste de la mano de obra y del combustible y de la demanda del producto ecológico (McBride y Greene, 2008; McBride et al., 2012). En España, se demostró que la retirada de subvenciones para el cultivo convencional de cítricos causó graves problemas económicos en muchas explotaciones del Levante español, que fueron paliados e incluso resueltos en numerosos casos al reestructurar el sector hacia el cultivo ecológico (Torres et al., 2016).

B4.1.3.6. Salud humana

El gran público asume equivocadamente que natural es sinónimo de sano, siendo que algunos vegetales comestibles naturales pueden contener compuestos tóxicos (ej., alcaloides en el tubérculo de patata

o cianatos en los rizomas de mandioca), y que la confirmación de que un producto fitosanitario (PF) natural utilizado en Agricultura Ecológica no es nocivo para la salud y el medio ambiente requiere una demostración científica que puede ser larga y compleja. La mayor parte de la bibliografía sobre el efecto negativo de los PP. FF. sobre la salud de agricultores y consumidores procede de EE. UU. y la *Environmental Protection Agency* (EPA, Agencia de Protección Ambiental) de dicho país estimó que en este país se diagnosticaron entre 10.000 y 20.000 casos de envenenamiento por PP. FF. anualmente. Pero la situación actual en la UE, donde el uso de PP. FF. está mucho más regulado que en otros países puede ser muy distinta (Smith-Spangler et al., 2012).

Además, las comparaciones entre la salud de los consumidores alimentados con productos de agricultura convencional o de la ecológica son muy complicadas y no ajenas a conflicto de intereses por ambos lados, pero existen datos publicados de algunos estudios. Por ejemplo, hace casi dos décadas se demostró en distintos ensayos que la orina de niños con dieta ecológica poseía menor nivel de organofosforados que la de los alimentados de forma convencional (Curl et al., 2003) y se confirmó que los consumidores de productos ecológicos tenían menos residuos de plaguicidas que los que consumían productos de GIP, y estos menos que los consumidores de productos de agricultura convencional (Baker et al., 2002).

Respecto a la salubridad alimentaria, en el Apartado A1.4., del Capítulo A1., se describen las principales micotoxinas producidas por hongos fitopatógenos causantes de graves micotoxicosis en humanos, así como la peligrosa contaminación de productos vegetales -tanto ecológicos como de agricultura convencional o GIP- con microorganismos patógenos causantes de infecciones, como las bacterias *Salmonella enterica* y *Escherichia coli* de la que se comenta un reciente caso mediático. Pero no se han encontrado datos comparativos sobre la incidencia de las mismas en distintos tipos de agricultura.

B4.1.3.7. Composición y atributos organolépticos

En la revisión de Reeve et al. (2016) se cita que en siete de 14 meta-análisis se concluyó que los productos ecológicos poseían mayor contenido de minerales y vitaminas que los procedentes de agricultura convencional -aunque con pequeñas diferencias-, mientras que en cinco de ellos no se pudieron sacar conclusiones y dos meta-análisis concluyeron que entre los productos de distinto origen no había diferencias significativas en el contenido nutricional. Tampoco parece claramente demostrado que los alimentos ecológicos sean más sabrosos, aunque por tratarse en muchos casos de cultivares tradicionales y comercializados en proximidad, las características gustativas pueden ser objetivamente mejores y más agradables para un consumidor que añora y recuerda "sabores de antes".

Finalmente, en la limitada comparación aquí realizada, es conveniente señalar también que la capacidad de los sistemas agrícolas para sobrevivir a estreses de tipo biofísico y socio-económicos es crucial para su sostenibilidad, especialmente en el contexto del cambio climático. Y que esta resiliencia parece más bien asociada con determinadas prácticas de los cultivos ecológicos, que con los convencionales o de GIP.

Como síntesis de lo expuesto en los últimos apartados, podemos fijarnos en la Figura 2 en donde se resumen, en base a datos de estudios científicos, las comparaciones entre Agricultura Ecológica y convencional respecto a distintos parámetros de sostenibilidad (tomada de Shennan et al., 2017).

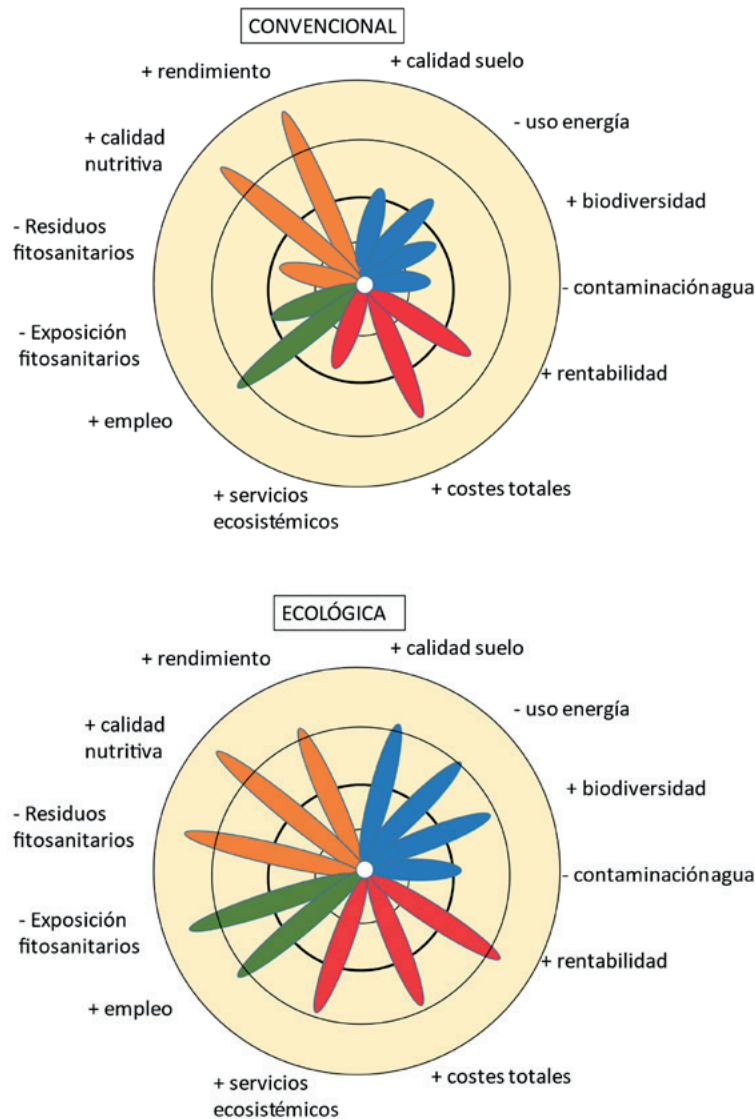


Figura 2. Evaluación del grado de satisfacción de los objetivos de sostenibilidad en la Agricultura Ecológica en comparación con la convencional. Los círculos representan el grado de consecución de los objetivos (de fuera a dentro 100 %, 75 %, 50 % y 25 %). Los pétalos naranja se refieren a la producción, los azules a la sostenibilidad ambiental, los rojos a la economía y los verdes al bienestar (Traducido de Shennan et al., 2017).

Finalmente, es conveniente no confundir la Agricultura Ecológica, que tiene unas normas legisladas en la UE y en otros países, con la Agroecológica que plantea un nuevo paradigma para el desarrollo de la agricultura, que no solo se basa en los elementos de la ecología moderna, sino también en la etnociencia, o sea, en el conocimiento de los propios agricultores. Por lo tanto, es una combinación de saberes tradicionales que resulta en una serie de principios, que se transforman en formas tecnológicas que finalmente nacen de lo que se denomina "investigación participativa" (Altieri, 1990; 1995; Farrell y Altieri, 1999). La Agroecología propone un modelo de desarrollo alternativo, que atiende también la equidad social, la seguridad alimentaria, la superación de la pobreza, etc. Realmente es una propuesta política con base científica, que se erige sobre tres pilares: (i) ecológico-productivo; (ii) socioeconómico; y (iii) sociopolítico. Debido a las limitaciones de su base científica en relación con la Sanidad Vegetal, no se trata de ella en el resto de este texto.

En resumen, se observa que la agricultura convencional -convertida en una verdadera agroindustria- se encuentra en el extremo opuesto al de la agroecología, y en medio, pero mucho más cerca de esta última, se encuentra la Agricultura Ecológica. Deguine y Pervern (2014), en su revisión sobre agricultura biológica, agroecológica y convencional, realizaron un análisis basado en el número de publicaciones científicas con revisores por pares sobre Agricultura Ecológica, Agroecología y GIP en el período de 1975

a 2012. La GIP era muy superior en el número de publicaciones desde 1975, seguida de la Agricultura Ecológica -sobre la que se comenzó a publicar científicamente en 1992- y en tercer lugar y a mucha distancia figuraba la Agroecología, con publicaciones a partir de 1990.

B4.2. ¿Es posible cultivar en la Unión Europea sin Productos Fitosanitarios?

La seguridad de la provisión y salubridad alimentarias para una población creciente es el gran reto que afronta la agricultura para las próximas décadas. Numerosos autores han indicado la necesidad de cambios de gran calado en la producción global de alimentos y para ello la agricultura debe lograr dos objetivos principales: (i) alimentar a una población creciente, con una previsión de más de 9.000 millones de personas hacia el año 2050 y (ii) minimizar el impacto medioambiental que pueda derivarse del incremento de producción de alimentos a nivel global. Ello no solamente se refiere al uso de PP. FF. más eficientes y bioplaguicidas de menor impacto ambiental, sino que debe ir unido a otras medidas de manejo de los cultivos, como muchas de las practicadas en la Agricultura Ecológica, todo lo cual redundará en beneficio de los agricultores manteniendo sus ganancias, de los consumidores, del medio ambiente y de la sociedad y economía de cada país.

En este contexto, la utilización de PP. FF. es objeto de un gran debate en los países desarrollados y muy especialmente en los de la UE, en el que participan activamente todos los miembros de la cadena alimentaria y la sociedad en general desde las últimas décadas. Dicho debate se centra en el impacto negativo de los PP. FF. en la salud humana y la biodiversidad, centrado principalmente en los plaguicidas de síntesis, pero que también debería incluir a algunos bioplaguicidas. Como se indica en el Capítulo B3., los PP. FF. constituyen actualmente uno de los medios de más fácil aplicación y mayor efectividad para el control de un elevado número de plagas, enfermedades y malas hierbas y también allí se comentan ciertos efectos negativos de algunos de ellos.

En 2021, el Panel *Science and Technology Options Assessment (STOA)* del Parlamento Europeo encargó a científicos de la Universidad KU de Lovaina (Bélgica) un informe sobre la utilización de PP. FF. en la UE, titulado *Farming without plant protection products* (Agricultura sin productos fitosanitarios). Este informe recoge estudios que sugieren que sin utilizar PP. FF., las pérdidas de cosecha en trigo serían del 19 % y del 42 % en patata, entre otros ejemplos. Las diferencias entre pérdidas en cultivos tratados y no tratados serían máximas en regiones con agricultura muy desarrollada y con elevadas producciones. Se afirma que reducir el uso de plaguicidas sin reducir la producción podría ser posible en cultivos y áreas con alto uso de tratamientos de distintos tipos, pero no en los de menor número de tratamientos con productos de síntesis. El informe STOA (2021) también considera que el impacto de los PP. FF. sobre la biodiversidad no está bien estudiado, y que el efecto más importante sobre la pérdida de biodiversidad es el cambio de uso de la tierra, como ocurre tras la deforestación. Además, dicho informe **concluye que es necesario aumentar la eficiencia de los cultivos y obtener mejores cosechas para garantizar la provisión global de alimentos** y que, posiblemente, **la seguridad alimentaria a finales del siglo XXI estaría seriamente amenazada sin disponibilidad de PP. FF.** Eso implica evidentemente que para asegurar dicha provisión sin el uso de PP. FF. de síntesis hay que mejorar los rendimientos con resultados de investigación dirigida a disminuir las pérdidas debidas a plagas, enfermedades y malas hierbas mediante estrategias alternativas de control que sean eficientes. Indica también dicho informe que **la Agricultura Ecológica, tal como la entendemos hoy, no parece la mejor opción para conseguir alimentar a la población global en las próximas décadas**, y que el aumento en biodiversidad que sugieren varios meta-análisis sería marginal. Además, se indica en el mismo que a nivel global habría un drástico descenso de la biodiversidad porque la menor productividad de la Agricultura Ecológica frente a la convencional redundaría en la necesidad de mayor superficie cultivada.

Esto implicaría mayor deforestación y menor biodiversidad, más emisiones de gases de efecto invernadero y mayores efectos en el medio ambiente. Y se añade que otros parámetros medioambientales, como el aumento de la eutrofización y la acidificación también supondrían más impactos negativos que los de la agricultura convencional, a pesar de las ventajas de la limitación en el uso de plaguicidas. Pero resulta sorprendente la contradicción entre estas conclusiones del informe del Panel STOA y el importante apoyo político y económico de la CE de la UE a la Agricultura Ecológica que se resume a continuación.

B4.3. La Agricultura Ecológica en la Unión Europea

La UE desempeña un importante papel en el comercio de productos alimentarios, particularmente en los de alta calidad, y ocupa el primer puesto en el comercio de productos agrarios a escala global. En 2004, la CE adoptó su primer Plan de Actuación sobre la alimentación y la Agricultura Ecológica con el fin de promover y reforzar este sector. Tres años más tarde se revisó la normativa en esta materia y se adoptó un nuevo Reglamento sobre la producción ecológica y el etiquetado de los productos ecológicos. Además, se llevó a cabo un proceso de consulta pública y 45.000 ciudadanos europeos participaron en la consulta. En 2014 se publicó el primer Plan de Acción para el futuro de la producción ecológica de la UE (Comisión Europea, 2014), y recientemente la Comisión Europea (CE) ha aprobado el Plan de Acción para la Agricultura Ecológica para el período 2021-2027, cuyo objetivo principal es equilibrar los aumentos necesarios a nivel productivo con un crecimiento constante y sostenido de la demanda de productos ecológicos (FAO, 2021).

El referido Plan nace con la ambición de contribuir al crecimiento del sector de producción agrícola ecológica y al objetivo de llegar a que uno de cada cuatro alimentos producidos en la UE en 2030 sea de producción ecológica. Para conseguirlo, las dotaciones presupuestarias fijadas y las medidas previstas están a la altura de los objetivos. La producción ecológica se reconoce como una herramienta política para transformar la realidad de la agricultura y el consumo alimentario en la UE, con la mirada puesta en cumplir con los objetivos fijados en las Estrategias “Biodiversidad” y “De la Granja a la Mesa”. La UE en 2020 se marcó como principal objetivo del Pacto Verde Europeo alcanzar que el 25 % del total de la superficie agraria europea fuera ecológica en 2030. Para lograrlo, España y el resto de los Estados miembros de la UE dispondrán de los medios previstos en los Planes de Acción, que cada Estado debe desarrollar mediante una estrategia nacional con acciones relacionadas, plazos claros y objetivos nacionales. El Plan de Acción para la Agricultura Ecológica se divide en tres ejes interrelacionados que reflejan la estructura de la cadena de suministro alimentario y los objetivos de sostenibilidad del Pacto Verde; Eje 1: estimular la demanda de productos ecológicos y garantizar la confianza de los consumidores; Eje 2: estimular la conversión hacia la Agricultura Ecológica y reforzar toda la cadena de valor; y Eje 3: mejorar la contribución de la Agricultura Ecológica a la sostenibilidad medioambiental. Para conseguirlo, la Política Agraria Común (PAC) se movilizará en España y los demás países para apoyar la aplicación del Plan de Acción, y las ayudas financieras permitirán equilibrar el proceso durante los 2 o 3 años que dure la conversión, cuando los gastos aumentarán y la producción disminuirá muy probablemente.

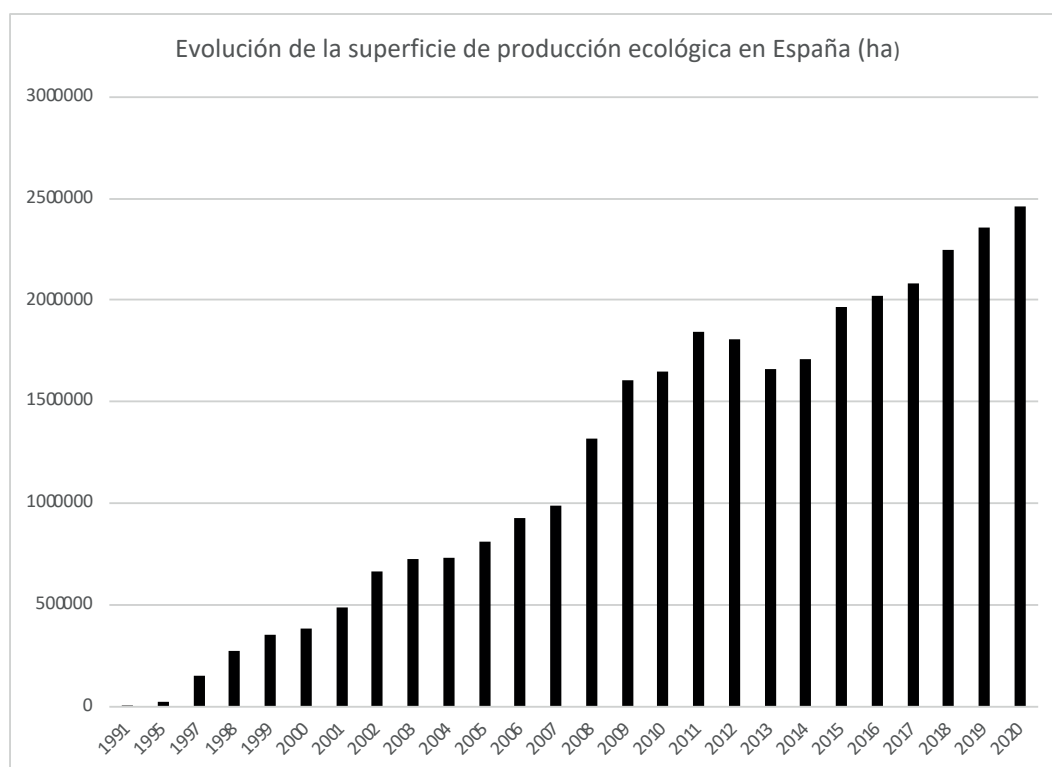
B4.4. Importancia de la Agricultura Ecológica en España

La superficie de producción ecológica de España en 2020 que era de 2.437.891 ha, se encontraba muy cerca de la de Francia (2.548.677 ha) en el ranking europeo y a ambas les seguía Italia. La superficie española registrada oficialmente para este tipo de agricultura ocupaba en 2020 el 10 % de la superficie agraria española, con un incremento del 3,5 % respecto del año anterior y el incremento anual medio de dicha superficie fue del 7,5 % en los últimos 5 años (Figura 3). Andalucía, con más de un millón de ha,

Castilla-La Mancha casi medio millón ha, y Cataluña con más de un cuarto de millón de ha, concentran tres cuartas partes de la superficie total de Agricultura Ecológica en España. Los principales cultivos ecológicos por orden decreciente de extensión son olivo, cereales para producción de grano, frutos secos, y vid. Con estos datos, España es el cuarto productor de productos vegetales ecológicos del mundo por detrás de Australia, Argentina y Francia, y si sigue en esa línea en 2030 podría cumplir el objetivo fijado en el Pacto Verde europeo de destinar un 25 % de la superficie de cultivo agrícola a la producción ecológica.

La distribución de superficie agrícola ecológica por sectores y producciones muestra, no obstante, que su extensión es mayor en los sectores donde es más sencillo realizar el cambio de sistema productivo de convencional o con GIP a ecológico. Por ejemplo, la mitad de los 2,5 millones de ha se destina a pastos permanentes, una cuarta parte a cultivos de suelo arable -como tubérculos o legumbres- y la otra cuarta parte a cultivos permanentes -como frutos secos, olivar y vid-. El cultivo ecológico de frutas y hortalizas está aumentando en los últimos años, pero aún representa cifras menores en comparación con el resto de cultivos.

Figura 3. Superficie cultivada (nº ha) cultivadas con normas de producción ecológica en España (1999-2020). <https://www.agroecologia.net/estadisticas-produccion-ecologica-espana-2020/>



El MAPA, a través de la Dirección General de la Industria Alimentaria, es el organismo competente para el desarrollo de las líneas directrices en materia de producción ecológica en el marco de la legislación nacional y de la UE, y coordina el Programa Nacional de control oficial de la producción ecológica, mientras que las CC. AA. son competentes en la producción ecológica y responsables de la organización y supervisión del control oficial, dentro de su ámbito territorial.

Aunque la producción ecológica en España parece gozar de buena salud y crece a buen ritmo, se enfrenta a retos importantes como son el todavía bajo consumo interno de productos de este tipo y la huella de

la exportación, que comprende cerca del 63 % de la producción ecológica. **Una agricultura como la española si quiere contribuir a mitigar los efectos del cambio climático, podría ser una Agricultura Ecológica local y de temporada. Hay mucho margen de mejora** porque, si bien el mercado español de producción agrícola ecológica supera los 2.500 millones de € anuales, es alrededor de cinco veces inferior al alemán o al francés, y tiene un gasto medio anual por persona de solo 50,2 €, muy por debajo del de países como Dinamarca o Suiza, que superan los 300 €, aunque cuentan con mayor PIB por habitante. La creciente demanda por parte del consumidor de productos ecológicos en España también ha hecho aumentar el número de operadores en la Agricultura Ecológica, que en total comprende más 47.000 con un crecimiento que se experimenta en todas las categorías, i.e., productores primarios (+5,9 %), establecimientos industriales (+13 %) y comercializadores (+24,8 %), entre los que destacan los minoristas, con una subida del 37 %.

Algunos obstáculos señalados para la extensión de las áreas dedicadas a la Agricultura Ecológica (basados en los citados por Youngberg et al., 1980) al comienzo de su implantación en una nueva explotación siguen siendo válidos en muchos países, especialmente en España. Entre ellos, respecto a los problemas técnicos, destacan: (i) el deficiente contenido de fósforo (P) y potasio (K) en muchos suelos; (ii) la limitada disponibilidad de fuentes orgánicas de nutrientes vegetales; (iii) las restricciones a la fijación simbiótica de nitrógeno (N); (iv) las fuentes de nutrientes de baja solubilidad; (v) la limitación de rendimientos; (vi) la baja rentabilidad de algunos cultivos en los sistemas de rotación; (vii) las pérdidas económicas durante la transición de la agricultura convencional a la ecológica; (viii) la mayor frecuencia de malas hierbas, plagas o enfermedades en algunos casos; (ix) la falta de información técnica sobre el cultivo ecológico y las prácticas para la Sanidad Vegetal de ciertas especies; y (x) la carencia de una gama de cultivares resistentes a plagas y enfermedades y adaptables a este tipo de agricultura que permitan la elección del más conveniente.

Además, como problemas económicos y estructurales de la Agricultura Ecológica en España, se pueden señalar: (i) los mayores costes de mano de obra; (ii) la falta de crédito y financiación; (iii) la limitada demanda de los alimentos ecológicos debido a su mayor precio; (iv) la carencia de una comercialización organizada para algunos productos; (v) los mayores costes de transporte por la dispersión geográfica de los productores; (vi) la falta de comunicación y de comprensión por el público español de las características de los productos ecológicos; (vii) los insuficientes conocimientos generales sobre los beneficios medioambientales de este tipo de agricultura; (viii) la ambigüedad en algunos conceptos de la Agricultura Ecológica, etc.

Por otra parte, se ha señalado que un 16 % de la población española en zonas rurales está cuidando del territorio del 85 % del país, que es clave para hacer frente a la crisis medioambiental. **Una de las consecuencias de la despoblación que sufren los municipios rurales españoles, especialmente numerosos en Aragón y Castilla y León entre otras CC. AA., es la pérdida de actividades agrícolas, ganaderas, y forestales tradicionales.** Estas suponían una forma sostenible de contribuir activamente a mitigar el cambio climático, cuya contribución a la pérdida de biodiversidad por el abandono puede ser contrarrestada si se promueve la reforestación. Además, el abandono del pastoreo tradicional o la trashumancia, hace que los montes sean mucho más vulnerables a los incendios, cada vez más intensos y difíciles de sofocar. En este medio rural es necesario aplicar prácticas sostenibles, pero existe carencia de información sobre las posibilidades de ciertos cultivos ecológicos y la gestión de la Sanidad Vegetal para cada uno de ellos. **Se podría ensayar el cultivo ecológico de ciertas especies en las zonas más áridas** basándose en tres principios: (i) en las zonas con baja pluviometría, la restricción en el uso de fertilizantes no implicaría pérdidas importantes de rendimiento; (ii) tradicionalmente, las técnicas de cultivo en estas zonas son muy similares a lo que se considera como cultivo ecológico; y (iii) son zonas de escasa rentabilidad económica, que se podría incrementar si se dedican a producción ecológica de calidad con precios

más elevados en el mercado (Armesto et al., 2005). Además, hay propuestas (Navarro y García Azcárate, 2019) de elaborar un plan estratégico para los secanos áridos del interior peninsular para dedicarlos sobre todo a cereales y leguminosas, incluyendo la investigación en cultivares apropiados, manejo del suelo, mejora de su gestión integrada, etc. y búsqueda de mecanismos que hagan viable esta actividad. Otra posibilidad es la agroforestería, sistema que se adapta particularmente a las zonas marginales de monte y a los sistemas de bajos insumos, como pueden darse en muchas zonas rurales de España. Es un sistema de uso de la tierra muy antiguo en el que se combinan cultivos forestales arbolados (que abarcan frutales y otros cultivos leñosos) con cultivos herbáceos o arables y/o animales de manera simultánea o secuencial sobre la misma unidad de suelo, aplicando además prácticas de manejo compatibles con las prácticas tradicionales de la población local. Su implementación requeriría también transferencia de prácticas sostenibles de Sanidad Vegetal y Animal de bajo coste económico adaptadas a las necesidades locales; de hecho, una buena parte de los objetivos y resultados de la investigación actual sobre Sanidad Vegetal –y también sobre otros ámbitos– contribuyen a la mejora de los resultados de la Agricultura Ecológica al introducir técnicas que mejoran la eficiencia de los insumos empleados y permiten su disminución sin merma de rendimiento o incluso aumentándolo.

La CE de la UE se propone seguir ofreciendo apoyo financiero a los productos ecológicos mediante compromisos de desarrollo rural, con un flujo adicional de financiación disponible a través de regímenes ecológicos, especialmente en los primeros años de la conversión desde la agricultura convencional. El apoyo de la PAC también incluirá asistencia técnica e intercambio de mejores prácticas e innovaciones en materia de producción ecológica. Se reforzarán los servicios de asesoramiento a las explotaciones agrícolas, en particular como parte de los Sistemas de Conocimiento e Innovación Agrícola (*Agricultural Knowledge and Innovation Systems, AKIS*) que representa el intercambio de conocimiento agrario y la transmisión de conocimientos entre personas, organizaciones e instituciones que producen dicho conocimiento y las que han de utilizarlo en la agricultura y los ámbitos relacionados (eip-agri_brochure_knowledge_systems_2018_en_web.pdf).

B4.5. Oportunidades para la Sanidad Vegetal en los agroecosistemas de Agricultura Ecológica

Los problemas que se señalan a continuación constituyen algunas de las oportunidades de mejora de la gestión de la protección de los cultivos herbáceos y leñosos en el contexto de la Agricultura Ecológica.

B4.5.1. Consideraciones sobre lagunas actuales de la Sanidad Vegetal en la Agricultura Ecológica.

Las explotaciones que practican cultivo ecológico en España comprenden una gran diversidad de situaciones que hacen difícil poder generalizar el papel de la Sanidad Vegetal en dicha agricultura en nuestro país. No es comparable el manejo ecológico de cultivos anuales en secano o regadío, el de cultivos en invernadero, o el de plantas perennes; pero todos **comparten un tema clave y básico con el cultivo convencional y con la GIP: la sanidad del material de propagación**, i.e., semillas, bulbos, tubérculos, esquejes, estaquillas, patrones, plantas injertadas etc. La utilización de cultivares antiguos o tradicionales promovida por la Agricultura Ecológica hace cuestionable la sanidad del material base y del derivado de su propagación. Además, las semillas infectadas son fuente de inóculo de primer orden para muchas virosis, bacteriosis y micosis, y un número importante de virus fitopatógenos se transmiten eficientemente mediante material de propagación asexual. La elevada tasa de multiplicación de bacterias, hongos y oomicetos, y su eficiente diseminación por el aire o las salpicaduras de lluvia y riego, y de virus por ácaros e insectos vectores, propician el desarrollo explosivo de epidemias en

condiciones ambientales favorables, cuyo manejo eficaz con el único uso de Cu o S, o compuestos naturales, actualmente es difícilmente concebible en muchos casos. Por ello, para la producción ecológica sería necesario disponer, por un lado, de material de base libre de organismos nocivos y por otro, de un sistema de propagación del mismo que garantice la sanidad del disponible para siembra o plantación. Y para resolver esta problemática **no parece la mejor solución a medio y largo plazo permitir a los operadores autorizados comercializar material de reproducción vegetal genéticamente heterogéneo, y además eximir el cumplimiento de los requisitos de registro y categorías de certificación, ni tampoco los requisitos que figuran en las Directivas UE, que es lo que se indica en el reglamento de la UE 2018/848. Sería, en cambio, deseable que se diseñara un sistema español oficial para asegurar la provisión de material vegetal para su uso en cultivo ecológico libre de insectos y ácaros fitófagos, virus, bacterias, hongos y oomicetos de riesgo de los cultivares de mayor interés en este tipo de agricultura. Este podría servir en cada zona como material de base para los principales cultivos ecológicos con problemas sanitarios.**

El grado de intensificación de las prácticas de protección de cultivos en Agricultura Ecológica es también variable y hay prácticas que son comunes con las de GIP y que varían desde niveles mínimos a relativamente altos, según zonas y cultivos. Simplificando un tema complejo, se suele usar una estrategia preventiva sustituyendo los productos de síntesis por compuestos naturales, de los cuales no todos son de efectividad científicamente demostrada, con el resultado frecuente de más tratamientos que en las explotaciones convencionales, o bien combinar la aplicación de métodos culturales y medios biológicos y mecánicos, con el resultado de menor necesidad de tratamientos y mayor diversidad de enemigos naturales. Pero también es posible encontrar opciones intermedias.

Respecto a los productos utilizables, como se ha dicho, las sustancias activas deben ser de origen natural, aunque excepcionalmente pueden ser producidas sintéticamente -solo si son idénticas a los compuestos naturales-, como en el caso de las feromonas sintéticas. **Sin embargo, la actual lista de productos registrados -que es variable entre los distintos Estados miembros de la UE y difiere bastante entre estos y los de otros continentes- se discute a nivel de la UE para distintos cultivos, pero se presta a discutir la lógica científica que subyace en la autorización de determinadas sustancias activas y no de otras. Además, la carencia de datos fiables sobre las propiedades y el impacto ambiental a medio y largo plazo en distintas zonas, de determinados productos naturales autorizados (Biondi et al., 2012) debería ser abordada en profundidad, pero la presión de empresas y asociaciones de cultivadores ecológicos lo dificulta.**

En la UE se decidió además establecer un grupo de sustancias denominadas básicas, limitado a sustancias de origen natural que son productos como el vinagre, cuyo uso principal no es como fitosanitario, pero que pueden tener cierto interés práctico en la protección de plantas en algunos casos y cuyo interés económico en dicho campo es limitado. Deben satisfacer los requisitos de ser productos alimenticios, de ahí que el vinagre, el bicarbonato, aceite de girasol, sacarosa y otros sean sustancias básicas.

Además: se entenderá por «sustancia básica» aquella sustancia activa que: (i) no es una sustancia con un perfil químico preocupante; (ii) no tiene la capacidad intrínseca de producir alteraciones endocrinas o efectos neurotóxicos o inmunotóxicos; (iii) no se utiliza principalmente para fines fitosanitarios, pero resulta útil para fines fitosanitarios, bien directamente o en un producto formado por la sustancia y un simple diluyente; y (iv) no se comercializaba anteriormente como producto fitosanitario. Si no demuestran todo ello, la sustancia no se puede registrar en esta categoría, así que no todos los extractos de plantas pueden catalogarse como sustancias básicas. **En la práctica constituye un posible camino más rápido para la aprobación por la UE de nuevas sustancias para que su coste de registro no resulte prohibitivo para las pequeñas compañías de productos fitosanitarios ecológicos o las asociaciones de productores (Marchand, 2015).**

B4.5.2. Manejo de enfermedades en la Agricultura Ecológica

A diferencia de la agricultura convencional, para la que las pérdidas globales de cosecha ocasionadas por enfermedades –junto con plagas y malas hierbas- se han estimado en determinados grupos de cultivos y periodos de tiempo (cf., Capítulo 1A.), la información reciente publicada sobre las pérdidas concretas en Agricultura Ecológica debidas a enfermedades causadas por bacterias, hongos y oomicetos, nematodos o virus y viroides es escasa; algunos autores restan importancia a estas pérdidas frente a las debidas a malas hierbas o a artrópodos fitófagos (Letourneau y van Bruggen, 2006), y otros no las consideran factores limitantes en cultivos ecológicos.

Probablemente, estas consideraciones obedecen a infraestimaciones, pero ante la falta de evaluaciones específicas, no hay argumentos científicos para considerar que actualmente los factores que propician la emergencia y reemergencias de enfermedades y la consiguiente producción de pérdidas en la agricultura convencional o en GIP (cf., Capítulo A2.) –como por ejemplo las introducciones de patógenos exóticos (cf., Capítulo B1)- no puedan afectar en la misma forma a la Agricultura Ecológica. Un reciente ejemplo de ello es la devastación que ha originado la introducción de la estirpe ST53 de *Xylella fastidiosa* subsp. pauca en los olivares de la región de Apulia en el sur de Italia, ya que los daños en las plantaciones con manejo ecológico han sido similares a los observados en los de cultivo convencional, desde 2013 hasta 2019 (Verraro, 2019).

La naturaleza y fenomenología de las enfermedades que subyacen en la Agricultura Ecológica no son diferentes de las propias de la agricultura convencional, y por lo tanto la protección del rendimiento en aquella se asienta sobre los mismos principios y ciertas estrategias de control que también se deben usar en la agricultura convencional. Sin embargo, los medios y métodos empleados para la aplicación de dichas estrategias están supeditados a las características que definen la razón de ser de la Agricultura Ecológica, incluyendo: (i) el mantenimiento de la diversidad biológica; (ii) el manejo de suelo y cultivos; y (iii) las limitaciones en el uso de material vegetal de siembra o plantación y de productos de fertilización y fitosanitarios.

Como en la agricultura convencional, las acciones de control de las enfermedades en la Agricultura Ecológica deben ser dirigidas básicamente a: (i) reducir el inóculo existente en el lugar de producción; (ii) excluir la introducción del inóculo patogénico en los cultivos; y (iii) reducir la eficiencia del inóculo remanente o del diseminado desde cultivos vecinos. Dichas acciones conciernen a: (i) la sanidad del suelo y de las semillas y material propagativo asexual; (ii) el manejo del suelo y del medio ambiente a través de las prácticas culturales; (iii) la disponibilidad de resistencia contra los patógenos genéticamente determinada en los cultivares utilizados; y finalmente (iv) la protección del cultivo mediante la aplicación de PP. FF. y bioplaguicidas autorizados en cultivo ecológico. Dichas acciones tienen todas carácter preventivo y son de aplicación antes del establecimiento del cultivo, salvo los tratamientos fitosanitarios que se realizan sobre cultivos ya establecidos (Labrador y Porcuna 2010, Porcuna et al., 2010).

Van Bruggen et al. (2016) seleccionaron las acciones específicas que suelen ser clave para el control y la gestión de plagas (*sensu amplio*) en la Agricultura Ecológica, y en su trabajo denominan como “curativas” a las acciones que comprenden tratamientos fitosanitarios o con agentes de control biológico en cultivos establecidos. Esta denominación no es acertada, porque los productos autorizados y aplicados no tienen naturaleza sistémica y no eliminan las infecciones establecidas. En la Tabla 1, modificada a partir de su trabajo, se resumen varias medidas fitosanitarias utilizadas para la prevención de organismos nocivos, para la disminución de su población y ciertos tratamientos aconsejados tras la infección.

Tipo de control	
1. Prevención	Práctica cultural aplicada
Saneamiento	Material vegetal libre de plagas; destrucción de residuos; tratamiento con calor seco o húmedo; solarización o bio-solarización
Asincronía temporal	Plantación temprana o tardía; modificar la fecha de cosecha en función de la previsión de llegada de patógenos o vectores
Condiciones no favorables	Rotación de cultivos; cultivares repelentes; aumento de la supresividad del suelo con enmiendas orgánicas; biocarbón; carbonato cálcico; cal dolomítica; yeso
Barrera química preventiva	Tratamientos foliares con insecticidas, acaricidas, fungicidas, bactericidas o nematocidas sintéticos autorizados, o con PP. FF. basados en extractos vegetales y derivados del petróleo
Aislamiento espacial	Cultivos a distancia de la plaga o patógeno, malas hierbas y otros huéspedes eliminados; barreras o franjas de cultivos no sensibles
Prevenir aterrizaje de vectores	Trampas de vectores; mantas reflectantes; aceites minerales de uso hortícola
2. Disminución de la población	
Resistencia del huésped	Resistencia genética clásica; espaciamiento de cultivos; calidad de planta subóptima (bajo abonado)
Cultivo intercalado	Cultivos mixtos o en franjas; abonos verdes
Competencia o antagonismo	Aumento de la actividad microbiana y la biodiversidad para reducir la población de la plaga o patógeno (enmiendas orgánicas, quitina, extractos de plantas, composts, humatos, bioplaguicidas para tratamientos de semillas o plantas)
Ambiente no favorable	Laboreo; ventilación; control de humedad y temperatura
3. Tratamientos tras la infección	
Productos fitosanitarios sintéticos	Insecticidas y fungicidas sistémicos y de contacto autorizados; piretroides sintéticos
Compuestos orgánicos	Jabones, aceites, composts, ácido acético
Compuestos inorgánicos	Compuestos a base de S y Cu, tierra de diatomeas, micronutrientes (Si o Zn); fosfito potásico; bicarbonato sódico y potásico; silicato potásico
Extractos vegetales	Aceites vegetales; extractos de plantas (nicotina, neem, yuca)
Control biológico inundativo	Depredadores y parasitoides; bacterias (ej., <i>Bacillus thuringiensis</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>Pseudomonas</i> spp.), hongos (ej., <i>Trichoderma</i> spp.)
Eliminación física	Trampeo, aspiración, recolección

Tabla 1. Resumen de las principales prácticas de manejo de plagas y enfermedades en cultivo ecológico. (Modificado de van Bruggen et al., 2016)

B4.5.2.1. Acciones para reducir el inóculo del patógeno en el lugar de producción

La mejora de productividad propiciada por la fertilización orgánica en la Agricultura Ecológica puede ser comprometida por el inóculo de algunas bacterias y una amplia variedad de hongos, oomicetos y nematodos fitopatógenos, que residen en el suelo o sobreviven en restos de cultivos anteriores o en plantas perennes y cuya población debe ser eliminada o reducida hasta niveles inferiores al umbral determinado para cada enfermedad. Dicha reducción se puede efectuar en la Agricultura Ecológica mediante: (i) la desinfección directa del suelo; y (ii) prácticas culturales que incidan sobre el inóculo.

B4.5.2.1.1. Métodos de desinfestación del suelo en la Agricultura Ecológica

Esta acción se puede llevar a cabo mediante solarización, bio-solarización (o bio-fumigación) y desinfestación biológica (o anaeróbica), entre otros procedimientos, pero no por el uso de productos químicos fumigantes generales o específicos, que no están autorizados en la UE ni en la mayoría de los países desarrollados (ej., bromuro de metilo, cloropicrina, isotiocianato de metilo, 1,3-dicloropropeno (1,3-D), disulfuro de carbono, etc.). Otros métodos plausibles, como el tratamiento con vapor de agua o la inundación del suelo, están desaconsejados porque crean un vacío biológico que es contrario a la diversidad microbiana objetivo de la Agricultura Ecológica.

La solarización es un proceso hidro-térmico que se desarrolla -en términos generales- cubriendo el suelo humectado con una lámina de polietileno de grosor $\leq 50 \mu\text{m}$ y transparente a la radiación solar incidente, pero impermeable a la radiación reflejada, durante 4-6 semanas. Dicho proceso incrementa hasta 45-50 °C la temperatura diurna en el perfil 0-30 cm del suelo humectado, lo cual junto con la elevada humedad generada mata o debilita a los propágulos de muchos patógenos residentes en el suelo según su termo-sensibilidad, pero no compromete la supervivencia de la microbiota beneficiosa y evita que se produzca el ya citado vacío biológico. La eficiencia de la solarización en la desinfestación del suelo es mediada por la disponibilidad de radiación solar suficientemente intensa y duradera para elevar la temperatura del suelo, por lo cual su aplicación se circunscribe a zonas cálidas. Sin embargo, la limitación de uso por ambientes subóptimos puede ser mitigada mediante bio-solarización, en la que antes de solarizar se incorporan al suelo enmiendas orgánicas cuya descomposición genera compuestos volátiles tóxicos, como: (i) productos con alto contenido de N (ej., harina de carne, hueso, pescado, sangre, soja, etc.) que generan amoníaco (NH_3) y ácido nitroso (HNO_2) altamente tóxicos para diversos patógenos residentes en el suelo; (ii) estiércoles y purines de ganado porcino o vacuno que generan diversos ácidos grasos volátiles (ej., acético, butírico, caproico, etc.) cuyas formas ácidas no ionizadas también son muy tóxicas para aquellos; o (iii) restos en verde triturados y enterrados de cultivos de crucíferas o de plantas cianogénicas (ej., loto corniculado y sorgo) que generan, respectivamente, isotiocianatos o ácido cianhídrico (HCN) por la hidrólisis de glucosinolatos o glicósidos cianogénicos.

El enterrado de enmiendas orgánicas vegetales también es efectivo en la desinfestación del suelo, si este se confina herméticamente con plástico negro o traslúcido que propicie el desarrollo de anaerobiosis junto con la producción de compuestos tóxicos volátiles (ej., alcoholes, aldehídos, ácidos grasos, etc.), dependiendo de la naturaleza de la enmienda. Esta anaerobiosis deriva del consumo de oxígeno (O_2) por la respiración de la incrementada población bacteriana aerobia que descompone la enmienda orgánica incorporada, i.e., desinfestación biológica (o anaeróbica). Los mecanismos precisos que subyacen en la efectividad de la solarización y sus variantes no han sido suficientemente investigados todavía en todos los aspectos científicos. Además de la acción física o química dichos procedimientos también ejercen un efecto sobre la microbiota edáfica, cuya composición resulta modificada de forma estable, dando lugar a un efecto supresor inespecífico sobre los patógenos y de promoción del crecimiento vegetal que puede perdurar varios años después del tratamiento.

La aplicación de los métodos de desinfestación del suelo antes descritos no debe ser concebida como trivial porque su efectividad no está exenta de ciertos requisitos en el tratamiento. Por ejemplo, la solarización requiere un cuidadoso laboreo para que el suelo quede finamente desagregado y que la lámina de plástico quede en estrecho contacto con el mismo e influyen en su eficacia la composición, estructura y textura del suelo; y la eficiencia de la biofumigación está influida por la especie y cultivar de los restos enterrados, así como por la cantidad de biomasa enterrada, el estado de desarrollo del cultivo, el nivel de humectación de los restos, el tamaño de los fragmentos enterrados, etc. Por ejemplo, la naturaleza de los glucosinolatos y la liberación de isotiocianatos por su hidrólisis son características de la especie de *Brassica*, de manera que la colza oleaginosa *Brassica napus* contiene principalmente

glucosinolatos que no producen isotiocianatos, mientras que la mayoría de los contenidos en la mostaza india *B. juncea* sí los producen y la mayor concentración de ellos en los tejidos de la planta se alcanza poco antes de la floración. Además, la hidrólisis de los glucosinolatos es favorecida por un pH neutro, temperatura moderada y elevado contenido de humedad en el suelo; mientras que la formación de NH_3 y HNO_2 a partir de enmiendas ricas en N son favorecidas por el pH básico o ácido, respectivamente.

B4.5.2.1.2. Prácticas culturales que reducen el inóculo disponible antes de establecer el cultivo

Estas prácticas incluyen: (i) el saneamiento de las parcelas de cultivo; (ii) la rotación de cultivos; y (iii) la aplicación de enmiendas orgánicas.

B4.5.2.1.2.1. Saneamiento de las parcelas de cultivo

La razón de ser y efectividad del saneamiento residen en que muchos hongos y bacterias fitopatógenas—así como algunos nematodos— que atacan partes aéreas de sus huéspedes sobreviven en los restos de tejidos infectados, porque no forman estructuras especializadas para sobrevivir libres en el suelo. Por ello, la viabilidad del inóculo de aquellos se reduce prontamente si los restos infectados se entierran en el suelo, y el laboreo superficial para hacerlo es una medida de control recomendable (ej., el enterrado a apenas 10-15 cm en el perfil del suelo da lugar, en apenas 5-6 meses, a la descomposición de restos de hojas y tallos y la pérdida de viabilidad del hongo *Didymella rabiei* (agente causal de la rabia del garbanzo) y de la bacteria *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* (agente causal de la nervadura negra de las crucíferas). En el caso de manejo del suelo mediante mínimo o no laboreo para evitar la erosión, la viabilidad del patógeno se puede reducir propiciando la pronta descomposición microbiana de los restos vegetales mediante la adición de un sustrato rico en N orgánico (ej., subproductos de las industrias remolachera y vitivinícola). En la misma línea de razonamiento, los restos de cultivos protegidos o productos de destrío deben ser retirados y destruidos, pero nunca apilados en zonas cercanas, especialmente en el caso de patógenos inespecíficos y de elevada capacidad saprofítica (ej., *Botrytis cinerea*, agente causal de podredumbre gris en numerosos cultivos) o de fácil multiplicación y diseminación (ej., *Phytophthora infestans*, agente causal del mildiu de la patata y del tomate).

La eliminación de los restos infectados del cultivo anterior es particularmente relevante para el control de numerosas bacterias y de los hongos que desarrollan en ellos sus estructuras reproductivas sexuales, cuyas esporas son portadoras potenciales de cepas con nuevas virulencias y diseminables eficientemente a larga distancia por el viento. Ejemplo de ello son los ascomicetos *Venturia inaequalis* (agente causal de la roña o moteado del manzano) y *D. rabiei*, que forman pseudotecas en las hojas caídas sobre el suelo durante el periodo otoño-invierno, y las ascosporas descargadas en primavera y diseminadas por el viento sirven como inóculo primario para cultivos situados a larga distancia. Esta diseminación de las ascosporas hasta cultivos alejados de los restos vegetales donde se producen, compromete la eficiencia de las medidas de control que se pongan en práctica para combatir a ambas enfermedades en los lugares de producción —ej., el enterrado de los restos, rotaciones de cultivos no susceptibles, o uso de semillas no infectadas—. Otro caso es la quema de hojarasca del suelo necesaria para eliminar el inóculo del hongo causante de la mancha foliar del caqui *Plurivorosphaerella nawae* (sinónimo: *Mycosphaerella nawae*).

La práctica del saneamiento también es de aplicación para la sanidad de cultivos leñosos de producción ecológica, porque un importante grupo de bacterias y hongos patogénicos de ellos sobreviven en las lesiones que forman en tejidos leñosos, i.e., chancros (ej., las bacterias *Erwinia amylovora*, agente causal del fuego bacteriano del manzano, peral y otras rosáceas, y *Xanthomonas arboricola* pv. *pruni*, agente causal de la mancha bacteriana de los frutales de hueso y del almendro; y los hongos *Phomopsis amygdali* y *Monilinia* spp., causantes respectivamente del chancro del almendro y melocotonero y podredumbre parda de frutos de hueso). En estos casos, el saneamiento parcial de las plantaciones

debe efectuarse durante la poda invernal, retirando y destruyendo los tejidos afectados y aledaños y eliminando momias y otros órganos con síntomas.

B4.5.2.1.2.2. Rotación de cultivos

Esta es una de las prácticas agrícolas más utilizadas en la Agricultura Ecológica para el control de enfermedades causadas por patógenos que sobreviven en el suelo, que se utiliza escasamente en la agricultura convencional. En la rotación de cultivos subyace el concepto de que la **intercalación en la secuencia de cultivos de plantas que son no-huésped** de los patógenos prevalentes en el suelo, o que **generan compuestos tóxicos** -cuando sus tejidos se descomponen en el suelo-, **facilitan que la cantidad de inóculo edáfico no se incremente entre años sucesivos** y proporciona tiempo a la microbiota local antagonista para **debilitar, desplazar, o destruir el inóculo residual**. Las rotaciones pueden ser específicas para cada organismo patógeno y no han sido estudiadas a fondo para la mayoría de las enfermedades, por lo que **suelen basarse en la experiencia más que en la ciencia**. Las más utilizadas incluyen: (i) gramíneas, mezclas de gramíneas y leguminosas o alfalfa como cultivos mejoradores del suelo; (ii) cubiertas vegetales con especies de *Crotolaria* y *Tagetes* que sirven de trampa contra nematodos fitopatógenos como *Meloidogyne* spp. y *Pratylenchus* spp.; y (iii) cultivos de crucíferas o plantas cianogénicas cuyos restos liberan los glucosinolatos antes citados.

La efectividad de la rotación de cultivos en el control de enfermedades es **influida por la amplitud del espectro de huéspedes del patógeno, su hábito ecológico, y la formación o no de estructuras específicas de supervivencia**. Por ejemplo, la rotación de cultivos con especies vegetales no huésped es efectiva contra la rabia del garbanzo y el mal del pie de cebada y trigo (causada por *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*), porque ambos hongos solo infectan sus cultivos huésped y no forman estructuras especializadas de supervivencia. Por ello, solo pueden sobrevivir en restos de aquellos sobre el suelo y durante un periodo de tiempo que es determinado por el agotamiento de nutrientes en el tejido que infestan y la destrucción de este por microorganismos competidores -que es de 1 año para *G. graminis* var. *tritici* y de 2 años para *D. rabiei*-. Por el contrario, las *formae specialis* (ff. spp.) de *Fusarium oxysporum* adaptadas a causar marchitez vascular en huéspedes específicos forman clamidosporas que sobreviven durante años en el suelo y dificultan el control de la enfermedad mediante la rotación de cultivos. Esta dificultad se acentúa en las verticilosis causadas por *Verticillium dahliae*, hongo que sobrevive prolongadamente en el suelo mediante microesclerocios y puede infectar centenares de plantas cultivadas o malas hierbas, en muchas de las cuales el patógeno es endófito -y por ende la infección es asintomática- y produce y aporta inóculo del patógeno al suelo que también puede pasar al agua de riego y sobrevivir en ella. Algo similar sucede en el caso de la bacteria *Ralstonia solanacearum*, causante de marchitez bacteriana en solanáceas y otras muchas plantas cultivadas, que también sobrevive en suelo, agua y en malas hierbas y para la que se han estudiado experimentalmente las especies no-huésped en las que no sobrevive el filotipo 2 de dicha bacteria que es el más detectado en la UE (Álvarez et al., 2008).

No obstante, la utilidad práctica de las rotaciones de cultivos, los mecanismos que subyacen en ellas tampoco han sido suficientemente estudiados. Investigaciones recientes, empleando tecnologías 'ómicas', indican que **la naturaleza del cultivo no-huésped usado en la rotación no es un elemento trivial, porque la especie vegetal cultivada y posiblemente también el cultivar, son factores determinantes** de la composición del microbioma que se establece en su rizosfera, que es la interfase en la que se ejerce el antagonismo contra el patógeno que se pretende en las rotaciones de cultivos. Por lo tanto, la efectividad de las rotaciones de cultivos para el control de las enfermedades causadas por patógenos residentes en el suelo mediante su manejo ecológico, podría ser mejorada con nuevas investigaciones que -vistas las peculiaridades de los sistemas de cultivo ecológico- habrían de estar centradas en ámbitos y problemas locales o regionales (Shennan et al., 2017).

B4.5.2.1.2.3. Enmiendas orgánicas

El mantenimiento de un alto contenido de materia orgánica en el suelo que promueve la Agricultura Ecológica, propicia una elevada diversidad y actividad microbiana en él que suele contribuir a la supresión natural e inespecífica de enfermedades causadas por patógenos telúricos (cf., Capítulo C4., Apartado C4.3.1). No obstante, el crecimiento y actividad de microorganismos antagonistas residentes en el suelo pueden ser estimulados mediante la adición de determinadas enmiendas orgánicas, cuya práctica constituye una estrategia de control biológico alternativa a la introducción de antagonistas específicos. Los agentes de control biológico y los mecanismos por los que operan se describen en extenso en el Apartado C4.3.2.

Las enmiendas orgánicas comprenden una amplia variedad de sustratos, incluyendo los estiércoles, productos con alto contenido en N y cultivos enterrados en verde utilizados para la bio-solarización o la desinfestación anaeróbica (cf., Apartado B4.7.2.1.1.), así como residuos vegetales ricos en celulosa y lignina, y más recientemente se usan también carbón vegetal (*biochar*) y residuos vegetales o animales compostados (materia orgánica estabilizada rica en humus y ácidos húmicos derivada de la transformación bio-oxidativa de residuos de biomasa). Aunque el potencial de las enmiendas orgánicas para la supresión de enfermedades en la Agricultura Ecológica es bien valorado, la variabilidad de sus efectos también es reconocida, en particular con los materiales compostados en los que aparentemente la variabilidad de resultados está asociada con la diversidad de sustratos y los periodos, procesos y condiciones de fermentación para producir el compost maduro. La intensificación de la investigación fitopatológica y microbiológica con la ayuda de las nuevas tecnologías permitirá desvelar los factores que subyacen en dicha variabilidad, y mejorar la efectividad de las enmiendas orgánicas adaptándolas a cada cultivo y suelo, tanto en Agricultura Ecológica como en GIP y agricultura convencional.

B4.5.2.2. Exclusión del patógeno mediante el uso de semillas y material propagativo libre de infección

La frecuencia y extensión con que un número importante de organismos nocivos se transmiten eficientemente mediante semilla y en material de propagación vegetativa ya se ha indicado anteriormente. Ambas determinan que la certificación sanitaria del material de siembra o plantación sea una medida clave para evitar la introducción de patógenos previamente inexistentes en las áreas de cultivo –sean exóticos o no– y a la vez fundamental para asegurar la sanidad del cultivo en suelos donde se han practicado las acciones para reducir el inóculo antes de establecer el cultivo (cf., Apartado B4.7.2.1.). Sin embargo, esta faceta es una de las debilidades de la Agricultura Ecológica, porque la disponibilidad de cultivares ecológicos y certificados sanitariamente es muy limitada. De hecho, el uso de material de plantación infectado con patógenos que causan epidemias explosivas puede dar lugar a enfermedades más graves en la Agricultura Ecológica que en la convencional, como ocurre en el caso de *Phytophthora infestans* y el mildiu de la patata.

Como consecuencia de ello la sanidad de las semillas y del material de propagación vegetativa debe ser promovida con tratamientos autorizados, que excluyen el uso de fungicidas de síntesis y comprenden: (i) la inmersión en agua a distintas temperaturas que dependen del binomio especie y cultivar - patógeno, o exposición a aire caliente a temperaturas no lesivas para el crecimiento vegetal; y el tratamiento con: (ii) extractos vegetales; o (iii) agentes de control biológico (cf., Apartado B4.7.2.3.3.). No obstante, la efectividad de estos últimos tratamientos suele ser inferior a la de los tratamientos fungicidas recomendados en la agricultura convencional.

B4.5.2.3. Reducción de la eficiencia del inóculo en los cultivos establecidos

Las acciones previas a la siembra o plantación para reducir el inóculo existente o evitar la introducción de

patógenos no lo eliminan de forma total necesariamente, ni impiden la llegada de inóculo diseminado desde cultivos próximos; por ello, puede ser necesario reducir la efectividad del mismo sobre el cultivo mediante: (i) prácticas culturales para modificar el ambiente favorable al patógeno; (ii) utilización de cultivares resistentes contra los patógenos; y (iii) protección del cultivo mediante la aplicación de PP. FF. y bioplaguicidas autorizados.

B4.5.2.3.1. Prácticas culturales para modificar los ambientes favorables

Estas prácticas forman parte de las agriculturas tradicionales o ancestrales y se aplican tanto en la preparación del cultivo como durante su manejo. Por ejemplo, las **prácticas de manejo del suelo que reducen la formación y duración de encharcamiento**, como el cultivo en caballones o mesetas, la mejora del drenaje –presumiblemente favorecido por elevado contenido en materia orgánica– y el riego localizado y no en surcos, son medidas recomendables para el control de podredumbres de raíces y cuello que causan oomicetos de los géneros *Aphanomyces*, *Phytophthora* y *Pythium*, o de distintas especies de *Pectobacterium* y *Dickeya* causantes de podredumbres bacterianas en patata, cuya multiplicación y patogénesis es favorecida por el exceso de agua en el suelo y las condiciones de anaerobiosis.

La efectividad del inóculo residente en el suelo también se puede reducir mediante la **elección de la fecha de siembra del cultivo en la que la temperatura prevalente no perjudique a su establecimiento, pero sí a las actividades del patógeno**. Por ejemplo, la mayoría de las fusariosis vasculares causadas por las ff. spp. de *F. oxysporum* se desarrollan con mayor gravedad en el intervalo térmico de 24 a 28 °C, que es óptimo para el crecimiento del patógeno, y esta característica puede ser aprovechada para establecer el cultivo del huésped en condiciones térmicamente subóptimas para ello. Navas-Cortés et al. (1998) investigaron el manejo de la fecha de siembra del garbanzo en Andalucía para el control de la fusariosis vascular causada por *F. oxysporum* f. sp. *ciceris*, y demostraron que el adelanto de la siembra al mes de diciembre -desde la fecha tradicional en el mes de marzo-, incrementa el rendimiento en semilla en cultivos sanos, y opera sobre la enfermedad retrasando su inicio, ralentizando su desarrollo, y reduciendo la cantidad final de ella y la pérdida de rendimiento de semilla. Sin embargo, la efectividad de esta medida de control es anulada si prevalecen otras condiciones que favorecen el desarrollo de la fusariosis, como un elevado nivel de susceptibilidad en los cultivares, o razas muy virulentas del patógeno. A diferencia de las fusariosis vasculares, **ciertas micosis que originan necrosis corticales del sistema radical son favorecidas por temperaturas del suelo que difieren marcadamente del óptimo térmico del patógeno**, pero que son subóptimas para el desarrollo la planta y la predisponen para la enfermedad por el estrés que originan en ella. Por ejemplo, *Fusarium graminearum* (teleomorfo: *Gibberella zeae*) causa la muerte de plántulas de maíz (cultivo de verano) a temperaturas inferiores a 20 °C, pero su crecimiento *in vitro* es óptimo a 25 °C, y la muerte de plántulas de espinaca (cultivo de invierno) causada por *Rhizoctonia solani* (teleomorfo: *Thanatephorus cucumeris*) es más severa en ambientes cálidos (20-25 °C) que a temperaturas más bajas y adecuadas para el desarrollo del cultivo. Evidentemente, en los casos en que ni el patógeno ni la planta crecen adecuadamente a la temperatura óptima para la enfermedad, dichas temperaturas perjudican más a la planta que al patógeno y debilitan su capacidad de responder defensivamente a la infección.

En el caso de las bacteriosis y micosis que afectan a la parte aérea de la planta, cuya patogénesis es favorecida generalmente por la humectación del tejido aéreo, son de aplicación medidas de control que favorezcan: (i) la aireación del cultivo, como la orientación de este a favor de los vientos dominantes, la formación de copas permeables al viento en cultivos frutales y la ventilación en los invernaderos; y (ii) la **reducción de la humedad relativa del ambiente aéreo** evitando siembras o plantaciones de alta densidad, realizando podas en verde o defoliación para reducir la masa vegetal, efectuando el riego por goteo con preferencia a la aspersión para minimizar la diseminación del patógeno por salpicaduras del agua, o realizando el riego por aspersión durante periodos soleados del día para reducir el periodo de tiempo de humectación del tejido. Además, contribuyen al control de dichas enfermedades medidas

que: (i) interfieran con la de **diseminación de los propágulos infecciosos**, como el establecimiento de cortavientos o la vegetación natural entre parcelas, y la retirada de restos o plantas afectadas; y (ii) **reduzcan la eficiencia en el contacto de los propágulos diseminados con plantas susceptible**, como el establecimiento de mosaicos de especies cultivadas, o el cultivo de mezclas de especies vegetales, si bien ambas prácticas pueden llevar consigo incrementos en los costes de producción e inconvenientes técnicos para el manejo. En el caso de **virosis transmitidas por pulgones son recomendables la disposición de cubiertas plásticas reflectantes sobre el suelo** en los cultivos al aire libre, y de **plásticos que absorben la radiación UV en la franja de 280-380 nm (UV A/B) sobre la cubierta de los invernaderos**, porque en ambos casos se interfiere con las actividades de localización de las plantas por los insectos y se reduce la tasa de transmisión. Además, esta última práctica también contribuye al control de algunas **micosis de cultivos hortícolas causadas por hongos como *B. cinerea*, *Sclerotinia sclerotiorum* y *Stemphylium botryosum***, que requieren dicha radiación UV para la esporulación.

En términos generales, las modificaciones ambientales mediante las prácticas de cultivo descritas arriba **tienen un efecto neto limitado e insuficiente por sí solas en el control de las enfermedades, tanto en la Agricultura Ecológica como en la convencional**. Además, este efecto es particularmente lábil ante factores que propician el desarrollo grave de las enfermedades, como la existencia de elevadas densidades de inóculo de los patógenos, la prevalencia de razas virulentas de ellos, o la acentuada susceptibilidad de los cultivares como se ha indicado anteriormente para la fusariosis vascular del garbanzo. Además, puesto que los cultivos suelen ser afectados por enfermedades de diferentes patogénesis en el curso de un ciclo anual de crecimiento, **no debe ser desestimado que la modificación ambiental eficiente contra una de ellas favorezca el desarrollo grave de otras** (cf., Apartado C6.2.2.).

B4.5.2.3.2. Utilización de cultivares resistentes contra los patógenos

Esta medida de control, que es fundamental para la sanidad de cultivos en la agricultura convencional, es **aún más clave para la de cultivos en la Agricultura Ecológica** dada la importancia que tienen en esta las modificaciones ambientales de limitado efecto de control citadas anteriormente, y las dificultades para asegurar la sanidad de las semillas y material de plantación de propagación vegetativa. La naturaleza, mecanismos y estrategias para optimizar el uso de cultivares resistentes en la agricultura convencional se estudian en extenso en el Capítulo C3. de esta obra.

La **selección empírica por los agricultores de los cultivares locales de uso preferente en la Agricultura Ecológica no asegura la disponibilidad de resistencia en ellos frente a plagas y enfermedades emergentes o re-emergentes**, y la posibilidad de producción comercial de cultivares mejorados para resistencia por operadores autorizados parece remota, dadas las limitadas demanda y extensión de los cultivos y la gran diversidad de estos. Aunque ambas circunstancias confieren fragilidad a la sanidad de cultivos en la Agricultura Ecológica, no es descartable que **algunos de los cultivares locales hayan mantenido un nivel de resistencia generalizada y parcial** y entre ellos se puedan seleccionar los más resistentes y acomodados a la producción (cf., Apartados C3.2.2.2. y C3.2.4.). Sin embargo, es oportuno señalar que la efectividad de este tipo de resistencia es comprometida por las condiciones ambientales y de los patógenos que favorecen el desarrollo grave de las enfermedades, y por ello dicha **efectividad es optimizada si se emplea conjuntamente con el manejo de las condiciones ambientales** mediante prácticas de cultivo indicadas anteriormente.

La **falta de cultivares resistentes de interés comercial en especies de importancia en Agricultura Ecológica se puede suplir en algunos casos con su injerto sobre patrones resistentes a patógenos específicos que confieran tolerancia en la combinación resultante**, que ha venido siendo práctica generalizada en algunas producciones frutales convencionales (ej., en cítricos contra la tristeza causada por el virus CTV; en frutales de hueso contra los tumores del cuello causado por varias especies bacterianas de los géneros

Agrobacterium y *Rhizobium*; en melocotonero contra los nematodos *Meloidogyne* spp., y en vid contra la filoxera (*Daktulosphaira vitifoliae*) y diversos nematodos. La práctica del injerto para cultivos herbáceos se ha venido desarrollando y empleando también durante las últimas décadas, utilizando patrones resistentes a diversos patógenos causantes de marchiteces (ej., *F. oxysporum* ff. spp.; *R. solanacearum*, *V. dahliae*), podredumbres de raíces (ej., *Phytophthora* spp.) y nematodos (ej., *Meloidogyne* spp.) en especies cultivadas de cucurbitáceas y solanáceas principalmente, sobre los que se pueden injertar cultivares susceptibles propios de la producción ecológica aun perteneciendo a especies o géneros diferentes.

La efectividad de los cultivares con resistencia parcial y de los patrones resistentes para el control de enfermedades en la Agricultura Ecológica puede ser potenciada con la inducción de resistencia inespecífica, cuyos mecanismos se expresan singularmente en tejidos distantes del lugar de infección (i.e., sistémica, SAR, acrónimo de *Systemic Acquired Resistance* e ISR, acrónimo de *Induced Systemic Resistance*) y operan contra patógenos foliares aunque la inducción se produzca en tejidos subterráneos (ver Apartados C3.2.2.3.1. y C4.3.2.4. en los Capítulos C3. y C4., respectivamente). Mientras que la SAR es inducida por los propios patógenos que causan necrosis de los tejidos infectados, la ISR lo es por microorganismos beneficiosos que operan en el control biológico, así como por enmiendas orgánicas (ej., productos compostados, carbón vegetal, quitina, etc.) y puede ser más común en los cultivos de producción ecológica. Algunos extractos vegetales y ciertos compuestos químicos (ej., ácido salicílico, fosfito potásico, silicato) también son inductores de la ISR, pero solo los de origen natural están autorizados en la Agricultura Ecológica.

B4.5.2.3.3. Protección del cultivo mediante la aplicación foliar de productos autorizados en la Agricultura Ecológica

Como en la agricultura convencional, la aplicación de medidas de lucha previas a la siembra o plantación y de prácticas culturales para el control de bacteriosis y micosis de tejidos aéreos de cultivos ecológicos no exime, en muchos casos, de la necesidad de realizar tratamientos con PP. FF. protectores y de bioplaguicidas. En particular se usan para enfermedades que se caracterizan por epidemias explosivas (ej., bacteriosis, mildius, oídios, royas, etc.) y en condiciones ambientales muy favorables para ellas. De hecho, estos casos son paradigmas de la necesidad de integrar armónicamente todas las medidas de control posibles (i.e., las de GIP), que en términos generales también son recomendadas para la sanidad de la producción ecológica (Shennan et al., 2017).

Los productos utilizados para la protección de la copa de los cultivos ecológicos incluyen fundamentalmente fungicidas a base de Cu, S o bicarbonatos, aceites minerales o vegetales, extractos vegetales y microorganismos de control biológico, cuya eficiencia de control depende en gran parte de que la temporalidad de las aplicaciones se fundamente en criterios epidemiológicos y en la predicción de los ataques. Los fungicidas cúpricos, que se vienen usando para el control de diversas enfermedades causadas por hongos y oomicetos en la agricultura convencional desde hace más de un siglo, son prácticamente el único fitofármaco efectivo contra las bacteriosis, y hoy día también son esenciales para el control de antracnosis, mildius, roñas y otras micosis en la Agricultura Ecológica (Latorre et al., 2018). Los iones Cu^{+2} son tóxicos generales que actúan a nivel de la membrana de los patógenos y de sus proteínas enzimáticas, bloquean la actividad respiratoria e inhiben multitud de reacciones, entre otros efectos (Latorre et al., 2018). Esta acción tóxica multi-sitio no impide que las bacterias fitopatógenas desarrollen resistencia al Cu, que se ha detectado en numerosas especies bacterianas patógenas de distintos cultivos en la agricultura convencional, pero se desconoce si se ha buscado también en cultivos ecológicos. En cambio, según el *Fungicide Resistance Action Committee* (FRAC) no se ha detectado resistencia al Cu en hongos y oomicetos fitopatógenos (ahdb.org.uk/knowledge-library/frag). La toxicidad inherente del Cu puede dar lugar a problemas de fitotoxicidad en ciertos órganos vegetales a dosis elevadas de Cu y en condiciones de humectación elevada y duradera; y la utilización repetida de pro-

ductos cúpricos puede originar problemas medioambientales por la acumulación del Cu en el suelo y su toxicidad sobre diversos invertebrados y microorganismos, y para la salud humana por residuos en los alimentos. Por ello, la legislación de la UE estableció límites para la utilización de productos cúpricos en cultivos convencionales y también en los ecológicos. Actualmente los límites máximos son de hasta 28 kg de Cu por hectárea en un periodo de 7 años, tanto en cultivo ecológico como en GIP, según el Reglamento (UE) 540/2011.

Por los problemas descritos, los compuestos de Cu están actualmente prohibidos en algunos países europeos, pero no en España. La reducción en el uso de los productos cúpricos debe fomentar la investigación sobre: (i) otras alternativas químicas de origen natural; (ii) la biología de los patógenos y epidemiología de las enfermedades en las condiciones locales para el desarrollo de modelos de predicción y determinar los momentos y tratamientos óptimos; (iii) nuevas formulaciones con menor dosis de Cu^{+2} y con equipos de aplicación más eficientes; (iv) el desarrollo de cultivares resistentes a los distintos patógenos; y (vi) la integración de productos y cultivares con las medidas preventivas y de modificaciones del ambiente de naturaleza cultural. El fomento de estas investigaciones presenta la ventaja de que sus resultados son de aplicación tanto a la Agricultura Ecológica como a la convencional y a la GIP.

Comparado con el amplio uso de los fungicidas cúpricos, los basados en el S se emplean básicamente para el control de los oídios y pueden ser fitotóxicos a temperaturas superiores a 30 °C, y el resto de PP. FF. autorizados en cultivos ecológicos tiene un uso menor en extensión y efectividad; por ejemplo, el control de oídios también se puede afrontar con la aplicación de bicarbonatos de amonio, potasio o sodio -que varían en efectividad- o de aceites minerales o vegetales que también son de utilidad para interferir la transmisión de ciertos virus por pulgones.

Asimismo, durante los últimos años se está promoviendo el tratamiento foliar con extractos acuosos o con solventes variados de diversas plantas, incluyendo árbol del té (*Melaleuca alternifolia*), cítricos, cola de caballo (*Equisetum spp.*), ortiga (*Urtica spp.*), etc., y también están autorizados los aceites de menta, naranja, girasol, árbol del neem (*Azadirachta indica*), lecitina de soja y otros compuestos como el cloruro sódico. Sin embargo, como en la medicina humana, el uso fitosanitario de extractos vegetales carece en la inmensa mayoría de casos de evidencia científica que sostenga su recomendación, y la reproducibilidad de su efectividad en distintos cultivos es comprometida en el caso de ciertos extractos de plantas, por la mezcla de los diversos compuestos extraídos junto con la supuesta sustancia activa y la inconsistencia de la dosis de esta que determina su eficacia.

Una estrategia alternativa al tratamiento de la copa vegetal con productos de naturaleza química o extractos vegetales es la aplicación directa de microorganismos de control biológico (i.e., control biológico "inundativo") -cuya naturaleza y mecanismos de acción se exponen en extenso en el Apartado C4.3.2. del Capítulo C4., -así como de extractos de ellos-. El número de agentes de control biológico autorizados para tratamientos en Agricultura Ecológica en la UE se expone en el Reglamento 1107/2009 y en el 2018/848 y aumenta con rapidez. Dichos microorganismos no pueden proceder de organismos genéticamente modificados (OGMs). Además, la mayor parte de ellos son utilizados para tratamientos de semillas y material de propagación asexual (cf., Apartado B4.7.2.2.), o contra patógenos residentes en el suelo (como distintas cepas bacterianas de especies de los géneros *Bacillus*, *Pasteuria*, *Pseudomonas* y *Streptomyces*, y hongos de los géneros *Gliocladium*, *Paecilomyces*, *Phytium* y *Trichoderma*). Algunas cepas de *Bacillus subtilis* y otras especies de este género y de la levadura *Aureobasidium pullulans* se utilizan para el control de enfermedades de la copa vegetal, fundamentalmente en cultivos leñosos como manzano y peral -contra el fuego bacteriano- y vid -contra la podredumbre gris causada por *B. cinerea*- y en mucha menor extensión en cultivos herbáceos. En términos generales, los tratamientos con agentes de control biológico -o con productos no basados en Cu o S- suelen resultar insuficientes por sí solos

para el control adecuado de bacteriosis y micosis de la parte aérea de la planta en gran parte de cultivos en Agricultura Ecológica, y su uso eficiente debe ser concebido en el marco de la combinación con otras medidas propias también de la GIP.

B4.5.3. Manejo de artrópodos en cultivo ecológico

La no autorización del uso de PP. FF. químicos de síntesis en el cultivo ecológico o su parcial sustitución por productos más selectivos y en general menos persistentes, afecta particularmente al control de plagas de artrópodos fitófagos. Por ello se han desarrollado mucho las estrategias de control biológico (clásico, inundativo, o de conservación), manejo de cubiertas, etc., así como la utilización de feromonas y otros semioquímicos que son fundamentales hoy en día en el control de artrópodos y que se describen en los Capítulos B3., B4., C4. y C6. Destacan como insecticidas autorizados los basados en *Adoxophyes orana* granulovirus, *Akanthomyces muscarius* Ve6, *Beauveria bassiana* o *Metarhizium brunneum*, entre otros.

Hay una cierta coincidencia en la literatura científica de que el cambio y la reducción en el uso de PP. FF. con acción insecticida tiene una consecuencia principal, como es la **mayor presencia y eficiencia de los enemigos naturales en los campos de cultivo y ello incide en la disminución de los artrópodos fitófagos** (Shennan et al., 2017). Esa relación no tiene por qué ser directa necesariamente, sino que en ocasiones es el cambio en el uso de PP. FF. lo que permite la aplicación con éxito de medidas que favorecen la presencia y la acción de enemigos naturales, a la vez que respetan y potencian otros servicios ecosistémicos tales como la diversidad y la polinización. Así, por ejemplo, Winqvist et al. (2012) señalan la escasa influencia de la estructura y composición del paisaje en el control de plagas en cultivos en donde se aplicaban PP. FF., en comparación con cultivos de Agricultura Ecológica sin utilización de PP. FF. de síntesis. Esa conclusión coincide en parte con lo que observaron Clemente-Orta et al. (2020 b) en cultivos de maíz, en los cuales determinadas prácticas de manejo se revelaron como más influyentes en la cantidad y diversidad de depredadores que algunos componentes del paisaje circundante. En este último caso, sin embargo, la conclusión cambió cuando se estudió específicamente la incidencia de virosis transmitidas por pulgones en varios paisajes, concluyéndose que la mayor presencia en ellos de hábitats no agrícolas ayudaba a reducir la incidencia de las virosis junto con el manejo de los márgenes y la época de siembra (Clemente-Orta et al., 2020 a).

Conclusiones muy similares a lo comentado sobre la influencia de la estructura y composición del paisaje agrícola, se podrían mencionar si nos refiriéramos a otros métodos de GIP de agroecosistemas con medios de control de plagas distintos al uso de PP. FF. químicos de síntesis, tal como ya se han expuesto para el control de enfermedades. **Nótese que esos métodos no han sido particularmente investigados y aplicados para la Agricultura Ecológica, sino que persiguen objetivos de productividad y sostenibilidad en la tecnología de la Sanidad Vegetal en toda la agricultura.** Prácticas tales como rotaciones y diversificación de cultivos, laboreo de conservación, uso de cultivares resistentes, explotación de productos de origen natural dirigidos a modificar el comportamiento de los artrópodos fitófagos o de sus enemigos naturales, etc., están siendo introducidos progresivamente en programas de GIP de plagas con beneficios generales compartidos por la Agricultura Ecológica y la de otros tipos, que dirigen su progreso a la reducción en el uso de PP. FF. químicos de síntesis. Incluso podría decirse que los programas de investigación en Sanidad Vegetal raramente se han dirigido específicamente a la Agricultura Ecológica, pero sí en cambio a la GIP (Zehnder et al. 2007). Buena parte de ese progreso ha sido estimulado en muchos cultivos por la falta creciente de PP. FF. autorizados y ello ha permitido que los objetivos de la innovación en Agricultura Ecológica y en la de otros tipos vayan convergiendo.

B4.5.4. Manejo de malas hierbas en cultivo ecológico

El manejo de malas hierbas en la Agricultura Ecológica plantea un reto de particular envergadura, si tenemos en cuenta que el control de malas hierbas se ha basado tradicionalmente en el uso de herbicidas químicos y en el laboreo intensivo del suelo. Prácticamente no hay sustancias naturales con acción herbicida que puedan sustituir a los PP. FF. de síntesis con dicha actividad, ya que las sustancias de origen natural que se han utilizado esporádicamente en tratamientos de focos son poco específicas. Por otra parte, el laboreo intensivo compromete la sostenibilidad de la agricultura. Al igual que dijimos en secciones anteriores para el control de enfermedades y artrópodos fitófagos, la sustitución de esas dos metodologías tradicionales de escarda son **objetivos necesariamente asumidos por la agricultura no ecológica**, por el creciente número de malas hierbas resistentes a los herbicidas disponibles comercialmente en la UE y la toma de conciencia de la importancia creciente que otorgamos a la salud de los suelos, muy menoscabada por el laboreo intensivo.

Reducir el laboreo fue el objetivo de la introducción de técnicas de cultivo de no laboreo o laboreo mínimo, pero muy a menudo ese camino conllevó el aumento del uso de herbicidas. También, para reducir el impacto del laboreo (y también cada vez más disminuir costes de combustible), se ha propuesto **mejorar el conocimiento del periodo crítico en el que el efecto de las malas hierbas es mayor** y en el que, por tanto, hay que situar el laboreo. Otro criterio especialmente importante en Agricultura Ecológica para situar los momentos óptimos del laboreo es el de no aumentar el banco de semillas de malas hierbas en el suelo, y ello puede significar incluso labrar después de la cosecha, cuando las malas hierbas ya no compiten con el cultivo.

Otro ámbito en el que el control de malas hierbas necesita de mayor y específica investigación es el de los **umbrales de densidad de cada mala hierba en relación con el estado de desarrollo de la misma y del cultivo**. A la hora de dar y usar valores de umbrales de densidad de malas hierbas para intervenir en su control, hay que tener en cuenta las consecuencias de situar dichos umbrales en valores que aumenten el banco de semillas en el suelo y por tanto debe considerarse una perspectiva multianual en la toma de decisiones. Es corriente, además, que el efecto de competencia de la mala hierba con el cultivo se ejerza simultáneamente a través de varias especies y no de un número reducido de especies nocivas, como suele ser más frecuente en el caso de las enfermedades y plagas.

Al igual que ya se dijo en apartados anteriores, las necesidades de intervención para controlar malas hierbas en Agricultura Ecológica -y en cualquier otro tipo de agricultura- serán menores si se utilizan **prácticas culturales que mejoren el vigor de la planta cultivada y por tanto disminuyan el efecto de la competencia de la mala hierba**. Entre las prácticas culturales beneficiosas para el control de malas hierbas está el control biológico de conservación. Hay un buen número de insectos consumidores de semillas -por ejemplo, algunos escarabajos y hormigas- que pueden rebajar significativamente el banco de semillas en el suelo. Este último hecho añade valor al control biológico de conservación que se ha practicado poco para el control de malas hierbas; por el contrario, hay relativamente menos ejemplos de control biológico mediante artrópodos fitófagos que se alimenten de malas hierbas de forma selectiva respecto al cultivo.

Otra práctica cultural muy habitual para el control de malas hierbas que se practica en Agricultura Ecológica, (o no-ecológica pero que pretende evitar los herbicidas), se basa en **diferentes tipos orgánicos de cubiertas del suelo (*mulching* en inglés)** tales como la paja, el heno, hojas, serrín, etc., que dificultan la germinación de semillas ya que estas precisan luz para ello y constituyen refugios para insectos consumidores de semillas a la vez que proporcionan otros beneficios al cultivo. La cubierta del suelo, sin embargo, es menos efectiva contra las malas hierbas perennes con órganos de reserva tales como

bulbos, tubérculos o rizomas. El material para la cubierta del suelo se puede originar en el propio campo con cultivos de cobertera de gran biomasa y bajo coste, que pueden paliar el inconveniente de la alta exigencia de mano de obra que tienen los materiales anteriormente mencionados (Schonbeck, 2007). Así, por ejemplo, el cultivo de cobertera una vez segado se dispone en hileras entre las líneas de siembra del cultivo a escardar.

B4.6. Luces, sombras y perspectivas de la mejora de la Sanidad Vegetal en la Agricultura Ecológica en España

Durante la última década, la producción agrícola ecológica se ha convertido en la UE y especialmente en España en un sistema agrario muy especializado y económicamente atractivo, pero también muy heterogéneo. El análisis realizado en este capítulo indica que **el aseguramiento de la sanidad de sus cultivos es complejo y requiere formación profesional especializada y conocimientos y tecnologías de carácter específico, adaptadas a cada cultivo y situación**. Por ello, se trata de un sector con muchas “luces” por estar en crecimiento, y contar con apoyo financiero de la UE y con mercado potencial en España y en varios continentes, pero en el que como “sombras” destaca la **necesidad de reforzar la investigación científico-técnica, la experimentación pública y privada, y la formación y asesoramiento multidisciplinar**, para mejorar el nivel de innovación específica de la Agricultura Ecológica y superar todos los retos planteados por la sanidad de dichos cultivos. Además, la estrecha vinculación entre las formas de producción ecológica y las estrategias, métodos y medios para conseguir cultivos sanos, sugiere que dicha investigación y experimentación sean desarrolladas con un **abordaje interdisciplinar y a nivel de sistema** (van Bruggen et al., 2016).

La investigación científico-técnica orientada específicamente a la Sanidad Vegetal en la Agricultura Ecológica es notablemente escasa en España en la actualidad, si la comparamos con la de la GIP. Esta limitación podría ser mitigada aprovechando la intención de la Comisión Europea de reservar, a partir de 2023, fondos con cargo a Horizonte Europa para proyectos de investigación e innovación, sobre soluciones alternativas al uso de insumos en la agricultura convencional, incluyendo los PP. FF. de síntesis. En tal caso, el impulso que pudiera tener lugar permitiría **abordar científica y técnicamente aquellos aspectos de la sanidad de los cultivos que son inherentes a la producción ecológica**, pero escasamente comprendidos todavía, comenzando con la categorización de las enfermedades, plagas y malas hierbas que afectan a los principales cultivos en las zonas de producción ecológica en España, y la priorización de su investigación en razón de la gravedad de aquellas y la importancia estratégica de los cultivos. Para poder evaluar de forma realista los impactos sociales y medioambientales, la productividad, y otros aspectos de la Agricultura Ecológica, son necesarios más estudios innovadores con diseños que vayan más allá de las comparaciones entre parcelas o entre explotaciones y de los meta-análisis basados en datos de ensayos no siempre estadísticamente bien diseñados para sacar conclusiones estadísticamente válidas.

Además, entre la diversidad de temas que conciernen específicamente a la sanidad de los cultivos ecológicos deberían ser prioritarios: (i) el establecimiento de un sistema que **asegure la provisión de material sano de siembra o plantación de los cultivares de mayor interés**; (ii) el **desarrollo de resistencias a enfermedades y plagas en cultivares adaptados de cultivos clave**, aprovechando la disponibilidad de tecnologías como CRISPR / Cas 9) que debería ser aceptada en la UE y por los ecologistas, dado que no incluyen la introducción de material genético foráneo; (iii) la **cuantificación y evaluación crítica de la efectividad de los medios de lucha propuestos como alternativos al Cu y S para el control de bacteriosis y micosis de tejidos aéreos**, así como de las diversas prácticas culturales para estimular la diversidad microbiana antagonista en el suelo y la modificación del ambiente en los cultivos; y (iv) el **desarrollo de estrategias GIP para la sanidad de cultivos ecológicos estratégicos en zonas de producción seleccio-**

nadas. Puesto que los ambientes y características propias de la Agricultura Ecológica pueden conferir singularidades a las enfermedades, plagas y malas hierbas que afecten a dichos cultivos, el desarrollo de estrategias integradas requerirá estudios adicionales sobre la naturaleza, ecología, dinámica de poblaciones y epidemiología de las principales de aquellas.

También es necesario un gran esfuerzo en investigación científico-técnica sobre el efecto a medio y largo plazo en la salud humana y en el medio ambiente de los productos fitosanitarios u otros autorizados en cultivo ecológico, aunque es sabido que todos los productos fitosanitarios autorizados para Agricultura Ecológica, siguen una evaluación científica independiente por EFSA antes de su aprobación y puesta en el mercado y la información se puede consultar en: <https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-database/active-substances/?event=search.as> y en la web de EFSA (<https://www.efsa.europa.eu>). También se evalúa la toxicidad para el aplicador y consumidor de los productos naturales y si no son seguros, no se aprueban (si se trata de un producto que se solicita por primera vez) o no se renuevan sus autorizaciones. Pero es necesario optimizar y aumentar la sensibilidad de los métodos de detección de los residuos de algunos de ellos en los alimentos. La percepción de que los plaguicidas de origen natural son menos tóxicos y dejan menos residuos que los de síntesis **no deja de ser parte de las valoraciones subjetivas, -que guiadas por la opinión personal o la emoción envuelven a la producción ecológica en muchos casos-, y requiere siempre una rigurosa confirmación científica.**

El papel de la Agricultura Ecológica y de la convencional, o de otros tipos, en la producción agrícola del futuro, debería ser presentado en un nuevo formato ya que los distintos sistemas, pueden ser más o menos adecuados en distintos contextos (Reganold y Watcher, 2016). Es necesario poder contar también con el potencial de sistemas que se basan en cultivar según el esquema ecológico, pero que permiten añadir ciertos insumos suplementarios puntualmente, como un fertilizante químico para mejorar la productividad u ocasionalmente un producto fitosanitario de bajo impacto toxicológico para controlar una enfermedad o plaga inesperada, lo que permitiría una mayor rentabilidad al no perderse la cosecha, aunque en algunos casos la producción no podría ser denominada ecológica. Todo esto está previsto y regulado en algunos casos recientes, como se hace actualmente para el control de la avispa del almendro en España. Pero también sería muy apropiado para ciertas zonas y países en vías de desarrollo, combinadas con una mayoría de prácticas sostenibles.

Y respecto al papel concreto de la Agricultura Ecológica, a pesar de su inferior producción en ciertos cultivos que requiere investigación específica para ser mejorada especialmente desde el punto de vista de la Sanidad Vegetal, los beneficios medioambientales y sociales, también deben ser valorados (Reganold y Watcher, 2016). La mejora potencial del cultivo ecológico es enorme si cuenta con mayor investigación y transferencia dedicada a los distintos temas pendientes. Por otra parte, como ya se dijo anteriormente, buena parte de las innovaciones en Sanidad Vegetal que se van generando tienen el objetivo de sustituir PP. FF. y por lo tanto tienen el potencial de mejorar la Agricultura Ecológica a la vez que otros tipos de agricultura.

Como indicaron Seufert et al. (2012), **en lugar de continuar con el debate de agricultura convencional o de GIP frente a cultivo ecológico, que tiene una gran carga ideológica, se deberían evaluar sistemáticamente y rigurosamente los beneficios de todo tipo y no solo económicos, de las distintas opciones de manejo.** Porque parece claro que, para lograr la deseada seguridad alimentaria sostenible, probablemente sean necesarias muchos tipos de agricultura diferentes, incluidos los sistemas híbridos, porque pueden recoger lo mejor de cada uno de los actuales (Reganold y Watcher, 2016, Garnett et al., 2013). **Una pregunta adecuada sería: ¿cómo y dónde la Agricultura Ecológica, la GIP, u otras pueden contribuir a alimentar a toda la humanidad de forma sostenible?** Todavía queda mucho camino por recorrer si se quieren superar los retos globales de la seguridad alimentaria y la sostenibilidad para el futuro próximo. Concretamente, la optimización de las estrategias de manejo de la Sanidad Vegetal de los cultivos ecológicos en España, requiere mucha más investigación que complete la actualmente disponible.

B4.7. Bibliografía

- Agence BIO. 2020. Organic sector in the world. International publications by Agence BIO 2020 Edition. French Agency for the development and promotion of organic farming, Montreuil, France.
- Aguilera, E., Piñero, P., Infante Amate, J., González de Molina, M., Lassaletta, L., y Sanz Cobeña, A. 2020. Emisiones de gases de efecto invernadero en el sistema agroalimentario y huella de carbono de la alimentación en España. Real Academia de Ingeniería. ISBN: 978-84-95662-77-4.
- Altieri, M.A. 1990. Agroecology and rural development in Latin America. Págs. 113-118, en: M.A. Altieri y S.B. Hecht, eds. Agroecology and Small Farm Development. CRC Press. Florida.
- Altieri, M.A. 1995. Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture. Westview Press. Boulder, CO. Edición revisada y ampliada.
- Álvarez, B., Vasse, J., Le-Courtois, V., Trigalet-Démery, D., López, M.M., y Trigalet, A. 2008. Comparative behavior of *Ralstonia solanacearum* biovar 2 in diverse plant species. *Phytopathology* 98: 59-68. doi: 10.1094/PHYTO-98-1-0059.
- Armesto, A.P., Lafarga, A., y Lezaun, J. A. 2005. Cultivo ecológico en agrosistemas cerealistas. Navarra Agraria, Enero- Febrero: 23-30.
- Baker, B.P., Benbrook, C.M., Groth, E., y Benbrook, K.L. 2002. Pesticide residues in conventional, integrated pest management (IPM)-grown and organic foods: insights from three US data sets. *Food addit. Contam.* 19: 427-46.
- Beketov, M.A., Kefford, B.J., Schafer, R.B., y Liess, M. 2013. Pesticides reduce regional biodiversity of stream invertebrates. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A* 110: 11039-11043.
- Biondi, A., Desneux, N., Siscaro, G., y Zappalà, L. 2012. Using organic-certified rather than synthetic pesticides may not be safer for biological control agents: Selectivity and side effects of 14 pesticides on the predator *Orius laevigatus*. *Chemosphere* 87: 803-812.
- BOE. 2012. Real Decreto 1311/2012, de 14 de septiembre, por el que se establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios. Boletín Oficial del Estado núm. 223, de 15 de septiembre de 2012, 1311/2012.
- Clemente-Orta, G., Albajes, R., y Achon, M.A. 2020 a. Early planting, management of edges and non-crop habitats reduce potyvirus infection in maize. *Agron. Sustain. Dev.* 40: 21. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00625-4>.
- Clemente-Orta, G., Madeira, F., Batuecas, I., Sossai, S., Juárez-Escario, y Albajes, R. 2020 b. Changes in landscape composition influence the abundance of insects on maize: The role of fruit orchards and alfalfa crops. *Agric. Ecosyst. Environ.* 291.
- Comisión Europea. 2014. Comunicación de la Comisión al Parlamento europeo, al Consejo, al Comité económico y social europeo y al Comité de las regiones. Plan de Acción para el futuro de la producción ecológica de la Unión Europea. COM (2014) 179 final.
- Crowder, D.W., y Reganold, J.P. 2015. Financial competitiveness of organic agriculture on a global scale. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A* 112: 7611-7616.
- Curl, C.L., Fenske, R.A., y Elgethun, K. 2003. Organophosphorus pesticide exposure of urban and suburban preschool children with organic and conventional diets. *Environ. Health Perspect.* 111: 377-82.
- Deguine J.P., y Penvern, S. 2014. Agroecological crop protection in organic farming: Relevance and limits. Págs. 107-130, en: S. Bellon y S. Penvern, eds. Organic Farming, Prototype for Sustainable Agricultures. Springer Science+Business Media. Dordrecht.
- DOUE. 2009. Reglamento (CE) No 1107/2009 del Parlamento europeo y del Consejo de 21 de octubre de 2009 relativo a la comercialización de productos fitosanitarios y por el que se deroga las Directivas 79/117/CEE y 91/414/CEE del Consejo. Diario Oficial de la Unión Europea L-2009.
- DOUE. 2011. REGLAMENTO DE EJECUCIÓN (UE) No 540/2011 DE LA COMISIÓN de 25 de mayo de 2011 por el que se aplica el Reglamento (CE) no 1107/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que respecta a la lista de sustancias activas autorizadas. Diario Oficial de la Unión Europea L 153/1.
- DOUE. 2018. Reglamento (UE) 2018/848 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, sobre producción ecológica y etiquetado de los productos ecológicos y por el que se deroga el Reglamento (CE) n° 834/2007 del Consejo. Diario Oficial de la Unión Europea L-2018-80995.
- DOUE. 2021. Reglamento de Ejecución (UE) 2021/181 de la Comisión de 15 de febrero de 2021 que modifica el Reglamento (CE) n° 889/2008, por el que se establecen disposiciones de aplicación del Reglamento (CE) n° 834/2007 del Consejo sobre producción y etiquetado de los productos ecológicos, con respecto a la producción ecológica, su etiquetado y su control. Diario Oficial de la Unión Europea L53/99.
- DOUE. 2021. Reglamento de Ejecución (UE) 2021/1165 de la Comisión de 15 de julio de 2021 por el que se autorizan determinados productos y sustancias para su uso en la producción ecológica y se establecen sus listas. Diario Oficial de la Unión Europea L-2021-80977.
- Ehler, L. 2006. Perspective Integrated pest management (IPM): definition, historical development and implementation, and the other IPM. *Pest Manag. Sci.* 62: 787-789.
- FAO/WHO Joint Food standards programme. Codex Alimentarius Commission. 2001 (2nd edition). FAO. <https://www.fao.org/3/y1579e/y1579e.pdf>.
- FAO. 2021. Plan de acción para la producción ecológica en la Unión Europea 2021 – 2027. <https://www.fao.org/agroecology/database/detail/es/c/1396755/>.
- Farrell, J. G., y Altieri, M.A. 1999. Sistemas Agroforestales en Agroecología. Bases Científicas para una Agricultura Sustentable. Editorial Nordan-Comunidad. Montevideo.
- Gabriel D., Sait, S.M., Kunin, W.E., y Benton, T.G. 2013. Food production versus biodiversity: comparing organic and conventional agriculture. *J. Appl. Ecol.* 50: 355-64.

- Garnett T., Appleby M.C., Balmford, A., Bateman, I.J., Benton, T.G., Bloomer, P., Burlingame, B., Dawkins, M., Dolan L., Fraser, D., Herrero, M., Hoffmann, I., Smith, P., Thornton, P.K., Toulmin, C., Vermeulen, S., y Godfray, H.C.J. 2013. Sustainable intensification in agriculture: Premises and Policies. *Science* 341: 33-34. doi.org/10.1126/science.1234485.
- Geiger, F., Bengtsson, J., Berendse, F., Weisser, W.W., Emmerson, M., et al. 2015. Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland. *Basic Appl. Ecol.* 12: 386–87.
- IFOAM. 2020. EU group Plant Health Care in Organic Farming. Position paper.
- Kennedy, C.M., Lonsdorf, E., Neel, M.C., Williams, N.M., Taylor, H., et al. 2013. A global quantitative synthesis of local and landscape effects on wild bee pollinators in agroecosystems. *Ecol. Lett.* 16:584–99.
- Kogan, M. 1998. Integrated pest management: historical perspectives and contemporary developments. *Annu. Rev. Entomol.* 43: 247-270. doi/abs/10.1146/annurev.ento.43.1.243
- Labrador, J., y Porcuna, J.L. (coord.). 2010. Conocimientos, Técnicas y Productos para el Control de Plagas y Enfermedades en Agricultura Ecológica. Ed. SEAE, 330 pp.
- Langley, J.A., Heady, E.O., y Olson, K.D. 1982. Macro implications of a complete transformation of U.S. agricultural production to organic farming practices. *CARD Working Papers.* 4. http://lib.dr.iastate.edu/card_workingpapers/.
- Latorre, A., Lovino, V., y Caradonia, F. 2018. Copper in plant protection: current situation and prospects. *Phytopathol. Mediterr.* 57: 201–236.
- Lee, K.S., Choe, Y.C., y Park, S.H. 2015. Measuring the environmental effects of organic farming: a metaanalysis of structural variables in empirical research. *J. Environ. Manag.* 162:263–74.
- Letourneau, D., y van Bruggen, A. H. C. 2006. Crop protection in organic agriculture. Págs. 93-121, en: P. Kristiansen, A. Taji, y J. Renagold, eds. *Organic Agriculture. A Global Perspective* CSIRO Publishing & CABI Publishing.
- Marchand, P.A. 2015. Basic substances: an opportunity for approval of low-concern substances under EU pesticide regulation. *Pest Manag. Sci.* 71: 1197-200. doi: 10.1002/ps.3997.
- McBride, W.D., y Greene, C. 2008. The profitability of organic soybean production. American Agricultural Economics Association Annual Meeting, Orlando, Florida.
- McBride, W.D., Greene, C., y Mir Ali, L. F. 2012. The structure and profitability of organic field crop production: The case of wheat. Selected paper Agricultural and Applied Economics Association's 2012 Annual Meeting, Seattle.
- Navarro, A., y García Azcarate, T. 2019. ¿Qué actividad en la España vacía? *Econ. Agrar. Recur. Nat.* 19. 9. 10.7201/ea
- Navas-Cortés, J.A., Hau, B., y Jiménez-Díaz, R.M. 1998. Effect of sowing date, host cultivar, and race of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* on development of Fusarium wilt of chickpea. *Phytopathology* 88: 1338-1346.
- Porcuna, J-L., Gaude, M.I., Castejón, P., y Roselló, J. 2010. Guía de Agricultura Ecológica de Cultivos Hortícolas al Aire Libre. FE-COAV. Valencia.
- Rabbinge, R. 1993. The ecological background of food production. Págs. 2-29, en: Crop protection and sustainable agriculture. Ciba Foundation Symposium 177. Wiley. Chichester.
- Reeve, J.R., Hoagland, L.A., Villalba, J.J., Carr, P.M., Atucha, A., y Cambardella, C. 2016. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. Págs. 319-367, en D.I. Spaks. *Organic Farming, Soil Health and Food quality: Considering Possible Links.* Advances in Agronomy. Academic Press, Massachusetts, USA.
- Reganold, J.P., y Watcher, J.M. 2016. Organic agriculture in the twenty first century. *Nature Plants:* 15221 |doi: 10.1038/NPLANTS.2015.221plants.15221.
- Schonbeck, M. 2007. Beating the weeds with lowcost cover crops, intercropping and steel. *The Virginia Biological Farmer* 30: 7-8.
- Seufert, V., Ramankutty, N., y Foley, J. 2012. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature* 485: 229-232.
- Shahbandeh, M. 2022. Worldwide sales of organic foods 1999-2020. <https://www.statista.com/statistics/273090/worldwide-sales-of-organic-foods-since-1999/>.
- Shennan, C., Krupnik, T.J., Baird, G., Cohen, H.K., Forbush, K., Lovel, R.J., y Olimpi, E.M. 2017. Organic and conventional agriculture: A useful framing? *Annu. Rev. Environ. Resour.* 42: 317–46.
- Smith-Spangler, C., Brandeau, M.L., Hunter, G.E., Bavinger, C., Pearson, M., et al. 2012. Are organic foods safer or healthier than conventional alternatives? A systemic review. *Ann. Intern. Med.* 157: 348–366.
- STOA. 2021. The future of crop protection in Europe. Panel for the Future of Science and Technology EPRS. European Parliamentary Research Service Scientific Foresight Unit (STOA) PE 656.330.
- Torres, J., Valera, D.L., Belmonte, L., y Herrero-Sánchez, C. 2016. Economic and social sustainability through organic agriculture: study of the restructuring of the citrus sector in the "Bajo Andarax" District (Spain). *Sustainability* 8: 918 160.
- van Bruggen, A.H.C., Gamliel, A., y Finckh, M.R. 2016. Plant disease management in organic farming systems. *Pest Manag. Sci.* 72: 30–44.
- Verraro, V. 2019. Control of *Xylella fastidiosa* in organic olive oil production. Organic Innovation Days (X-F ACTORS project). December 2019, Brussels.
- Winqvist, C., Ahnstrom, J., y Bengtsson, J. 2012. Effects of organic farming on biodiversity and ecosystem services: taking landscape complexity into account. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1249: 191–203.
- Youngberg, G., (Chair). 1980. Report and recommendations on organic farming. Prepared by USDA Study Team on Organic Farming. United States Department of Agriculture, July 1980.
- Zehnder, G.Z., Geoff, M., Gurr, G.M., Kühne, S., Wade, M.R., Wratten, S.D., y Wyss, E. 2007. Arthropod pest management in organic crops. *Annu. Rev. Entomol.* 52:57–80.



**PERSPECTIVAS
EN LA MEJORA
DE LA SANIDAD
VEGETAL MEDIANTE
INNOVACIONES
BIOLÓGICAS Y
TECNOLÓGICAS**

C. Perspectivas en la mejora de la Sanidad Vegetal mediante innovaciones biológicas y tecnológicas

C1. Capítulo C1. Nuevas tecnologías para el diagnóstico de plagas y enfermedades de plantas agrícolas y forestales: retos y perspectivas

C1.1. Necesidad del diagnóstico fiable de plagas, enfermedades y malas hierbas en el siglo XXI

El diagnóstico preciso de una plaga o enfermedad, así como la identificación de una mala hierba, son requisitos indispensables tanto para su control como para prevenir su introducción (mediante normas regulatorias del transporte de material vegetal) y para mantener la sostenibilidad de los cultivos (FAO, 2016). Aunque en otros capítulos de este libro se menciona que el término plaga (*sensu lato*) se refiere a tres tipos de agentes nocivos (artrópodos fitófagos, patógenos y malas hierbas), en este capítulo se reserva el término plaga solo para los artrópodos fitófagos, por motivos relacionados con las diferencias en su diagnóstico, detección o identificación.

El término diagnóstico alude en este capítulo a la determinación de la naturaleza del agente causante de una plaga o enfermedad de forma general y, por tanto, concierne tanto a los artrópodos fitófagos como a organismos fitopatógenos (fanerógamas parásitas, nematodos, protozoos, hongos y oomicetos, bacterias, y virus y viroides) en las plantas con síntomas de ellos.

En cambio, la detección se usa aquí cuando se refiere al análisis de la presencia de artrópodos fitófagos o de agentes fitopatógenos en muestras asintomáticas de plantas, semillas u otro material de propagación, así como en agua, suelo o sustratos, herramientas, contenedores, maquinaria, instalaciones, etc.

Finalmente, la determinación o identificación pretende situar taxonómicamente y dar nombre científico a un artrópodo, mala hierba o a un organismo causante de enfermedad, tras ser diagnosticado o detectado, y se basa en las características comunes que comparten los miembros de una especie, subespecie, raza, patotipo o patovar y que las diferencian de otros.

Es necesario indicar que las características morfológicas de los artrópodos fitófagos, y también de las malas hierbas de los cultivos, permiten generalmente llegar a su identificación directamente mediante observación visual y comparación con claves taxonómicas; mientras que en el caso de las enfermedades, para determinar el agente causal de unos síntomas (o su presencia en plantas infectadas asintomáticas) no es suficiente la simple observación visual de las plantas afectadas, ya que los síntomas pueden coincidir con los debidos a otras causas bióticas o abióticas (o no ser observables) y ello hace necesario realizar análisis específicos, en laboratorio o campo. Además, la aplicación de medidas de prevención estrictas o de Gestión Integrada de Plagas, enfermedades y malas hierbas (GIP) requiere la

utilización previa de técnicas muy fiables de análisis, que deben ser rápidas, específicas, sensibles y precisas, dado que ciertos artrópodos fitófagos y muchos patógenos pueden permanecer latentes, en niveles poblacionales muy bajos o subclínicos, o en estados fisiológicos particulares, que dificulten su correcta detección e identificación.

Como se indica en otros capítulos, el comercio internacional de vegetales entraña riesgos de introducción, que se corresponden con la entrada, establecimiento y diseminación de organismos nocivos exóticos según la terminología de la *European Food Safety Authority* (EFSA, Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria), o de los considerados como especialmente perjudiciales para la agricultura o masa forestal de distintas zonas, sometidos también en la Unión Europea (UE) a regulación específica. Por ello, cada Estado miembro tiene la potestad de rechazar las importaciones (de terceros países) de estos productos que pueden contener organismos exóticos si no cumplen determinados requisitos fitosanitarios. Asimismo, en los países de la UE se deben realizar prospecciones y análisis respecto de organismos nocivos exóticos sometidos a regulación, utilizando protocolos estandarizados, a fin de evitar su introducción o diseminación; y si se introducen, delimitar con bases analíticas las zonas afectadas y las zonas tampón, así como llevar a cabo erradicaciones obligatorias para impedir o frenar la diseminación de los agentes exóticos en nuevos territorios (cf., Capítulo B1.). Todo ello, requiere de la disponibilidad de métodos rápidos y precisos de diagnóstico, y a ser posible, robustos, de aplicación sencilla para el usuario y aplicables a gran escala de forma económicamente sostenible.

La Comisión Europea (CE) ha publicado una nueva legislación sobre los organismos nocivos de alto riesgo como se detalla en el Capítulo B1., tras haber reevaluado varios de ellos para actualizar su situación fitosanitaria, de acuerdo a los avances técnicos y conocimientos científicos más recientes. El nuevo reglamento modificado establece una lista de plagas cuarentenarias de la UE, de plagas cuarentenarias de zonas protegidas dentro de la UE y de plagas reguladas no cuarentenarias de la Unión (DOUE, 2016), así como los requisitos para la introducción o el traslado de determinados vegetales. Los organismos nocivos declarados plagas cuarentenarias prioritarias o reguladas por la CE en 2019 (DOUE, 2019, 2021) son artrópodos fitófagos y nematodos, hongos, bacterias y virus de la máxima prioridad e incluyen a bacterias o bacteriosis de diagnóstico muy complejo, como *Xylella fastidiosa* y el huanglongbing-HLB de los cítricos (*greening*) o micosis como la mancha negra que afecta también a los cítricos. Sin embargo, las especies vegetales exóticas invasoras o malas hierbas de riesgo para la agricultura y masas forestales no figuran en la legislación española, a pesar de existir un catálogo de especies vegetales invasoras (BOE, 2013; Recasens, 2018) y tampoco aparecen en la lista de la UE de los organismos nocivos regulados, pero sí en las de la *European and Mediterranean Plant Protection Organization* (EPPO).

Además, dado que la UE es un espacio sin fronteras interiores, se requiere una distinción entre los requisitos aplicables al movimiento de productos de países comunitarios por una parte y a las importaciones de terceros países por otra. Respecto al primer caso, para los vegetales producidos en la UE se deben realizar controles fitosanitarios obligatorios (que no siempre incluyen pruebas analíticas sino únicamente observaciones visuales y son, por lo tanto, prácticamente ineficientes a muchos efectos diagnósticos) en el lugar de producción, en todos los vegetales y productos señalados en la legislación de la UE. Si los resultados de los controles son satisfactorios, estos productos comunitarios deben ir provistos de un distintivo denominado pasaporte fitosanitario, que garantiza que han sido inspeccionados, pero no su sanidad absoluta, como se ha demostrado en muchas ocasiones al diagnosticarse distintas enfermedades –causadas por organismos de cuarentena o regulados como *Erwinia amylovora* en España y otros países–, en material vegetal importado de países de la UE y con dicho pasaporte.

Por otra parte, los productos originarios de terceros países sí deberán someterse a los controles fitosanitarios oficiales pertinentes en la frontera del país en el que sean introducidos por primera vez en la UE. Dichos controles suelen incluir inspecciones de muestras de los mismos tomadas al azar -o según protocolos oficiales como en el caso de muestras de plantas huéspedes de *X. fastidiosa*-, seguidas, al menos en España, de pruebas analíticas según los protocolos oficiales de la EPPQ, *International Plant Protection Convention* (IPPC) de la FAO u otros, en las muestras sospechosas. Dichas pruebas son realizadas en los Laboratorios de Referencia oficiales del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) para verificar la ausencia en dichos productos de organismos nocivos presentes en los países de origen.

Las sucesivas oleadas de la pandemia de la COVID-19 en los años 2020 y 2021 han evidenciado, a nivel mundial, el papel clave y la importancia de la disponibilidad de laboratorios expertos en diagnóstico de todo tipo de enfermedades, humanas, de animales y también de plantas, así como de técnicas rápidas y fiables para ello. Aunque no siempre sea percibido por los medios de difusión ni por la ciudadanía, es necesario resaltar que para llevar a cabo la protección de los cultivos y masas forestales en la UE y evitar la importación de organismos nocivos de los mismos, también se requieren técnicos expertos y protocolos optimizados de inspección, muestreo y análisis, específicos, normalizados y acreditados, de forma similar a los requeridos para mantener la salud humana y la producción animal. Las técnicas y protocolos de diagnóstico, detección e identificación se requieren especialmente para la detección de todas las plagas consideradas como cuarentenarias y de las plagas reguladas no cuarentenarias (así como para las demás plagas, enfermedades y malas hierbas que no están reguladas, pero tienen impacto para ciertos cultivos en España), y en los últimos años se han logrado enormes avances en la rapidez, sensibilidad, especificidad y precisión del diagnóstico (Baldi y La Porta, 2020). Las mejoras en las técnicas moleculares basadas en la detección de ADN y ARN amplificados, especialmente la técnica de la reacción en cadena de la polimerasa (*Polymerase Chain Reaction-PCR*), y en particular la PCR en tiempo real, han permitido desarrollar métodos de análisis rápidos y fiables para un creciente número de organismos nocivos, pero también se utilizan otras técnicas basadas en distintos principios, como se resume en los siguientes apartados.

C1.2. Métodos de identificación de insectos y ácaros

Se han descrito más de 10.000 especies de insectos plaga y su clasificación en la mayoría de los laboratorios todavía está esencialmente basada en sus características morfológicas, biológicas y ecológicas. Ello ha sido facilitado en las últimas décadas por la disponibilidad de bancos de datos morfológicos basados en fotografías de las distintas especies y la tecnología de reconocimiento de imágenes, que hace posible su clasificación rápida. Numerosas webs de organismos públicos como la del *Centre for Agriculture and Bioscience International* (CABI) <https://www.cabi.org> o la *Royal Entomological Society* <https://www.royalsoc.co.uk>, proporcionan información de gran utilidad para una rápida identificación de artrópodos fitófagos y en muchos casos también consejos para su control químico o gestión integrada. Recientemente se ha desarrollado en China un conjunto de datos estandarizado llamado Pest24, que consiste en más de 25.000 imágenes de plagas tomadas en campo y reúnen las más destructivas en ese país (Wang et al., 2020). En India ha sido posible clasificar diferentes especies de insectos en tiempo real con más de un 90 % de aciertos, en base a fotos tomadas en condiciones de campo en diversos cultivos con máquinas de inteligencia artificial y algoritmos especializados en identificación de insectos (Chakravarthy, 2015).

Los criterios para la clasificación de especies de insectos y ácaros han variado a lo largo de los años, al mismo tiempo que lo hacía el conocimiento de su filogenia y a medida que la información molecular

sobre insectos iba en aumento. Actualmente, la clasificación precisa de insectos y ácaros presenta ciertas dificultades, ya que requiere conocer al menos una veintena de tipos de características para definir a las especies, incluyendo su biología, ecología, epidemiología, evolución, filogenia, genética y morfología, entre otros. La taxonomía de insectos debe ser integrativa y plural para mejorar el descubrimiento y descripción de nuevas especies, y para el desarrollo de nuevos protocolos de determinación más precisa especialmente de los insectos y ácaros que constituyen plagas de los cultivos y masas forestales. Por ello, junto a las características morfológicas y biológicas, debe incluir datos sobre su ADN y su filogenia.

Respecto a las características moleculares, todos los artrópodos tienen varios genomas: mitocondrial, nuclear y ADN de endosimbiontes (virus, bacterias y levaduras) que viven asociados al artrópodo que se pretende identificar. Cada uno de dichos genomas tiene distintas características de transmisión, origen filogenético y tasa de variación, lo cual dificulta la selección de los mejores marcadores para desarrollar técnicas moleculares de identificación. La taxonomía integrativa de estos organismos tiene en cuenta la taxonomía tradicional y la amplificación de determinados fragmentos del ADN mediante técnicas que permiten la identificación de ciertos taxones. La secuenciación de ADN de insectos y ácaros ha aportado nueva información sobre la entomofauna de los ecosistemas agrícolas, especialmente la basada en secuencias del ADN mitocondrial y del ADN ribosómico nuclear. Así, por ejemplo, la identidad de secuencias con un 10 % de divergencia ha servido para delimitar distintas especies en la subclase *Acari* (Matsuda et al., 2013)

Por una parte, el uso del procedimiento de codificación de barras general, procede en orden a través de las etapas de extracción de ADN, amplificación por PCR, secuenciación y análisis de datos. Se utilizan diferentes genes dependiendo de si el objetivo es codificar en barras una sola especie o metabarcodificar varias especies. El *DNA barcoding* o código de barras del ADN está basado generalmente en la amplificación de fragmentos de la subunidad I del gen *mitochondrial cytochrome c oxidase* (COI) (citocromo oxidasa c) y ha servido para identificar diversas especies de insectos plaga (Piper et al., 2019; EPPO, 2021). El protocolo se basa en comparar, mediante procedimientos estandarizados, la secuencia del espécimen problema con las secuencias disponibles en ciertas bases de datos, como GenBank® (base de datos de secuencias genéticas del NIH (*National Institute of Health* de EE. UU.) que reúne una colección de todas las secuencias de ADN disponibles públicamente. Por tanto, este sistema únicamente permite la identificación de especies previamente secuenciadas. Para superar este inconveniente, recientemente se ha recurrido a la tecnología de procesado masivo de secuencias denominada *metabarcoding* o metacódigo de barras de ADN, que permite la identificación simultánea de muchos taxones dentro de la misma muestra. La principal diferencia entre el código de barras y el código de barras meta es que este último no se enfoca a un organismo específico, sino que tiene como objetivo determinar la composición más o menos completa de las especies de insectos presentes, tras obtener una enorme cantidad de secuencias que permite identificar los individuos presentes en comunidades de insectos, e incluso llegar a definir nuevas especies, tras un único análisis. Por ejemplo, esta nueva tecnología se puede utilizar para identificar las especies recogidas en una trampa y detectar las posibles especies invasoras.

Por otra parte, los estudios filogeográficos, ya sea entre especies de insectos o dentro de una misma especie, son de gran interés porque permiten conocer cómo ha tenido lugar la colonización de insectos plaga o de vectores invasores de patógenos tras haber sido introducidos en nuevas zonas. Asimismo, también se han usado métodos moleculares para identificar los organismos de control biológico de utilidad para el manejo de una determinada plaga, así como para estudiar las redes tróficas en ecosistemas agrícolas y su impacto en el control biológico de las plagas presentes en el cultivo (Batuecas et al., 2022). Es de esperar que, conforme aumente el número de secuencias de insectos y

ácaros disponibles en GenBank®, se puedan realizar más estudios que permitan avanzar tanto en la taxonomía de los artrópodos fitófagos, como de sus posibles agentes de control biológico, así como de otros componentes de la entomobiota de los ecosistemas agrícolas.

C1.3. Métodos de diagnóstico y detección de virus, viroides, bacterias, hongos, oomicetos y nematodos

Los tipos de muestras de análisis para el diagnóstico o la detección de patógenos son muy variados, ya que estos organismos nocivos pueden estar en los tejidos afectados o encontrarse sobreviviendo como residentes en uno o varios reservorios, que incluyen: (i) plantas, estaquillas y semillas u otro material vegetal contaminado o infectado; y (ii) material vegetal en descomposición, suelo, agua o lixiviados de riego, plantas no huésped, insectos u otros vectores; o (iii) en instalaciones como viveros, en bancadas, bandejas, vestimenta de operarios, herramientas, utensilios y maquinaria agrícola, etc. Esta enorme variedad de posibilidades requiere disponer de información, por un lado sobre el tipo de inspección y de muestreo a realizar y la muestra concreta a tomar en cada caso, que dependerá de la técnica analítica que va a ser utilizada; y por el otro del organismo u organismos que afectan al huésped analizado y del protocolo o la técnica más adecuados para el análisis diagnóstico, con sus límites de sensibilidad y con un riesgo de resultados falsos positivos o de falsos negativos, que dependen tanto de la especificidad del protocolo como de los reactivos serológicos, moleculares, u otros disponibles y utilizados.

Una revisión detallada de las técnicas más usadas en diagnóstico fitopatológico se puede encontrar en De Boer y López (2012) y en López et al. (2019). El diagnóstico rápido y preciso resulta particularmente necesario para los organismos nocivos de alto riesgo, lo que requiere en muchos casos unas normas de muestreo basadas en datos experimentales y la aplicación de **protocolos integrados**, como los de la EPPO (<https://www.eppo.int/>), de la IPPC-FAO (<https://www.ippc.int/id/ispms>) o de la *International Seed Testing Association* (ISTA), que actualmente incluyen pruebas iniciales rápidas o de cribado (*screening*) seguidas de la confirmación mediante otras técnicas de referencia o estándares de oro (*gold standards*) más precisas (con elevada sensibilidad y especificidad analíticas y valores predictivos de positivos y negativos óptimos), y que en muchos casos requieren además la verificación de la patogenicidad. Ejemplos de todo ello son las normas de inspección y especialmente el protocolo de análisis de *X. fastidiosa*, que han sido preparados por paneles de expertos europeos con el apoyo de otros internacionales. Dichas normas y protocolo se redactaron por encargo de la CE tras la detección de la bacteria en Italia en 2013 y se actualizan periódicamente desde entonces (EPPO, 2019 y 2020 a, b).

Las técnicas convencionales de diagnóstico y detección de patógenos, que eran las más utilizadas hasta finales del siglo XX, incluyen entre otras pruebas y según el tipo de organismo de interés: (i) observación visual directa de los síntomas morfológicos y la de los síntomas cito-histológicos mediante microscopía óptica o electrónica; (ii) **aislamiento en cultivo puro del organismo patógeno** seguido de pruebas biológicas (inoculación de plantas huéspedes o especies afines para observar los síntomas y de reaislamiento, según los postulados de Koch, o inoculación por injerto en plantas indicadoras o indexación, en el caso de virus y fitoplasmas; (iii) pruebas bioquímicas y fisiológicas; y (iv) análisis de perfiles de ácidos grasos, proteínas o ciertos metabolitos específicos, etc. También, en determinados modelos, se aplican técnicas de hibridación molecular de ácidos nucleicos. El problema que subyace en dichas técnicas convencionales es que algunas de ellas requieren la obtención de un cultivo puro del microorganismo problema, que suele ser necesario para muchos hongos y bacterias, y algunos oomicetos, o la extracción de nematodos fitoparásitos de tejidos

afectados o del suelo. Todas estas pruebas son muy útiles, pero algunas como las de aislamiento y especialmente las inoculaciones pueden durar semanas o incluso meses y requieren instalaciones adecuadas equipadas para realizar múltiples determinaciones y personal con experiencia en la realización e interpretación de las mismas.

Otro tipo de técnicas, como las **serológicas o inmunológicas**, presentan muchas ventajas, especialmente por su rapidez, y siguen siendo actualmente muy utilizadas para un diagnóstico o detección rápido, sobre todo en el diagnóstico de bacteriosis y virosis. Las técnicas serológicas son rápidas y se basan en la obtención previa de antisueros (anticuerpos policlonales) o de anticuerpos monoclonales o recombinantes específicos. Pueden ser de varios tipos y generalmente utilizan conjugados con moléculas que puedan ser detectadas y actúan como deladoras o marcadoras (enzimas, fluorocromos, biotina, avidina, oro coloidal, entre otras) que faciliten la posterior visualización de la reacción. Las más empleadas actualmente son la **inmunofluorescencia (IF)**, las **técnicas inmunoenzimáticas como *Enzyme Linked Immunosorbent Assay* (ELISA)**, la **inmunoimpresión directa (*Tissue print-ELISA* o *Direct Tissue blot Immunoassay-DTBIA*)** y las **pruebas de antígenos o tiras inmunológicas de flujo lateral (LFD)**, como las que se usan actualmente para el diagnóstico de la COVID-19. La inmunofluorescencia, y sobre todo ELISA y la variante de inmunoimpresión-ELISA, han sido muy utilizadas en la detección de virus y bacterias desde finales de la década de 1970, y lo siguen siendo para análisis masivos en muestras de zonas con alto nivel de inóculo o de elevada prevalencia de la enfermedad, siendo especialmente fiables si se utilizan con anticuerpos monoclonales específicos (De Boer y López, 2012). Para bacterias, suelen ser combinadas con una etapa de enriquecimiento previo en medios selectivos o semiselectivos y en condiciones óptimas para cada especie. Las técnicas de flujo lateral son de fácil realización y corto tiempo de reacción, pero suelen ser menos sensibles que otras como ELISA o las técnicas moleculares de amplificación, como PCR en tiempo real. **Las técnicas serológicas o inmunológicas, en general, permiten realizar numerosos análisis, incluso sin necesidad de preparar extractos de la muestra y son sostenibles, económicas, sencillas y posibilitan su uso a personal no experto, poseen bajos riesgos de contaminación entre muestras (contaminación cruzada) y alguna de ellas admiten incluso su uso en condiciones de campo.** Además, hay disponibles kits comerciales que garantizan el acceso popular al diagnóstico serológico preciso, que son recomendados en estándares de diagnóstico internacionales como los de la EPPO o IPPC-FAO, tras su validación (López et al., 2019). El coste medio de una reacción serológica oscila desde unos 0,25 €/muestra para inmunoimpresión hasta alrededor de 3,0 €/muestra para ELISA convencional. Algunas de estas técnicas serológicas constituyen todavía el estándar de oro del diagnóstico o técnica de referencia, como inmunoimpresión-ELISA para detección del virus de la tristeza de los cítricos en viveros, o para prospecciones en cultivos a gran escala, basadas en anticuerpos monoclonales específicos (De Boer y López, 2012; Vidal et al., 2012a y b).

Actualmente, las técnicas más utilizadas para el diagnóstico o detección de patógenos son las moleculares, principalmente las basadas en la amplificación del ADN mediante la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), especialmente la PCR en tiempo real, o con previo uso de transcriptasa inversa (RT-PCR) para virus de ARN y viroides. Estas técnicas se tratan a continuación, junto con las denominadas LAMP y de NGS o HTS, que son todas técnicas de alta sensibilidad y especificidad analíticas.

La PCR constituye frecuentemente el estándar de oro o técnica de referencia para la detección de algunos patógenos de plantas desde la década de 1990, pero presenta el inconveniente de tener un coste medio-alto. La PCR precisa de termocicladores de elevado precio en la variante de tiempo real que es la más usada en los últimos 10 años y requiere experiencia en laboratorio, lo que hace difícil su aplicación extensiva en ciertos países. La elevada sensibilidad de esta técnica tiene el

coste añadido del riesgo de contaminaciones entre muestras (debido a su alta sensibilidad) con el resultado de falsos positivos (baja especificidad analítica), especialmente si se realiza una purificación previa de ácidos nucleicos (que puede dar lugar a la formación de aerosoles con el ADN diana) y que muchas veces es necesaria en el análisis de hongos, oomicetos y bacterias antes de realizar la reacción de amplificación. Por ello, se han diseñado y comercializado kits completos de PCR en tiempo real, basados en sistemas directos de preparación de muestras de campo (sin necesidad de extraer ni purificar ácidos nucleicos diana) para ser usados con protocolos robustos de alta sensibilidad (López et al., 2019). El coste de base del análisis de una muestra por PCR en tiempo real es de unos 5-10 €/muestra si se utilizan ácidos nucleicos purificados, frente a alrededor de 3 €/ muestra si se utilizan sistemas directos de preparación de muestras (que son algo menos sensibles, pero suficientes en muchos casos, y están validados) (Capote et al., 2009; Bertolini et al., 2014; Cambra et al., 2019). La necesidad de disponer de resultados en pocas horas hace que la técnica de PCR en tiempo real esté actualmente considerada como la de referencia en el diagnóstico de muchos patógenos de plantas, al igual que en el caso de numerosos patógenos humanos y de interés veterinario. El resultado positivo, en casos de gran trascendencia del diagnóstico, como para las plagas cuarentenarias, debe ser confirmado con técnicas basadas en otros principios biológicos como se indica en los protocolos EPPO y otros. Generalmente se prefiere usar para el análisis inicial la técnica de mayor especificidad y buena sensibilidad analíticas y confirmar posteriormente los positivos con otras, pero algunos organismos privados, como ciertas empresas productoras de semillas, suelen utilizar protocolos de menor sensibilidad.

En los protocolos de PCR en tiempo real, la amplificación del ADN o ARN de la muestra permite la detección y cuantificación del organismo diana en un único proceso si está presente en el extracto, usando termocicladores. Se utilizan para ello uno o varios fluorocromos que aumentan la señal emitida en proporción directa a los productos de amplificación del ADN diana, conforme se van acumulando tras cada ciclo de la PCR. Por ello, el uso de dichas técnicas permite cuantificar los niveles de inóculo del patógeno en la muestra y se ha convertido en la técnica de referencia para el diagnóstico y la detección, a pesar del coste elevado por reacción, del precio de adquisición de los equipos necesarios y de la experiencia requerida al operador. Los productos amplificados se diferencian mediante el análisis de sus respectivas curvas de fusión. Como los niveles de fluorescencia en la PCR en tiempo real están basados en valores numéricos, estos se pueden interpretar como datos cualitativos y confirmar si una muestra es positiva o negativa, o como datos cuantitativos, indicativos de la concentración del patógeno en la matriz de análisis y por ello se denomina también a la PCR en tiempo real, PCR cuantitativa (qPCR). Esta PCR también es muy útil en epidemiología para establecer niveles de inóculo con fines predictivos en la gestión integrada de las enfermedades. La automatización mediante robots de los distintos pasos en las pruebas analíticas (preparación de la muestra, extracción de ácidos nucleicos, amplificación y detección de amplificados), se usa cada vez más, ya que minimiza los riesgos de contaminación y facilita el procesado de un elevado número de muestras, aunque incrementa significativamente el coste por muestra. La PCR digital es similar a la PCR en tiempo real, pero se basa en la separación de la muestra inicial en gran cantidad de alícuotas que son amplificadas individualmente lo que permite la cuantificación precisa y absoluta del producto amplificado. Se obtiene mayor sensibilidad que con la PCR en tiempo real, hay menor efecto negativo de inhibidores y requiere baja cantidad de reactivos, pero los equipos tienen en la actualidad un coste más elevado (López et al., 2019).

Mediante la técnica **LAMP** (*Loop Mediated Isothermal Amplification*), o amplificación isotérmica mediada por bucle, se amplifica el ADN a una sola temperatura y no requiere el uso de termocicladores, ya que se puede realizar en baño termostático y la amplificación puede observarse visualmente mediante colorimetría, fluorescencia, etc. Su utilización se está incrementando en el diagnóstico de

muestras que requieren sencillez y rapidez, bajo coste económico y la posibilidad de su uso *in situ* en campo o en vivero, utilizando equipos portátiles. Sin embargo, hasta ahora en muchos casos no se suele conseguir el mismo nivel de sensibilidad analítica que con la PCR en tiempo real (López et al., 2019).

La secuenciación masiva o NGS (*Next Generation Sequencing*, secuenciación de próxima generación) o HTS (*High-Throughput Sequencing*, secuenciación de alto rendimiento) que ha revolucionado la biología molecular en todos sus campos, consiste en realizar múltiples secuencias cortas de modo paralelo, produciendo millones de lecturas al mismo tiempo y a un coste relativamente bajo. Como en el caso de los insectos, esta tecnología permite la secuenciación de todo el genoma de un microorganismo, o de partes muy representativas de aquel, o de la mayoría de los que están presentes en una muestra vegetal (los cultivables y los no cultivables), y sirve tanto para la detección de microorganismos ya conocidos como de otros no descritos previamente. Como ejemplo, la tecnología de la plataforma de Oxford *Nanopore* es portátil y puede secuenciar ADN o ARN aislados de tejidos de plantas conteniendo microorganismos patógenos y saprofitos (bacterias, hongos, oomicetos, virus, viroides, nematodos, o infecciones mixtas de varios patógenos distintos), identificar a los patógenos por las secuencias que se obtienen automáticamente, y tras un análisis bioinformático complejo proporcionar información sobre la identidad de todos los microorganismos presentes (Olmos et al., 2018). El abaratamiento del coste de este tipo de tecnologías está permitiendo ampliar la frecuencia de su uso, incluso por compañías o laboratorios privados que ofertan estos análisis de muestras. Las técnicas HTS han demostrado ser una herramienta muy valiosa en la identificación de mezclas de genotipos dentro de una sola planta. Con la ayuda de esta tecnología se facilita el estudio de las interacciones entre diferentes microorganismos, desvelando con ello mecanismos de patogénesis y del desarrollo de enfermedades. También se usa para el estudio de interacciones planta-patógeno-vector a través de análisis transcriptómicos o para estudios de mecanismos de resistencia, que al final podrían conducir al desarrollo de nuevas herramientas de control (Ruiz-García y Olmos, 2021).

En general, tal y como se efectúa en salud humana y veterinaria, la selección de una técnica de detección o diagnóstico debe de estar basada en la idoneidad de sus parámetros de diagnóstico, es decir, en aquellos datos, factores o valores numéricos que se toman como necesarios para evaluar la fiabilidad de un análisis o prueba de laboratorio, que se describen en el Apartado C1.5. En el caso de las enfermedades, los principales parámetros son: (i) sensibilidad y especificidad analíticas; (ii) precisión analítica; (iii) el valor predictivo de positivos y negativos; y (iv) la razón de verosimilitud tanto positiva como negativa (Vidal et al., 2012 a). Además, la elección de una técnica de diagnóstico o detección debe basarse en la prevalencia esperada del patógeno en la población a muestrear que, aunque no se trate de un parámetro de diagnóstico, posee gran influencia en la estima de los mismos.

La identificación del patógeno suele ser la etapa final del diagnóstico o detección porque precisa la identidad taxonómica del organismo problema a nivel de género, especie y subespecie, patovar o raza, según corresponda. Para ello se utilizan varias técnicas, como las anteriormente indicadas para diagnóstico y detección, combinando las basadas en distintos principios (biológicos, bioquímicos, fisiológicos, serológicos y las basadas en ácidos nucleicos o moleculares). Además, se suelen incluir características fenotípicas y morfológicas, y la verificación de la patogenicidad que sigue siendo básica para muchos hongos y bacterias, y algunos oomicetos, en particular, porque la profusión de infecciones por cepas de ellos que son endofitas y no patogénicas hace cuestionable la asignación directa de dicha cualidad al microorganismo detectado en un tejido. Un ejemplo ilustrativo de esto último concierne la expansión mundial de la raza tropical 4 (TR4) de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, agente causante del mal de Panamá del plátano, que en la actualidad devasta plantaciones del cv. Cavendish resistente a la raza 1 del patógeno. La necesidad de detectar dicha raza TR4 en rizomas

-objeto de transporte internacional- por la amenaza que representa su reciente expansión geográfica, motivó el rápido desarrollo de iniciadores para PCR presumiblemente específicos, alguno de los cuales fueron adoptados por la Organización Internacional Regional para la Sanidad Agropecuaria (OIRSA, *International Regional Organization for Agricultural Health*) y la FAO para sus planes de contingencia en América Latina y países caribeños. Magdama et al. (2019) observaron que dichos iniciadores se habían desarrollado basados únicamente en comparaciones entre aislados patogénicos de plátano, y que solo en algún caso se habían utilizado un número muy escaso de aislados no patogénicos de *F. oxysporum*. Puesto que estos últimos no eran representativos de la amplia diversidad de las poblaciones endofitas de *F. oxysporum* en plátano, dichos autores pusieron a prueba la especificidad de cuatro iniciadores PCR para la identificación de la raza TR4, utilizando una amplia colección de aislados de *F. oxysporum* f. sp. *cubense* y de aislados de *F. oxysporum* endofitos en plátano de Ecuador. Los análisis filogenéticos, la comparación de secuencias y diversas pruebas biológicas, incluyendo patogenicidad, que emplearon en dicho estudio, demostraron que tres de los cuatro marcadores carecían de la presumida especificidad y eran inadecuados a efectos de la identificación y detección de la raza TR4 con fines regulatorios, al dar lugar a falsos positivos, porque ciertos aislados endofitos y no patogénicos de *F. oxysporum* comparten regiones genómicas con los aislados patogénicos (Magdama et al., 2019).

La conveniencia de realizar pruebas de patogenicidad en el proceso diagnóstico de micosis vegetales viene además determinada por el **estado de flujo en que se encuentra la taxonomía micológica en la actualidad y la significación fitopatológica de las variantes patogénicas** (Monte et al., 2021). El análisis molecular de los genomas fúngicos, y el concepto filogenético de especie fúngica, han puesto de manifiesto que un número importante de especies morfológicas -esto es, las identificadas en base a criterios estrictamente morfológicos- constituyen **complejos de especies que pueden incluir especies crípticas**. Es decir, son grupos fúngicos morfológicamente indistinguibles entre sí para los que se puede inferir aislamiento reproductivo (Bickford et al., 2006), que pueden diferir significativamente en propiedades fitopatogénicas. Por ejemplo, Inderbitzin et al. (2011) compararon un gran número de aislados de la morfoespecie *Verticillium albo-atrum*, y concluyeron que esta comprende dos especies crípticas, *V. alfalfae* y *V. nonalfalfae*, junto con otra morfológicamente distinguible de ellas para la que retuvieron el epíteto específico *V. albo-atrum*. Mientras que *V. albo-atrum* y *V. alfalfae* son patogénicos en patata y alfalfa, respectivamente, *V. nonalfalfae* causa importantes pérdida de cosecha en algodón, apio, espinaca, lúpulo, patata, petunia, tomate y es letal en la especie arbórea *Alianthus altissima* (Inderbitzin y Subbarao, 2014). Por ello, es aconsejable mantener una actitud de cautela respecto de la fidelidad de las bases de datos a efectos de comparación de secuencias con fines de identificación; por ejemplo, recientemente se ha cuestionado la validez del código de barras del ADN basado en una sola secuencia génica, como la región intergénica del ARN ribosómico (ITS), y se ha recomendado que la delimitación de especies fúngicas se base en más de un locus (multilocus), que presumiblemente sean evolutivamente neutrales (Dugan y Everhart, 2016).

Las técnicas serológicas y moleculares, en general, pueden carecer de la especificidad deseada y ello hace necesario confirmar con la máxima precisión la naturaleza del patógeno problema detectado, sobre todo si se trata de un organismo de cuarentena. Esto ha llevado a la implantación de protocolos estandarizados en la UE y región EPP0 (ver *Standards en Diagnostic PM7* en <https://gd.eppo.int>), o a nivel más amplio por la IPPC de la FAO (ver *Standards en https://ippc.int*). Existen **protocolos EPP0 para algunos organismos nocivos que tratan tanto de la inspección del material vegetal comercializado, como la de los lugares de producción y el tipo de muestreo más adecuado, y que abordan el diagnóstico, detección e identificación mediante la combinación de técnicas de aislamiento microbiano, serológicas, moleculares y de comprobación de patogenicidad en protocolos integrados o polifásicos** (De Boer y López, 2012). Ejemplos de ello son las versiones actualizadas del protocolo oficial de la EPP0 para *X. fastidiosa*, una bacteria difícil de cultivar y de gran repercusión para todos los países

de la zona EPPO (EPPO 2019, 2020 a, b). Así se intenta optimizar tanto la toma de muestra como la selección de las técnicas de diagnóstico a utilizar, para minimizar el riesgo de falsos resultados positivos y de falsos negativos, y si además se logra cultivar dicha bacteria, se puede demostrar mediante inoculación artificial que el microorganismo aislado es capaz de causar la enfermedad.

En la Tabla 1 se muestran, para ilustrar las características generales, las ventajas e inconvenientes de las distintas técnicas utilizadas para el diagnóstico, detección e identificación de patógenos bacterianos, su complejidad, coste, duración y sensibilidad.

Técnica	Complejidad (a)	Coste (b)	Duración (c)	Sensibilidad (d)
Aislamiento	Variable	Bajo	Variable	Elevada
ELISA	Media	Medio	Corta	Variable
Flujo lateral	Baja	Medio	Corta	Baja-media
PCR convencional	Media	Medio	Corta	Media
PCR en tiempo real	Media	Medio-alto	Corta	Elevada
LAMP	Media	Medio-alto	Corta	Elevada
HTS	Alta	Muy alto	Variable	Elevada

Tabla 1. Comparación de las principales características de algunas técnicas de análisis empleadas en diagnóstico, detección e identificación de bacterias fitopatógenas (modificada de López et al., 2019)

- a) Variable, depende del patógeno; Media: exige formación, preparación y cierta experiencia; Baja: puede ser realizada por personal tras corta preparación técnica; Alta: exige formación, preparación y elevada especialización técnica.
- b) Bajo, menos de 1€ /muestra; Medio, de 1 a 10 € /muestra; Alto, más de 10 € /muestra; Muy alto, más de 50 € /muestra.
- c) Variable, depende del patógeno; Corta, de 4-48 h para obtener el resultado.
- d) Se indica para la detección de bacterias en extractos de material vegetal: Elevada, 1-100 ufc/ml; Variable, depende de los anticuerpos (policlonales, monoclonales específicos o recombinantes), del patógeno y del tipo de ELISA; Baja, 10^5 - 10^6 ufc/ml; Media, 10^2 - 10^5 ufc/ml.

C1.4. Métodos de identificación de malas hierbas

La agricultura sostenible requiere el desarrollo de nuevas estrategias de control de malas hierbas, ya que son responsables de pérdidas económicas en numerosos cultivos en España y a nivel internacional. Para ello es necesario disponer de herbarios y de bases actualizadas para su identificación, especialmente en el caso de la flora exótica o invasora (FAO, 2006). Los métodos para su identificación están generalmente basados en sus características botánicas y su comparación con las de las plantas cultivadas. En España se han publicado distintas claves para distinguir e identificar a las malas hierbas (Recasens y Conesa, 2009 y 2022; Osca, 2020) y otras en formato de libro. Además, se cuenta con distintas webs, como *The PLANTS Database* que proporciona amplia información sobre especies de plantas y su distribución y características en los EE. UU. (USDA, 2021). El código de barras de ADN de las plantas y otras técnicas moleculares también se han comenzado a utilizar para la identificación de plantas invasoras (EPPO, 2021).

La identificación precisa de las numerosas especies de flora invasora es indispensable para evaluar sus riesgos y su población, y decidir las estrategias óptimas de control. Para ello, en las últimas décadas se han utilizado distintas tecnologías avanzadas, como la teledetección remota por satélite que opera a cierta altura y requiere poder tomar imágenes útiles, incluso con nubosidad. Los vehículos aéreos como los aviones no tripulados y drones operan más cerca del suelo y obtienen mejores imágenes de las

plantas cultivadas y de las malas hierbas en tiempo real, aunque también tienen limitaciones de vuelo y de procesamiento de las imágenes. La integración de vehículos de identificación equipados para el arranque de las malas hierbas y para su tratamiento químico *in situ* podría resolver a la vez el problema de su control. Finalmente, ya se han evaluado también robots basados en inteligencia artificial con los que las plantas invasoras son primero identificadas y luego controladas por medios físicos, térmicos o químicos, usando redes neuronales artificiales (Shah et al 2021). Estos métodos se abordan en el capítulo C.2. de Agricultura de Precisión.

C1.5. Validación de técnicas de diagnóstico, detección e identificación: sensibilidad, especificidad, precisión, repetibilidad y reproducibilidad

Un método, protocolo o prueba de análisis se considera validado cuando se dispone de datos contrastados sobre su sensibilidad y especificidad analítica, repetibilidad y reproducibilidad para un modelo determinado. Para ello, en los laboratorios oficiales y en muchos privados de la UE se realizan ensayos de validación según la metodología EPPO (EPPO, 2014).

En Fitopatología, la sensibilidad de un método, protocolo, técnica, etc., se evalúa estableciendo el límite de detección mediante diluciones de muestras, y los límites de sensibilidad de las técnicas más utilizadas en Sanidad Vegetal son de microgramos (10^{-6} g) a femtogramos (10^{-15} g) de ADN para las técnicas basadas en la amplificación molecular de ácidos nucleicos por PCR, siendo las más sensibles las de PCR en tiempo real y PCR digital, y de picogramos (10^{-12} g) para biosensores, que se comentarán al final de este capítulo.

La especificidad requiere la evaluación del protocolo frente a una selección del mismo tipo de organismo y de otros taxonómicamente próximos, que no deben ser reconocidos por el método, protocolo o prueba específicos, y depende, por ejemplo, de los reactivos y protocolos utilizados en los ensayos PCR, o de las características de afinidad de los anticuerpos en las técnicas serológicas.

La fiabilidad (precisión) de una prueba es la probabilidad de que se obtenga un resultado correcto y se calcula dividiendo la suma de los verdaderos positivos y verdaderos negativos entre el número total de muestras, porque en la práctica la suma de los verdaderos positivos y de los verdaderos negativos no siempre es igual al total de muestras. Ello sucede porque, desgraciadamente, no siempre los resultados obtenidos del análisis con una técnica son los correctos y hay también falsos negativos y falsos positivos. Los resultados denominados como falsos negativos son frecuentes con protocolos de baja sensibilidad o técnicas que no siempre funcionan; tal es el caso de bacterias de difícil aislamiento en cultivo, como *Xylophilus ampelinus* o *X. fastidiosa*, que tienen muchos falsos negativos en los aislamientos porque, estando presente la bacteria buscada, la muestra no se ha tomado del sitio donde había suficientes bacterias, o se procesa tarde, o el medio tiene algún inhibidor, o por otras razones que imposibilitan la aparición de colonias de la bacteria. Los falsos positivos son frecuentes, por ejemplo, si se usa la PCR convencional y son debidos a las contaminaciones por aerosoles que permanecen en el laboratorio y que en esta técnica son difíciles de evitar debido: (i) a la sensibilidad intrínseca de la misma; y (ii) a la incorrecta manipulación y tratamiento previo de la muestra en la preparación y/o en la purificación de ácidos nucleicos, que da lugar a los aerosoles que son luego amplificados.

La validación de técnicas de diagnóstico y detección es un proceso que determina la idoneidad de una prueba, que se ha desarrollado, optimizado y estandarizado adecuadamente para un fin concreto. Incluye estimaciones de las características de rendimiento analítico y de los parámetros de diagnóstico de la prueba. Requiere, además, que sean repetibles (mismos resultados en igualdad de condiciones

por un mismo operario) y **reproducibles** (intra- e inter-laboratorios y distintos operarios), definiéndose ambas características, **repetitividad y reproducibilidad**, como la probabilidad de que se repita el mismo resultado cuando las técnicas se aplican varias veces a la misma muestra, en condiciones previamente indicadas (López et al., 2019).

Para la selección de los métodos de diagnóstico y detección a aplicar en cada caso, **se deberían evaluar previamente aquellos parámetros que resulten críticos en función del objetivo perseguido**. En el caso de la erradicación de un hongo, oomiceto, bacteria, virus, viroide, nematodo o insecto vector, **prevalece la necesidad de utilizar el método más sensible**, puesto que un resultado negativo será bastante fiable y permitirá descartar la presencia del patógeno, aceptando el riesgo de obtener falsos positivos y sacrificar plantas sanas. En los casos de certificación de plantas madre, programas de saneamiento y cuarentena, o bien inspecciones exhaustivas para evaluar la incidencia de una enfermedad, análisis rápidos para vigilar su diseminación, etc., la selección de los métodos se debe apoyar en una aproximación basada en la evidencia, la evaluación del coste por análisis, y la consideración de diferentes escenarios posibles con distinta prevalencia de la enfermedad (Olmos et al., 2018; Vidal et al., 2012c). **En España y otros países, esta evaluación del método más apropiado para el análisis de cada organismo en función del objetivo, no siempre se realiza en todas las CC. AA., regiones o territorios de la forma más adecuada, y esta debería ser consensuada por expertos en el organismo problema en base a la información científica disponible, antes de poner en marcha programas de prospección, erradicación, o contención, entre otros.**

Una vez seleccionada la técnica y protocolo más adecuados para el análisis de una determinada muestra, **la acreditación oficial** es actualmente un requisito cada vez más demandado por los usuarios de los laboratorios de diagnóstico, y también por la legislación de la UE. Existe información sobre los requerimientos para la acreditación de Laboratorios de Sanidad Vegetal en técnicas de diagnóstico, detección o identificación (EPPO, 2014). No se acredita el laboratorio en general, sino que se **solicita la acreditación para cada técnica concreta y para cada organismo específico** mediante una metodología previamente validada. Lo que se pretende es **garantizar la fiabilidad de los resultados de dichos análisis, basándose además en un sistema de gestión de calidad del laboratorio que abarque su funcionamiento general**. En España, la acreditación oficial la realiza la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC) (<https://www.enac.es>).

C1.6. Laboratorios oficiales, autorizados y Laboratorios Nacionales de Referencia en España y en la Unión Europea

La protección de los cultivos en el territorio español resulta complicada, ya que requiere actuaciones como Estado miembro de la UE y como estado compuesto por diferentes CC. AA., que son las que tienen competencias legales reconocidas en materia de Sanidad Vegetal. Para ello, se precisa, entre otras actuaciones, de: (i) un diagnóstico fiable de organismos nocivos en todas ellas; y (ii) una cadena de información de resultados obligatoria, con el fin de adoptar medidas de erradicación y gestión integrada a nivel autonómico y estatal. Los Laboratorios oficiales de Diagnóstico vegetal representan una figura crucial en la estructura sanitaria y de vigilancia, tanto nacional como en la UE y resto de la comunidad internacional. Por este motivo el MAPA estableció legalmente en España los laboratorios oficiales que pueden realizar dichos análisis.

El Real Decreto 1190/1998 (BOE, 1998) regula los principios básicos de los diagnósticos oficiales en España y establece que las CC. AA. designarán al menos un Laboratorio oficial para la realización de este tipo de diagnóstico en sus respectivas demarcaciones geográficas. Sus resultados analíticos deberán ser comunicados exclusivamente a las autoridades competentes para que adopten las medidas correspondientes. Dado que los análisis de todas las campañas oficiales de prospección y erradicación de or-

ganismos nocivos los hacen solo los laboratorios oficiales, y no hay datos de los laboratorios privados de diagnóstico (que son inferiores en número) ni se dispone de datos de la cantidad de muestras analizadas por ellos frente a los oficiales, se describirá aquí solo la situación y características de los Laboratorios oficiales de Diagnóstico, que son los que están directamente en contacto con el MAPA.

En el ámbito nacional, el MAPA dispone actualmente de seis Laboratorios Nacionales de Referencia: Laboratorio Nacional de Referencia de Micología para el diagnóstico de hongos y oomicetos y Laboratorio Nacional de Referencia de Virus de especies no leñosas, ambos localizados en el Instituto Agroforestal Mediterráneo de la Universidad Politécnica de Valencia, Laboratorio Nacional de Referencia de Bacterias y Laboratorio Nacional de Referencia de Virus de especies leñosas ubicados en el Centro de Protección Vegetal del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, y Laboratorio Nacional de Referencia de Nematodos y Artrópodos que se ubica en el Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid, de la Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Estos Laboratorios: (i) armonizan los métodos de análisis; (ii) participan en programas nacionales de prospección fitopatológica y en paneles de la EPPO; (iii) emiten informe previo a la declaración de una plaga identificada por primera vez en territorio nacional; y (iv) efectúan los análisis no rutinarios o ensayos que les sean solicitados, como las muestras de productos y material vegetal procedentes de terceros países enviadas por los Puntos de Control en Frontera (PCF) o Puntos de inspección fronterizos (PIF), o las sospechosas de plagas cuarentenarias y reguladas enviadas por los Laboratorios oficiales de las CC. AA. En el caso de detectarse en una de ellas un organismo nocivo no descrito previamente en el territorio nacional, el Laboratorio de Referencia correspondiente confirmará el resultado para que el MAPA pueda proceder a su declaración oficial y comunicarlo a la UE. Es obligado que, ante la sospecha de la existencia de algún organismo nocivo de cuarentena, cualquier ciudadano o laboratorio lo comunique inmediatamente a los órganos competentes de su CC. AA. (López et al., 2019). En 2020 el MAPA anunció la creación de un único y nuevo Laboratorio Nacional de Referencia, que asumirá paulatinamente las funciones de los Laboratorios actualmente existentes, y que se ubicará en el Centro Tecnológico Agroalimentario (CETAL) de Lugo.

A nivel de la UE existen varios Laboratorios Europeos de Referencia (EURL), laboratorios comunitarios seleccionados públicamente en 2019 por la CE que nombró a cuatro consorcios y un laboratorio como los primeros EURL en el campo de la Sanidad Vegetal. Estos apoyarán a los Laboratorios de la UE para el diagnóstico de plagas existentes y emergentes cuarentenarias y reguladas, y contribuirán a una intervención más rápida y centrada en las fronteras de la UE y en su territorio. El EURL para Entomología (insectos y ácaros) es un consorcio dirigido por ANSES, *Plant Health Laboratory, Entomology and Invasive Plants Unit*, (Francia); el de Nematología es también un consorcio dirigido por ANSES, *Nematology Unit*, (Francia); el de Bacteriología es un consorcio dirigido por la NVWA-NRC, *Bacteriology group* de Wageningen (Países Bajos); el de Micología (hongos y oomicetos) es ANSES, *Plant Health Laboratory, Mycology Unit*, y para Virología (virus y viroides) y Fitoplasmología se nombró a un consorcio dirigido por la NVWA-NRC, *Virology group* de Wageningen (Países Bajos).

Según Palomo (2015), en España la labor de los Laboratorios oficiales de Diagnóstico de las CC. AA. se veía dificultada por la heterogeneidad de cultivos y de organismos nocivos a analizar, y la escasa dotación de personal y de recursos para realizar todos los análisis necesarios. Esta situación no ha mejorado en los últimos años, y la detección en Italia y posteriormente en Francia y España de la bacteria *X. fastidiosa* ha incrementado desde 2017 el trabajo de dichos Laboratorios oficiales, que han debido realizar anualmente prospecciones y análisis obligatorios por la legislación de la UE sobre dicha bacteria, en detrimento de las actividades frente a otros organismos nocivos. Además, desde 2020, la pandemia de la COVID-19 ha limitado los fondos necesarios para el adecuado tratamiento de las enfermedades, plagas y malas hierbas de los cultivos en algunas CC. AA. La situación real es que en muchos casos la actividad de los Laboratorios oficiales solo concierne los aspectos relacionados con los organismos nocivos de cuarentena (y no con todos ellos),

y las demás enfermedades, plagas y malas hierbas se abordan, cuando se dispone de recursos humanos y financieros, por otros organismos oficiales o privados (Jiménez Díaz y López, 2019).

A las limitaciones y exigencias anteriores se suman: (i) la **carencia de una carrera específica y formación reglada especializada** para el personal de dichos laboratorios; (ii) la **urgencia en la presentación de los resultados analíticos** reclamada por las administraciones; y (iii) la **atomización de los Laboratorios oficiales y su dependencia de distintas administraciones** con variadas prioridades políticas. Todo ello conjuntamente contribuye a dificultar el día a día de su labor, ante las cada vez mayores exigencias de la legislación de la UE y en consecuencia del MAPA. Además, la desaparición hace años del Grupo de Trabajo de Laboratorios de Diagnóstico del MAPA dificulta la coordinación entre los mismos, con el resultado final de una **falta de armonización entre las técnicas utilizadas**. Y la lógica exigencia de la UE, de que todos los laboratorios oficiales de los países miembros estén acreditados según la norma ISO/IEC 17025 por ENAC para 2022, ha incrementado la **necesidad acuciante de mayores recursos humanos y materiales para todos los Laboratorios oficiales**. Se trata de una oportunidad que debería ser aprovechada por el MAPA y las CC. AA. para mejorar la coordinación entre los Laboratorios oficiales de Diagnóstico y desarrollar canales de comunicación con los Laboratorios de Referencia de la UE de reciente creación. Comparativamente, la situación es muy distinta en el caso de los laboratorios oficiales españoles responsables de la salud humana y veterinaria, ya que existen **Redes de Vigilancia y Alerta Epidemiológica** que facilitan la transferencia rápida de información, y la coordinación de los diagnósticos y de las medidas a tomar, en caso de detección de organismos de cuarentena en España. Pero este tipo de redes a nivel nacional aún no existen en la Sanidad Vegetal española, desafortunadamente.

C1.7. Luces, sombras y perspectivas del diagnóstico e identificación de agentes nocivos

En la última década se han desarrollado y validado nuevas técnicas de diagnóstico, especialmente basadas en técnicas moleculares de amplificación y secuenciación del ADN, para la detección e identificación de artrópodos fitófagos, agentes fitopatógenos y vectores de ellos, que afectan a cultivos agrícolas y masas forestales. Sin embargo, la **combinación de técnicas convencionales basadas en características fenotípicas con técnicas moleculares, serológicas o de otros tipos, es todavía necesaria** en muchos casos para una mayor precisión del diagnóstico, detección y especialmente de la identificación. Asimismo, en el caso de bacterias, hongos y oomicetos, el desarrollo de métodos de diagnóstico, detección e identificación debe tener en cuenta que, en ciertos casos, la relevancia fitopatológica de sus patotipos y razas patogénicas hace insuficiente la identificación a nivel de especie para muchas enfermedades. Ejemplos de ello son la raza TR4 de *F. oxysporum* f. sp. *cubense* antes mencionado y el mal de Panamá del plátano, el patotipo defoliante de *Verticillium dahliae* y la verticilosis del olivo en Andalucía (Milgroom et al., 2016), y las subespecies y STs de la bacteria *X. fastidiosa*.

Tanto la determinación del ciclo biológico de un organismo nocivo, como el potencial evolutivo y la distribución espacial o temporal de nuevas cepas virulentas del mismo, el desarrollo de modelos predictivos, o el efecto en su población de tratamientos para la GIP, requieren, especialmente en el caso de patógenos, de métodos rápidos, precisos y robustos de diagnóstico, detección o identificación para obtener resultados fiables, que no están siempre disponibles para muchos de los organismos no cuarentenarios o no regulados. Además de estas propiedades de los métodos, no se debe desestimar que en el caso de la detección, el éxito también depende de la adecuación del plan de muestreo y del tamaño de la muestra. El mejor método de diagnóstico no cumplirá su objetivo si la muestra analizada no procede de una inspección y muestreo adecuados, y para ellos no existen apenas protocolos estandarizados y evaluados en distintos países.

La creciente disponibilidad de genomas de artrópodos fitófagos y de agentes fitopatógenos, y también de los organismos beneficiosos, está permitiendo la selección de nuevas secuencias diana que proporcionen mayor especificidad a las técnicas moleculares de diagnóstico, detección e identificación. Todo ello, combinado con técnicas de mayor sensibilidad y especificidad analítica, o con técnicas serológicas avanzadas, hará posible la optimización de los protocolos de detección para la mayoría de los mismos. En paralelo, los avances en la generación de marcadores moleculares, como el *DNA barcoding* o código de barras de ADN (EPPO, 2021) que sean específicos de especie, subespecie, raza, patovar, etc., y en el genotipado de estos, facilitarán: (i) la identificación y evaluación de la distribución espacio-temporal de las variantes de cada agente nocivo, que son clave para el despliegue de las resistencias; (ii) el análisis del potencial evolutivo de los agentes nocivos a través de la estructura genética de sus poblaciones, que es determinante para la estabilidad de las resistencias; e incluso (iii) la determinación del posible origen geográfico de un agente nocivo tras una introducción accidental, ilegal o voluntaria en una nueva zona (EPPO, 2016b).

Por una parte, como las denominadas plataformas de HTS (o de secuenciación de alto rendimiento) pueden analizar hasta 100.000 muestras diarias en la industria farmacéutica o biotecnológica, las posibilidades son enormes en Sanidad Vegetal. Pero para aprovechar esta oportunidad son necesarios diseños que sean compatibles con las necesidades de análisis de decenas de miles de insectos, de cientos o miles de trampas, así como de elevados números de muestras de plantas o sustratos complejos con artrópodos fitófagos y agentes fitopatógenos junto a organismos saprofitos o beneficiosos. Asimismo, son factores limitantes y críticos el manejo robotizado de muestras y el procesado de la información mediante bases de datos de elevada fiabilidad. Pero, además, la interpretación de los resultados requiere gran experiencia y pericia, tanto en el manejo de secuencias, como en Fitopatología y en Taxonomía, así como en técnicas convencionales de identificación. Los requisitos para la validación serán muy complejos y se requerirán nuevas inversiones en infraestructuras y expertos bioinformáticos para el análisis y almacenamiento de datos. Todo esto requerirá colaboraciones internacionales y coordinación para establecer nuevos protocolos, controles, métodos de validación y bancos de datos comunes (Olmos et al., 2018). De hecho, ya se ha planteado una propuesta de evaluación de la bioseguridad de los nuevos virus que se descubrirán y de su impacto comercial y científico, así como de su marco regulatorio y científico (Massart et al., 2017). La comunicación entre científicos, laboratorios de diagnóstico, y autoridades locales y nacionales deberá ser mejorada ante los retos que plantearán los nuevos descubrimientos y la carencia de información biológica y epidemiológica sobre nuevos organismos que ya se están descubriendo y que será necesario analizar para una correcta evaluación de riesgos de los mismos, y sobre las medidas a tomar para su prevención si se considera necesario.

Por otra parte, todavía no existen técnicas que reúnan las características óptimas de sensibilidad, especificidad, precisión, coste, robustez, rapidez, etc. para el diagnóstico, y no siempre se pueden usar aparatos portátiles para poder ser manejados directamente en frontera, campo o invernadero. Por ello, hay mucho interés en desarrollar nuevas técnicas, no necesariamente moleculares, sino basadas en biosensores (que frecuentemente combinan técnicas serológicas y moleculares de amplificación) para su uso en detección de patógenos de plantas, especialmente de bacterias, hongos, oomicetos, virus y viroides (Dyussebayev et al., 2021). Los biosensores se usan ya en Medicina humana y en Veterinaria en muy variados tipos de análisis, y tienen también múltiples aplicaciones industriales, medioambientales e incluso militares. Constan básicamente de tres elementos: el bioreceptor (o catalizador), el transductor y el procesador de señal. Primero la muestra se une específicamente al bioreceptor (anticuerpo monoclonal, ácido nucleico, glucano, lectina, enzima, tejido, célula entera, etc.). Luego, la señal que se genera la convierte el transductor en un impulso químico, óptico, eléctrico o de otro tipo, que sea medible, y la identificación cualitativa y cuantitativa es procesada para ser leída por el procesador de datos (Kather et al., 2016). Ya existen biosensores desarrollados para la detección de algunos patógenos de plantas, incluso para varios simultáneamente, pero no han alcanzado todavía la utilización a escala comercial.

Además, los avances en la investigación en el campo de las ciencias "ómicas" (genómica y metagenómica, transcriptómica, proteómica, metabolómica, etc.) y el desarrollo de nuevos métodos de secuenciación, análisis bioinformático, biosensores y otros tipos de técnicas para el diagnóstico e identificación, contribuirán no solo a prevenir la diseminación de los artrópodos fitófagos, los patógenos y sus vectores a nuevas áreas y a mejorar el estatus sanitario de los cultivos, sino también a la realización de nuevos estudios epidemiológicos y de dinámica de poblaciones. Y los resultados de dichos estudios proporcionarán un mayor conocimiento de aspectos todavía desconocidos del ciclo biológico de los agentes nocivos de plantas, facilitando con ello el diseño de estrategias innovadoras de GIP para su control.

Las técnicas de diagnóstico, detección o identificación de artrópodos fitófagos, patógenos y de malas hierbas están experimentando continuos cambios y avances, y constituyen campos de investigación muy dinámicos en los que el mejor protocolo de hoy probablemente será superado por otro nuevo mañana, y la técnica de referencia o estándar de oro absoluto, no existe. Además, las necesidades e intereses de los usuarios son muy variados y es conveniente disponer de un amplio abanico de técnicas y protocolos para los distintos requerimientos de organismos públicos y privados. Pero en muchos casos se tiende a priorizar las técnicas con equipamiento mínimo, frente a las de mayor coste, compleja manipulación y equipamiento por análisis (De Boer y López, 2012; López et al., 2019). Por ello, las técnicas sencillas de detección temprana y aplicación directa en campo, como las pruebas de antígenos para microorganismos, los métodos directos de preparación de muestras sin extracción ni purificación de ácidos nucleicos, generalmente aplicadas a la detección de agentes fitopatógenos, o las de amplificación molecular como LAMP, son de gran interés para la toma rápida de decisiones en análisis en frontera, manejo de plagas y otros casos en los que la rapidez es prioritaria, evitando las contaminaciones y el riesgo de diseminación.

Queda aún mucho camino por avanzar hasta conseguir el desarrollo y la disponibilidad práctica de técnicas con protocolos optimizados (sensibles, específicos y fiables) para el diagnóstico de los organismos nocivos de los vegetales, que además sean de bajo coste por muestra y aplicables *in situ* para el análisis de un elevado número de estas de plantas con o sin síntomas, y en distintas situaciones y países (Baldi y La Porta, 2020). Para cultivos de campo o vivero puede ser de interés el análisis diagnóstico-detección de unos o varios patógenos por cultivo, pero para programas de certificación, mejora genética o análisis en frontera será necesario conseguir kits para el análisis múltiple de varios o todos los organismos capaces de afectar a un determinado cultivo, lo que requerirá el desarrollo de técnicas innovadoras y nuevos avances técnicos. Además, en el caso de las malas hierbas la situación es más complicada, porque habría que comenzar en la UE por redactar la legislación necesaria para considerarlas oficialmente como organismos nocivos para los cultivos y masas forestales y redactar protocolos oficiales de identificación.

El mayor reto a vencer es global, ya que se trata de conseguir el desarrollo y la optimización de métodos de inspección, muestreo, diagnóstico e identificación rápidos, baratos y sobre todo muy fiables para los artrópodos fitófagos, patógenos y malas hierbas de mayor impacto mundial, seguido de los de impacto nacional o local, para lograr que sean de mayor, o al menos de la misma precisión, que los actuales métodos convencionales. Además, debería ser un proceso muy dinámico para integrar los últimos avances del conocimiento de cada agente nocivo y de su taxonomía, diversidad, etc. Así, con el uso mayoritario de protocolos integrados y optimizados que incluyan los últimos resultados científicos, se conseguirá una sustancial mejora del conocimiento sobre el estado sanitario de los cultivos y masas forestales y con ello se avanzará en el camino de su posible GIP optimizada y de la mejora de su sostenibilidad.

C1.8. Bibliografía

- Baldi, P., y La Porta, N. 2020. Molecular approaches for low-cost point-of-care pathogen detection in Agriculture and Forestry. *Front. Plant Sci.* <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.570862>.
- Batuecas, I., Alomar, O., Castañe, C., Piñol, J., Boyer, S., Gallardo-Montoya, L., y Agustí, N. 2022. Development of a multiprimer metabarcoding approach to understanding trophic interactions in agroecosystems. *Insect Sci.* doi: 10.1111/1744-7917.12992.
- Bertolini, E., Felipe, R.T.A., Sauer, A.V., Lopes, S.A., Arilla, A., Vidal, E., Mourão Filho, F.A.A., Nunes, W.M.C., Bové, J.M., López, M.M., y Cambra, M. 2014. Tissue-print and squash real-time PCR for direct detection of '*Candidatus Liberibacter*' species in citrus plants and psyllid vectors. *Plant Pathol.* 63: 1149-1158. doi:10.1111/ppa.12197.
- Bickford, D., Lohman, D.J., Sodhi, N.S., Ng, P.L.K., Meier, R., Winker, K., Ingram, K.K., y Das, I. 2006. Cryptic species as a window on diversity and conservation. *Trends Ecol. Evol.* 22: 148-155.
- BOE, 1998. Real Decreto 1190/1998 REAL DECRETO 1190/1998, de 12 de junio, por el que se regulan los programas nacionales de erradicación o control de organismos nocivos de los vegetales aún no establecidos en el territorio nacional. Boletín Oficial del Estado núm. 13938, de 13 de junio de 1998.
- BOE, 2013. Real Decreto 630/2013, de 2 de agosto, por el que se regula el Catálogo español de especies exóticas invasoras. Boletín Oficial del Estado núm. 185, de 5 de agosto de 2013.
- Cambra, M., Vidal, E., Martínez, C., y Bertolini, E. 2019. Tissue-print and squash capture real-time RT-PCR method for direct detection of Citrus tristeza virus (CTV) in plant or vector tissues. Págs. 55-66, en: Antonino F. Catara, Moshe Bar-Joseph, y Grazia Licciardello, eds. *Citrus Tristeza Virus: Methods and Protocols. Methods in Molecular Biology*, vol. 2015. Humana Press. Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9558-5>.
- Capote, N., Bertolini, E., Olmos, A., Vidal, E., Martínez, M.C., y Cambra, M. 2009. Direct sample preparation methods for detection of *Plum pox virus* by real-time RT-PCR. *Int. Microbiol.* 12: 1-6. doi: 10.2436/20.1501.01.75.
- Chakravarthy A.K, ed. 2015. *New Horizons in Insect Science: Towards Sustainable Pest Management*. doi.org/10.1007/978-81-322-2089-3_1, © Springer India.
- De Boer, S. K., y López, M.M. 2012. New grower-friendly methods for plant pathogen monitoring. *Annu. Rev. Phytopathol.* 50: 197-218.
- DOUE. 2016. Regulation (EU) 2016/2031 of the European Parliament of the Council of 26 October 2016 on protective measures against pests of plants, amending Regulations (EU) No 228/2013, (EU) No 652/2014 and (EU) No 1143/2014 of the European Parliament and of the Council and repealing Council Directives 69/464/EEC, 74/647/EEC, 93/85/EEC, 98/57/EC, 2000/29/EC, 2006/91/EC and 2007/33/EC. L 317/4 OJ L 23.11.2016.
- DOUE. 2019. Commission Delegated Regulation (EU) 2019/1702 of 1 August 2019 supplementing Regulation (EU) 2016/2031 of the European Parliament and of the Council by establishing the list of priority pest. OJ L 260/8.
- DOUE. 2021. Reglamento de Ejecución (UE) 2021/2285 de la Comisión, de 14 de diciembre de 2021, por el que se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/2072 por lo que respecta a la lista de plagas, prohibiciones y requisitos para la introducción y el traslado en la Unión de vegetales, productos vegetales y otros objetos, y por el que se derogan las Decisiones 98/109/CE y 2002/757/CE y los Reglamentos de Ejecución (UE) 2020/885 y (UE) 2020/1292. OJ L 458. 22.12.2021.
- Dugan, F.M., y Everhart, S. 2016. Cryptic species: a leitmotif of contemporary mycology has challenges and benefits for plant pathologists. *Plant Health Progr.* 17: 250-253.
- Dyussebayev, K., Sambasivam, P., Bar, I., Brownlie, J.C., Shiddiky, M.J.A., y Ford R. 2021. Biosensor technologies for early detection and quantification of plant pathogens. *Front. Chem.* 9:636245. doi: 10.3389/fchem.2021.636245
- EPPO. PM 7/98 (2). 2014. Specific requirements for laboratories preparing accreditation for a plant pest diagnostic activity. <https://doi.org/10.1111/epp.12118>.
- EPPO. 2019. PM 7/24 (4). Diagnostics. *Xylella fastidiosa*. Bull. OEPP/EPPO Bull. 49: 175-227.
- EPPO. 2020 a. PM 3/81 (2). Inspection of consignments for *Xylella fastidiosa*. Bull. OEPP/EPPO Bull. 50: 401-414.
- EPPO. 2020 b. PM 3/82 (2). Inspection of places of production for *Xylella fastidiosa*. Bull. OEPP/EPPO Bull. 50: 415-428.
- EPPO. 2021. PM 7/129 (2) DNA barcoding as an identification tool for a number of regulated pests. Bull. OEPP/EPPO Bull. 51, 100-143.
- FAO. 2006. Recommendations for improved weed management. FAO, Rome, 50 pp.
- FAO. 2016 Importance of pest diagnosis. FAO 2016/IPPC Secretariat. Rome, 6 pp.
- Inderbitzin, P., Bostock, R.M., Davis, R.M., Usami, T., Platt, H.W., y Subbarao, K.V. 2011. Phylogenetics and taxonomy of the fungal vascular wilt pathogen *Verticillium*, with the descriptions of five new species. *PLoS ONE* 6, e28341. doi: org/10.1371/journal.pone.0028341.
- Inderbitzin, P., y Subbarao, K.V. 2014. *Verticillium* systematics and evolution: How confusion impedes *Verticillium* wilt management and how to resolve it. *Phytopathology* 104: 564-574.
- Jiménez-Díaz, R.M., y López González, M.M., eds. 2019. Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España. UCOPress. Editorial Universidad de Córdoba. Córdoba.
- Kather, M., de la Escosura-Muñiz, A. y Merkoçi, A. 2016. Biosensors for plant pathogen detection. *Biosen. Bioelectron.* <https://doi.org/10.1016/j.bios.2016.09.091>
- López, M.M., Murillo, J., Montesinos, E., y Palacio-Bielsa, A. 2019. Enfermedades de Plantas Causadas por Bacterias. Sociedad Española de Fitopatología y Bubok. Madrid. España.

- Magdama, F., Monserrate-Maggi, L., Serrano, L., Sosa, D., Geiser, D.M., y Jiménez-Gasco, M.M. 2019. Comparative analysis uncovers the limitations of current molecular detection methods for *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race 4 strains. PLoS ONE 14(9): e0222727. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222727>.
- Massart, S., Candresse, T., Gil, J., Lacomme C., Predajna, L., Ravnikar, M., Reynard, J-S., Rumbou, A., Saldarelli, P., Škorić, D., Vainio, E.J., Valkonen J.P.T., Vanderschuren, H., Varveri, C., y Wetzal, T. 2017. A framework for the evaluation of biosecurity, commercial, regulatory, and scientific impacts of plant viruses and viroids identified by NGS technologies. Front. Microbiol. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00045>.
- Matsuda, T., Fukumoto, C., Hinomoto, N., y Gotohi, T. 2013. DNA-based identification of smites: Molecular evidence for cryptic species of the genus *Tetranychus* (Acari: Tetranychidae) J. Econ. Entomol. 106: 463-472 doi: <http://dx.doi.org/10.1603/EC1232>
- Milgroom, M.G., Jiménez-Gasco, M.M., Olivares-García, y Jiménez-Díaz, R.M. 2016. Clonal expansion and migration of a highly virulent, defoliating lineage of *Verticillium dahliae*. Phytopathology 106: 1038-1046.
- Monte E., Hermosa, R., Jiménez-Gasco, M.M., y Jiménez-Díaz, R.M. 2021. Are species concepts outdated for fungi? Intraspecific variation in plant pathogenic fungi illustrates the need for subspecific categorization. Págs. 301-309, en: P. Bridge, D. Smith, y E. Stackebrandt, eds. Trends in the Systematics of Bacteria and Fungi. CABI International. Wallingford, Great Britain.
- Olmos, A., N. Boonham, N., Candresse, T., Gentit, P., Giovani B., D. Kutnjak, D., Liefting, L., Maree, H.J., Minafra, A., Moreira, A., Nakhla, N.K., F. Petter, F., Ravnikar, M., Rodoni, B., Roenhorst, J.W., y Rott, M. 2018. High-throughput sequencing technologies for plant pest diagnosis: challenges and opportunities. Bull OEPP/EPPO Bull. 48: 219-224. <https://doi.org/10.1111/epp.12472>.
- Osca Lluch, J.M. 2020. Guía para el Reconocimiento de Plántulas de Malas Hierbas. Editorial Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/138508>.
- Palomo, J.L. 2015. Los laboratorios oficiales de Sanidad Vegetal en España: situación actual y problemática. Phytoma España 266: 24-26.
- Piper, A.M., Batovska, J., Cogan, N.O.I., Weiss, J., Cunningham, J.P., Rodoni, B.C., y Blackett, M.J. 2019. Prospects and challenges of implementing DNA metabarcoding for high-throughput insect surveillance. GigaScience 8: 1-22.
- Recasens, J. 2018. Retos actuales de la malherbología en España. Phytoma España 303: 26-34
- Recasens, J., y Conesa, J.A. 2009 y 2022. Malas Hierbas en Plántula: Guía de identificación. Universitat de Lleida. Lleida.
- Ruiz-García, A.B., y Olmos, A. 2021. La secuenciación masiva en el diagnóstico de virus de cultivos leñosos. Fitopatología SEF 6: 6-11.
- Shah, T.M., Nasika, D.P.B., y Otterpohl, R. 2021. Plant and weed identifier robot as an agroecological tool using artificial neural networks for image identification. Agric. 11: 222. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030222>.
- USDA, NRCS. 2021. The PLANTS Database (<http://plants.usda.gov>, 07/20/2021). National Plant Data Team, Greensboro, NC. USA.
- Vidal, E., Moreno, A., Bertolini, E., y Cambra, M. 2012a. Estimation of the accuracy of two diagnostic methods for the detection of *Plum pox virus* in nursery blocks by latent class models. Plant Pathol. 61: 413-422. doi: 10.1111/j.1365-3059.2011.02505.x.
- Vidal, E., Moreno, A., Bertolini, E., Martínez, M.C., Corrales, A. R., y Cambra, M. 2012b. Epidemiology of *Citrus tristeza virus* in nursery blocks of *Citrus macrophylla* and evaluation of control measures. Span. J. Agric. Res. 10: 1107-1116.
- Vidal, E., Yokomi, R. K., Moreno, A., Bertolini, E., y Cambra, M. 2012c. Calculation of diagnostic parameters of advanced serological and molecular tissue-print methods for detection of *Citrus tristeza virus*. A model for other plant pathogens. Phytopathology 102, 114-121. doi: <org/10.1094/PHYTO-05-11-0139>.
- Wang Q-J, Zhang S-Y., Dong S.-F., Zhang, G.-C., Yang, J., Li, R., y Wang H-Q. 2020. Pest24: A large-scale very small object data set of agricultural pests for multi-target detection. Comput. Electron. Agric. 175: 105585. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105585>.

C2. Capítulo C2. Las tecnologías de la Información, las Comunicaciones y la Agricultura de Precisión

C2.1. ¿En qué consiste la Agricultura de Precisión?

Las tecnologías de la información son actualmente unos de los mayores impulsores de la innovación en agricultura y silvicultura, al igual que en la industria y otros campos. Son elementos de la infraestructura tecnológica que respaldan el diseño y la implementación de actuaciones de manejo de cultivos en el espacio y tiempo apropiados, de acuerdo con los principios de la Agricultura de Precisión, y más recientemente de la Agricultura 4.0.

La expresión formal de la Agricultura de Precisión en la literatura científica y tecnológica, e incluso en iniciativas legislativas, no se hizo hasta finales del siglo XX, pero el progreso de este concepto no se consolida hasta bien entrado el presente siglo, cuando se desarrollan técnicas precisas de toma de datos y en particular la digitalización de los mismos, y se diseña la tecnología para la aplicación precisa de insumos. Podría resumirse la **Agricultura de Precisión** de forma sencilla y ecléctica con la expresión de Gebbers y Adamchuk (2010) diciendo que aquella aplica el **tratamiento adecuado, en el sitio correcto y en el momento preciso**. El **apoyo público y político al desarrollo** de la Agricultura de Precisión, junto con una **mejor valoración de sus beneficios medioambientales**, puede contribuir de manera decisiva a consolidar y aumentar los logros de esa tecnología en varios campos de la agricultura y silvicultura (European Commission, 2014; Santos Valle y Kienzle, 2020). Formalmente, la comunidad científica internacional, representada a través de ISPA (International Society of Precision Agriculture – www.ispa.org) ha publicado recientemente una definición de agricultura de precisión: **“La Agricultura de Precisión es una estrategia de gestión que recoge, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales y los combina con otras informaciones para respaldar las decisiones de manejo de acuerdo con la variabilidad estimada, y así mejorar la eficiencia en el uso de recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola”**.

Así pues, la Agricultura y Silvicultura de Precisión deben resolver tres cuestiones: (i) la medida exacta de la cantidad necesaria de insumo en cada lugar y momento ya que aquella varía con el espacio y el tiempo; (ii) deducir de la cantidad anterior cuánto insumo hay que suministrar al cultivo o masa forestal según el sistema de apoyo a las decisiones (SAD) que se utilice; y (iii) aplicar esa cantidad, medida de manera muy precisa, en los lugares apropiados.

Como muchos conceptos nuevos, la Agricultura de Precisión puede ser interpretada de forma errónea y se confunde a menudo con la cartografía del rendimiento de los cultivos, que es simplemente una etapa en la implementación de una estrategia de manejo específico de los cultivos de acuerdo con las necesidades locales. También a veces se malinterpreta como agricultura sostenible, cuando la Agricultura de Precisión solo ayuda a que la agricultura sea más sostenible, ya que tiene como objetivo la máxima eficiencia de la producción con un mínimo impacto medioambiental. Inicialmente fue el potencial para una mejor productividad y rentabilidad, el que impulsó el desarrollo de las estrategias de manejo localizado como forma de Agricultura de Precisión (Nabi et al., 2017).

El mercado de la maquinaria y todos los variados softwares necesarios para la Agricultura de Precisión han mostrado un gran desarrollo en las últimas décadas tanto a nivel informático como para todo tipo de equipos. Actualmente, según Adam (2020), alrededor del 80 % de los nuevos tipos de maquinaria que se comercializan para uso agrícola en Europa, ya disponen de componentes de precisión. Los agri-

cultores son conscientes de que un equipo agrícola más eficiente les permite: (i) mejorar sus cultivos mediante aplicaciones de insumos más específicas; (ii) reducir los costos de insumos; (iii) beneficiar al medio ambiente debido a una menor cantidad de insumos aplicados; (iv) reducir el trabajo y aumentar la comodidad de los agricultores (los tractores autónomos pueden funcionar en condiciones meteorológicas adversas y de noche); (v) reducir el gasto energético; y (vi) mejorar las ganancias. Por ejemplo, las explotaciones en Alemania que utilizan tecnología digital avanzada de precisión obtienen rendimientos más altos por hectárea, con una reducción de un 10 % en el uso de herbicidas y un 20 % en combustible diésel (Adam, 2020).

Los cuatro elementos esenciales de la Agricultura de Precisión sirven para (i) adquirir datos (sensores, plataformas diversas y DGPS/GPS *Global Positioning System*, Sistema de Posicionamiento Global); (ii) procesar, analizar e interpretar los datos; (iii) comunicarlos a los usuarios; y (iv) actuar de acuerdo con la información adquirida, procesada y comunicada en las etapas anteriores (sean por ejemplo operaciones tales como la siembra o fertilización de precisión, riego o pulverización localizados, uso de robots y otros). A continuación, exponemos los sistemas y tecnología que se utilizan en una o varias de esas etapas.

C2.2. Los sistemas de apoyo a la toma de decisiones

La adquisición de datos mediante una amplia variedad de técnicas que más adelante exponemos se combina con las modernas tecnologías de comunicación, de manera que los datos se pueden procesar casi inmediatamente después de su obtención, y responder al problema planteado con la aplicación de la cantidad de insumo que ha sido calculada como necesaria en el cultivo o masa forestal, de acuerdo con un sistema optimizado y adaptado a las condiciones locales de toma de decisiones. Estas mejoras en la toma de datos, su almacenamiento, y su rápido procesado y comunicación a los usuarios, permiten optimizar el uso de sistemas de apoyo a las decisiones (SAD, en inglés *DSS* que son las siglas de los *Decision Support Systems*) conocidos desde hace años, pero cuya aplicación había sido muy limitada por las dificultades operativas de los mismos. Los SADs son elementos indispensables para actuar en la agricultura de precisión ya que permiten actuar en función de la información digitalizada obtenida, procesada y transferida a los usuarios de la SAD. Los SADs, además, tienen la posibilidad de introducir puntualmente las mejoras que se vayan obteniendo con la investigación científica, que de otra manera precisan de largos procesos de extensión para hacerlos llegar a los usuarios.

Véase como ejemplo de SAD para el control integrado de plagas y enfermedades el del algodón en Australia desarrollado ya hace dos décadas (Hearn y Bange, 2002). El sistema fue inicialmente diseñado para el control de *Helicoverpa armigera*, el gusano de las cápsulas del algodón. Con el tiempo, el SAD se extendió a otras plagas, y se mejoró sustancialmente para reducir el tiempo de muestreo del cultivo necesario para la toma de decisiones, al mismo tiempo que el uso de modelos de simulación permitió dar opciones al agricultor o asesor entre varias opciones posibles. Este SAD permitió, en diversas zonas de Australia, ya a finales del siglo XX la transferencia de los resultados de la investigación sobre todo en materia de control integrado de plagas y enfermedades en algodón, suministrando criterios y algoritmos para la toma de decisiones en función de la cantidad de plantas afectadas por el organismo nocivo y el momento en que este actuaba; subsidiariamente el SAD también permitía tomar decisiones fundamentadas en la fertilización y el riego. La mejora del SAD exigió, por otra parte, mejorar el conocimiento de cómo funcionaba el ecosistema del algodón en cada zona y permitió ir incorporando las innovaciones que fueron apareciendo en el mercado tales como, por ejemplo, nuevos Productos Fitosanitarios (PP. FF.), nuevas feromonas y trampas, o

la identificación de enemigos naturales que antes habían pasado desapercibidos o que habían sido eliminados por el exceso de tratamientos insecticidas.

La posibilidad de acceder y utilizar de forma remota los SADs, a través de webs, amplía la potencialidad de dicha tecnología para los proveedores de servicios y los usuarios (Santos Valle y Kienzle, 2020). Puede encontrarse un ejemplo de este tipo de SAD en el desarrollado por la Universitat de Lleida en colaboración con malherbólogos de Dinamarca llamado *IPMwise* en el manejo de malas hierbas. Los datos que alimentan la SAD son el tipo de cultivo, las especies de malas hierbas a manejar, la densidad de las mismas y el estado fenológico del cultivo y de las malas hierbas. El sistema determina si es necesario intervenir con herbicidas, recomienda el herbicida o mezcla de ellos, la dosis e incluso estima el coste de su aplicación (Montull et al., 2014).

Es bien sabido que la cantidad de cualquier insumo necesario para el cultivo o masa forestal es variable en el espacio y el tiempo y, por tanto, su aportación extra mediante técnicas culturales no debe ser uniforme y periódica, sino acomodarse a aquella variabilidad espacio-temporal de acuerdo con el SAD que se emplee. Las interfaces gráficas hacen que el uso de SAD sea cada vez más simple y eficiente para los usuarios finales, ayudándoles a acelerar el proceso de entrada de datos, generando informes, guiando en las decisiones de gestión de la cadena alimentaria y del campo, proporcionando mapas de riesgo y desarrollando escenarios de simulación complejos para dirigir las tácticas de gestión, las estrategias y las políticas más adecuadas.

Aquí, en este capítulo, se pretende explorar los principales aspectos de las tecnologías de la información diseñadas específicamente para proteger los cultivos y masas forestales contra plagas, enfermedades y malas hierbas. Por ello, a continuación, se comentan algunos campos de la Sanidad Vegetal en los que, a título de ejemplo, se están haciendo progresos con la Agricultura de Precisión.

C2.3. La Agricultura de Precisión en la Sanidad Vegetal

C2.3.1. Antecedentes

La Sanidad Vegetal es probablemente uno de los campos que más tempranamente mostró la necesidad de aumentar la precisión en la aplicación de insumos para el control de plagas, enfermedades y malas hierbas (Sims et al., 2018). Y ello se debe a dos motivos principales: (i) el gran impacto negativo que tienen los ataques por artrópodos fitófagos, patógenos y malas hierbas sobre el rendimiento de los cultivos y las masas forestales; y (ii) la temprana conciencia social de los problemas causados por los Productos Fitosanitarios (PP. FF.) en el medio ambiente y en la salud humana y del ganado.

La necesidad de conocer la relación entre la cantidad de agente nocivo y el rendimiento del cultivo, y de contrastarla con la que hay entre la cantidad de producto fitosanitario (PF) aplicado y su eficacia para evitar las pérdidas por el agente nocivo, se hizo muy patente a finales de los años 50 del siglo XX. Entonces se publicaron los primeros artículos científicos sobre dichas relaciones de las que se deriva el **concepto de densidad umbral de agente nocivo a partir de la cual se producen pérdidas superiores al coste de la aplicación del PF**. Si bien el SAD basado en ese umbral no considera el coste de los impactos ambientales de los PP. FF., el incentivo para formalizarlo en una publicación provenía en buena parte del conocimiento de los graves efectos negativos de los primeros insecticidas clorados sobre el medio ambiente y la salud humana, además de la pretensión de justificar económicamente la toma de decisiones en Sanidad Vegetal (Stern et al., 1959).

C2.3.2. Identificación y monitorización de poblaciones de agentes nocivos, y detección remota de estreses abióticos y bióticos

Tal como se dijo al principio de este capítulo, la adquisición de datos es una primera etapa esencial en las aplicaciones de la Agricultura de Precisión a la Sanidad Vegetal. Un dato esencial en la toma de decisiones en Sanidad Vegetal es la cantidad de organismo nocivo que se encuentra en un cultivo y su distribución espacial para poder decidir en primera instancia, si se justifica una intervención de control y, si la primera respuesta es afirmativa, qué cantidad de dicho insumo le corresponde a cada localización de la parcela o masa forestal. Para que las dos decisiones sean correctas se precisará de información extra acerca de la identidad del organismo nocivo (véase el capítulo C1. de este libro), del estado fenológico de la planta y del valor esperado de la cosecha. Todos esos datos, que alimentan el SAD en Sanidad Vegetal, se pueden obtener manualmente a base de observar un gran número de muestras, identificar el agente nocivo, medir la cantidad del mismo y elegir la mejor técnica de control de entre las disponibles en el caso que la intervención se considere necesaria. Esa forma de operar, sin embargo, nunca es realista en la práctica, por la cantidad de personal preparado para ello que se precisaría, además del riesgo de cometer errores humanos en alguna de las etapas a completar. Por ello, la efectividad en la operatividad del sistema se incrementa si la obtención de los datos para la toma de decisiones se realiza de forma automatizada.

Mencionamos en las páginas siguientes varios de los sistemas de que se dispone hoy en día para automatizar la toma de datos, comunicarlos, procesarlos y convertirlos en decisiones como son la teledetección satelital o con aviones tripulados, los drones y los robots.

C2.3.2.1. Teledetección

La teledetección con múltiples variantes (Gogoi et al., 2018; Weiss et al., 2020) ha encontrado varias aplicaciones para detectar, desde una cierta distancia, el estado de estrés de las plantas causado por deficiencias de elementos nutritivos, la disponibilidad de agua en el suelo, o la presencia de organismos nocivos, tanto artrópodos fitófagos como agentes fitopatógenos en plantas asintomáticas, las lesiones causadas por la acción de plagas y enfermedades, o la presencia de malas hierbas (cf., Capítulo C5.).

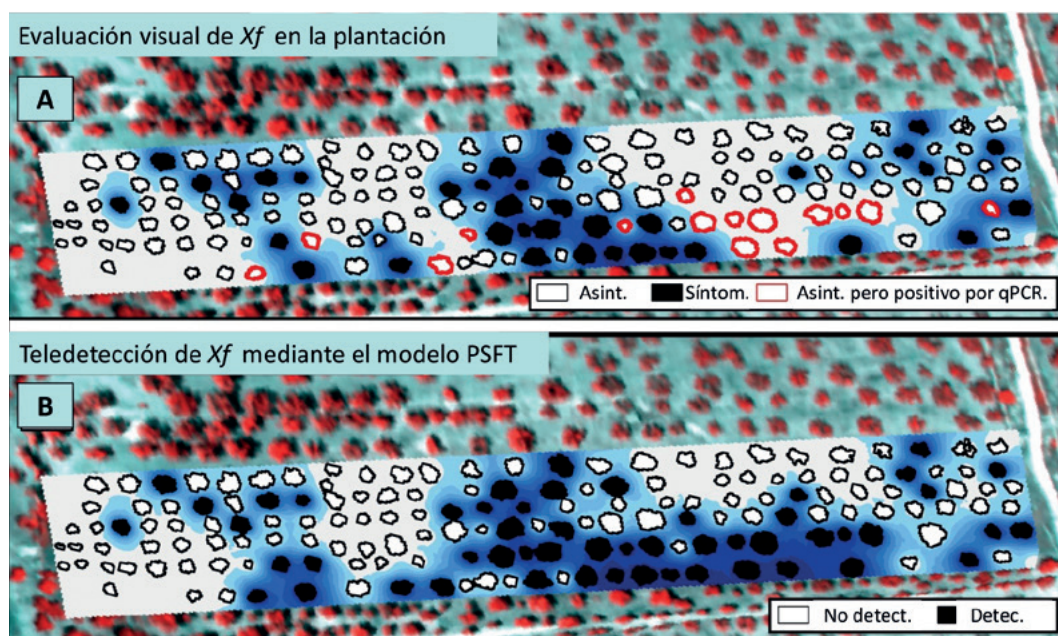
Según la plataforma Innovatione (2020), la agricultura es uno de los clientes y consumidores principales para toda la gama de servicios de teledetección de la tierra que se complementan entre sí e incluyen tecnologías de monitoreo espacial y aparatos no tripulados o drones. Actualmente, alrededor de nuestro planeta gira una cantidad importante de satélites que realizan teledetección, pero la resolución de estos datos es muy variable. Por ejemplo, los satélites de NASA y NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos) tienen una resolución de 1 km a 250 m y su ventaja principal es que cubren grandes superficies. Esa resolución, considerada como mediana, es suficiente para rastrear el movimiento de masas de aire, ciclones, frentes atmosféricos, etc. y prever sus posibles daños en los cultivos. Gracias a esta amplia cobertura de los datos de dichas imágenes satelitales, las compañías que se dedican a seguros de cultivos pueden medir con precisión el área afectada por una plaga o enfermedad en segundos. Estas tecnologías permiten obtener imágenes muy detalladas, ya que los satélites de porte menor proporcionan una resolución de unos 8 m y la tecnología punta aeroespacial ya ofrece imágenes satelitales de incluso 0,5 m. No obstante, esa imagen ya no cubre un territorio grande, sino un cuadrado de 10-12 km por cada lado. También miden el índice de vegetación de diferencia normalizada en el infrarrojo próximo. Las variaciones en la densidad de la vegetación son captadas por sensores remotos y se visualizan en la pantalla creando un contraste ligeramente exagerado entre sí. Con esta función, cualquier compañía agrícola puede determinar no solo el estado real de los cultivos, sino también calcular el área total de las zonas más o menos productivas dentro de un campo. Importantes avances en el uso de sensores remotos (satélites) para la caracterización y cuantificación de la masa vegetal en plantaciones en viñedo han sido desarrollados por el grupo de investigación UMA de la Universitat Politècnica de Catalunya (Campos et al., 2021), y todo ello ligado con la reducción del uso de PP. FF.

Los distintos sistemas de teledetección disponibles hoy día se basan muy a menudo en medir directamente la reflectancia de la vegetación o en convertir varios tipos de imágenes en valores de reflectancia. Además, la teledetección suele permitir ubicar geográficamente (geo-referenciar) la situación de estrés de las plantas mediante sistemas tales como el GPS (*Global Positioning System*, Sistema de Posicionamiento Global), para confeccionar mapas que permitan aplicar con precisión los recursos necesarios con los que mitigar o remediar las situaciones de estrés en los lugares donde tienen lugar y no en la totalidad de una plantación. En el caso de malas hierbas, el contraste de ellas con el suelo desnudo y con el cultivo permite la localización de los tratamientos herbicidas en función de la ubicación de los rodales de malas hierbas, y de hecho estos tratamientos son uno de los campos de la Sanidad Vegetal en los que más se ha utilizado la teledetección para localizar las acciones de control (Santos Valle y Kienzle, 2020). Una revisión sobre el tema y los resultados alcanzados en este tema en España pueden encontrarse en López-Granados (2011).

Foto 1. Teledetección de *Xylella fastidiosa* en plantaciones de olivo.

A. Mapa de una plantación con imágenes generadas mediante sensores hiperespectrales y térmicos remotos (modelo PSFT), en el que se muestra la evaluación visual de la enfermedad causada por *X. fastidiosa* realizada por un fitopatólogo en la plantación;

B. Detección de olivos infectados por *X. fastidiosa* mediante los sensores remotos del modelo PSFT. Los árboles visualmente asintomáticos que se demostraron infectados mediante ensayos de reacción en cadena de la polimerasa cuantitativa (qPCR) (indicados con perímetro rojo), en A, -y que por lo tanto no fueron percibidos durante la evaluación visual por el fitopatólogo-, fueron detectados por la teledetección remota con el modelo PSFT con una precisión de 91 %. La intensidad de la tonalidad azul se corresponde con las áreas más afectadas por *X. fastidiosa* (Cortesía de J. A. Navas).



La principal limitación que ha venido gravitando sobre la utilidad de la teledetección es la identificación precisa de la causa del estrés en la planta y por tanto el tipo de insumo a suministrar para mitigarlo. La incidencia concurrente sobre un cultivo de varios factores que pueden dar lugar a cambios muy similares en la reflectancia del cultivo o masa forestal (ej., sequía, distintas enfermedades y ataques por artrópodos fitófagos), hace difícil diferenciarlos por teledetección y por tanto mitigar sus efectos específicamente. Liaghat y Balasundram (2010) indicaron que en situaciones en las que unos pocos agentes nocivos afectan habitualmente a una planta y precisen de la mayoría de intervenciones, la investigación sobre teledetección se puede centrar en los efectos de esos estreses específicos en la planta para poderlos distinguir de los de otros agentes nocivos y localizar por tanto los lugares y momentos óptimos de intervención. Recientemente, Zarco-Tejada et al. (2021) han contribuido significativamente a dicho campo, al demostrar con técnicas de espectroscopía de imagen mediante sensores hiperespectrales a bordo de aviones tripulados, que existen indicadores espectrales específicos que diferencian entre el estrés de árboles de almendro y olivo asociado a la infección por la bacteria *Xylella fastidiosa* (Foto 1), de los debidos a la verticilosis causada por el hongo *Verticillium dahliae* (Foto 2) y los derivados de la falta de agua, siendo los tres difíciles de diferenciar visualmente por los síntomas morfológicos en la planta enferma. Además, dichos indicadores son específicos de cada especie arbórea, y son de gran repercusión para la monitorización, detección y para delimitar y evitar la expansión de las dos enfermedades en estados pre-sintomáticos y en grandes extensiones (cf., Capítulo C1.).

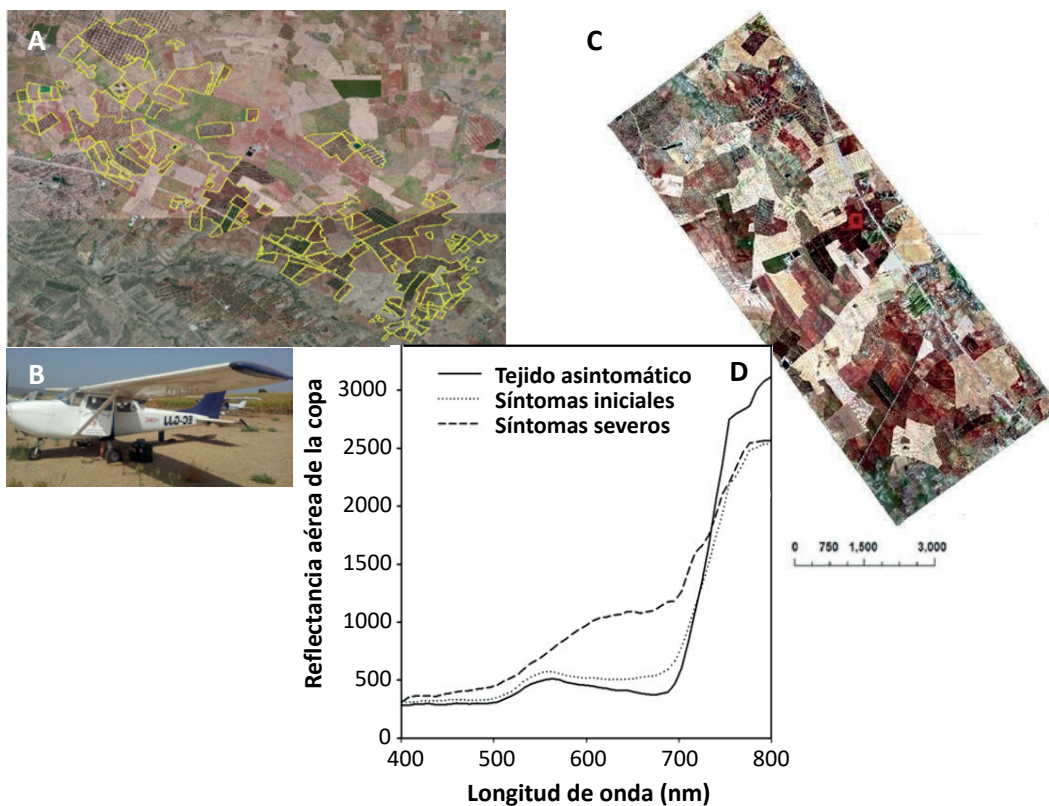


Foto 2. Uso de sensores hiperspectrales a bordo de aviones tripulados para la teledetección de enfermedades a gran escala.

A. Vista general de un área de 3.000 ha en Écija (Sevilla) que comprendía 130 olivares, sobrevolada a 500 m para la teledetección de olivos infectados por *Verticillium dahliae*;

B. Avioneta Cessna dotada de un sensor hiperspectral;

C. Mosaico hiperspectral obtenido con el sensor hiperspectral con una resolución de 50 cm instalado en la avioneta;

D. Reflectancia obtenida por las imágenes hiperspectrales de la copa de olivos infectados pero asintomáticos, o afectados con síntomas iniciales o severos de verticilosis. (Cortesía de J. A. Navas).

La Política Agrícola Común (PAC) de la UE proporciona subsidios a los agricultores y también supervisa el uso de subsidios por parte de los mismos. Y si en los años noventa este monitoreo se realizaba por inspectores que viajaban por todas las explotaciones, ahora el sistema de monitoreo de subsidios usa cada vez más los datos de teledetección. En Francia, por ejemplo, el monitoreo satelital de cultivos existe desde hace más de 15 años y la teledetección de las plagas y enfermedades se complementa con el control terrestre de un 5 % del territorio nacional con la ayuda de unas 1.500 personas. El resultado final de este trabajo conjunto se muestra en páginas web especializadas y por un precio razonable, los agricultores franceses pueden recibir recomendaciones concretas referidas a sus cultivos.

C2.3.2.2. Vehículos aéreos no tripulados

Los drones y otras plataformas de teledetección pueden proporcionar información en tiempo real, producir imágenes, capturar diferentes parámetros agronómicos y alertar a los agricultores sobre el progreso de un cultivo, el estado del suelo, o el aumento o riesgo de plagas, enfermedades y malas hierbas. El actual estado de interconectividad es algo inédito hasta ahora en agricultura, con altos niveles de captura, análisis y procesamiento de información entre los distintos equipos y los sistemas. Un ejemplo de esto es la web de *PlantVillage* (<https://plantvillage.psu.edu/topics/plantvillage>) en la que se tiene acceso a una amplia colección de imágenes y a través del aprendizaje automático, se pueden proporcionar diagnósticos de plagas y enfermedades más precisos que por otros medios (por ejemplo, consultar una guía de gestión integrada o usar cámaras telefónicas para diagnosticar enfermedades de los cultivos) y se vincula a satélites de comunicaciones a través de portales como el portal de acceso abierto para la productividad del agua (WaPOR) de la FAO (FAO, 2019).

Los drones resistentes al agua de lluvia pueden monitorear todo tipo de cultivo en cualquier área geográfica y bajo cualquier condición climática. También pueden obtener imágenes de mayor calidad y precisión en tiempo real ya que vuelan por debajo de las nubes y tienen una alta resolución fotográfica, muy superior a los satélites, que no funcionan bien cuando está nublado. Muchos algoritmos que se usan

son transparentes, habiendo sido contruidos junto con agrónomos en instituciones públicas como la FAO y la Organización del Sistema CGIAR. Sin embargo, la transparencia no se puede asumir en el sector privado, donde las cuestiones de propiedad intelectual exigen un código estricto.

En ciertos países como China, el uso agrícola de distintos tipos de aeronaves no tripuladas ha aumentado recientemente con la mayor demanda de Agricultura de Precisión. El enfoque de su uso allí es mejorar la eficiencia de la producción y reducir el daño ambiental de la escorrentía relacionada con las actividades actuales de manejo de cultivos. Una de las principales aplicaciones en dicho país es la protección de las plantas para aumentar la eficiencia del manejo de plagas y enfermedades y las ventajas son evidentes dado que China tiene el mayor número de fincas pequeñas del mundo. Los drones resultan muy útiles para las fincas en las regiones montañosas, en donde es difícil para las máquinas terrestres de tratamientos poder maniobrar y realizarlos (Yang et al., 2018).

También se está observando que el uso de drones agrícolas crece significativamente en la UE y actualmente los drones representan un sector de la aviación en rápido desarrollo en la UE con un gran potencial para crear nuevos puestos de trabajo por lo que la Comisión adoptó en 2018 un reglamento para integrar de forma segura los drones pilotados de forma remota en el espacio aéreo europeo. Se establecieron reglas comunes para la seguridad de la aviación civil y se estableció el registro obligatorio de ciertos tipos de drones y se prohibió que volaran a más de 150 m del suelo. En 2019, la Comisión Europea adoptó además reglas que establecen requisitos técnicos para drones. La Comisión predice que para 2035 este sector empleará directamente a más de 100.000 personas en la UE y tendrá un impacto económico superior a 10.000 millones de euros al año, principalmente en servicios. A medida que se extienda el uso de drones, también aumentará la necesidad de equilibrar las ventajas y los desafíos que traen consigo como la protección, privacidad, ruido y emisiones de CO₂, que es necesario controlar en todos los campos de su uso para contribuir a la sostenibilidad, especialmente en agricultura y silvicultura. En España su uso agrícola está creciendo exponencialmente desde hace unos años, ya que ofrecen una amplia gama de aplicaciones que mejoran con la Agricultura de Precisión.

C2.3.2.3. Robots para usos de protección de cultivos

Respecto a la robótica agrícola, no existe una definición formal para el término "robot agrícola" o *agrobot* y no existe un reconocimiento oficial de la función de los robots que realizan operaciones agrícolas. Lowenberg-DeBoer y Erickson (2019) proponen la siguiente definición para un robot de trabajo de campo: un dispositivo mecatrónico móvil, autónomo, de toma de decisiones que realiza tareas de producción de cultivos (por ejemplo, preparación del suelo, siembra, trasplante, escarda, control de plagas y cosecha) bajo supervisión humana, pero sin trabajo humano directo. En dos eventos celebrados en Toulouse en 2018 y 2019, del *International Forum of Agricultural Robotics* (FIRA) organizados por la *Global Organization for Agricultural Robotics* (GOFAR), se presentaron más de 60 proyectos internacionales sobre el desarrollo de *agrobots* y este número sigue creciendo. Comprenden una amplia gama de tamaños, están diseñados para una gran variedad de usos y aplican diferentes tecnologías. Solo un pequeño número se encuentra actualmente en la fase de comercialización, pero en los próximos años habrá una mayor disponibilidad. Según la FAO (2020), como alrededor del 90 % de los agricultores de todo el mundo operan a pequeña escala, esta nueva tecnología debería ser accesible para este gran grupo.

Un *agrobot* puede realizar una amplia gama de tareas. Los primeros *agrobots* disponibles comercialmente cubren tres tareas principales: detectar y eliminar malas hierbas, monitorear plagas y enfermedades y cosechar cultivos especializados (principalmente bayas u hortalizas). Un *agrobot* ofrece oportunidades de ahorro de costes y otras ventajas. En la actualidad, los principales impulsores para que los agricultores inviertan en *agrobots* tienen que ver con los aspectos económicos y medioambientales.

La adopción de agrobots en fincas comerciales ofrece importantes oportunidades de ahorro de costos y los robots agrícolas permiten al agricultor reducir los insumos (productos fitosanitarios, fertilizantes, etc.) con implicaciones positivas para el medio ambiente. El control mecánico de malas hierbas ya es una realidad. En la Tabla 1 se muestran algunos robots comerciales que realizan distintos tipos de tareas, especialmente la eliminación de malas hierbas. Como ejemplo, Dino es un robot que elimina las malas hierbas de los cultivos y es uno de los robots que en Francia se han desarrollado para la agricultura. Está especializado en la escarda mecánica de cultivos de hortalizas; reconoce las malas hierbas en las hileras de cultivos y puede discriminar entre la planta comercial y la mala hierba con inteligencia artificial aplicada al reconocimiento de imágenes. Ya está en producción y se habían vendido más de cien unidades a productores de cultivos hortícolas de alto valor ya que la escarda mecánica elimina los costos y riesgos asociados con el uso de herbicidas. También ahorra costes laborales, ya que una persona puede controlar simultáneamente hasta tres agrobots (Santos Valle y Klienzle, 2020).

Nombre	Función	Características
<i>Deserbiocut Weeding robot</i>	Elimina malas hierbas y mantiene las cubiertas del suelo	Prototipo de robot mecánico que elimina malas hierbas y funciona con energía solar
<i>Swarm Farm Crop protection robot</i>	Pulveriza tratamientos fitosanitarios	Pueden trabajar múltiples robots al mismo tiempo
<i>Ecorobotix Weeding robot</i>	Elimina malas hierbas y mantiene las cubiertas	Prototipo de robot mecánico que elimina malas hierbas y funciona con energía solar
<i>Dino Weeding robot</i>	Elimina malas hierbas de distintos cultivos	Detecta las filas del cultivo y acerca el apero a la mala hierba todo lo posible.
<i>Ted Weeding robot</i>	Elimina malas hierbas de distintos cultivos, especialmente de viñedos	Escarda mecánica
<i>Oz Weeding robot</i>	Elimina malas hierbas de distintos cultivos	Especialmente apto para cultivos hortícolas

Tabla 1. Robots comerciales presentados en 2018 para labores agrícolas (modificada de Santos Valle y Klienzle, 2020).

Además de las labores descritas en la Tabla 1, hay otros muchos tipos de trabajos agrícolas que pueden ser realizados por robots y otros en los que el trabajo manual todavía no puede ser sustituido, pero sí puede ser complementado con robots (Vasconez et al., 2019)

C2.3.3. Aplicación de productos fitosanitarios

Cuando las técnicas de control de agentes nocivos se basan en el tratamiento con productos terapéuticos y se toma la decisión de aplicarlos, se utilizan métodos para medir los parámetros de la vegetación que permitan optimizar la dosis o volumen a aplicar en función de la geometría y superficie del follaje. Cuando ese carácter no es uniforme en un cultivo, sino que hay una cierta variabilidad espacial y temporal, la cantidad de fitosanitario a aplicar debe estar en relación con esa variabilidad. A título de ejemplo, en el caso de frutales y viñedo, se ha desarrollado un sistema que permite mejorar la precisión en la pulverización de cultivos de tres dimensiones mediante la estimación del índice de superficie foliar (leaf area index, LAI) a partir de la altura, la anchura, la distancia entre filas y el estado fenológico de la plantación. Con ello se ha conseguido adaptar la dosis a la superficie foliar y reducir el volumen del PF aplicado (Román et al., 2020) (www.dosa3d.En). El ajuste de la dosis de PF y el volumen de aplicación en viña basado en las características estructurales de la vegetación ha permitido la reducción de la cantidad

de producto en algunos casos superior al 40 % gracias al empleo de aplicaciones como DOSAVIÑA® (www.dosavina.upc.edu), una aplicación para Smartphone desarrollada por la Universitat Politècnica de Catalunya y que está siendo empleada en todas las zonas vitícolas mundiales (Gil et al., 2019) (Foto 3A,B). Dicha reducción se puede acentuar con el uso de SADs basados en el conocimiento científico de la dinámica de poblaciones de los artrópodos fitófagos y la epidemiología de las enfermedades, que no es aportado por las tecnologías de Agricultura de Precisión. Por ejemplo, un meta-análisis realizado por Lázaro et al. (2021) muestra que el número de tratamientos fungicidas para el control de micosis vegetales se redujo al menos en un 50%, cuando la estrategia de aplicación se apoyó en sistemas de estimación de riesgo, en lugar de la estrategia comúnmente practicada según calendarios prefijados.

Foto 3. Mejoras en la aplicación de PP. FF. mediante tecnologías de agricultura de precisión. **A, B.** Ahorro de volumen del PF aplicado cuando el pulverizador es capaz de medir en cada momento la superficie foliar (LAI) de la vegetación a tratar: en el estadio temprano (A) con un valor LAI de 0,38, el gasto en el tratamiento fue de 275 L × ha⁻¹ que significó un ahorro de 27 % del gasto de 375 L × ha⁻¹ en el tratamiento tardío, con plena vegetación (B) y un valor de LAI de 1,54 (Cortesía C. Román). **C, D.** Desarrollo de un mapa de infestación de malas hierbas en un cultivo de maíz desde un vehículo ATV (quad) utilizando las señales de dos sensores optoelectrónicos conectados a un sistema GPS. La evaluación se realiza únicamente entre los surcos de maíz, donde la única vegetación detectada corresponde a las malas hierbas (Cortesía de C. Fernández de Quintanilla).



La reducción del uso de PP. FF. en Europa, tal como se establece en la estrategia europea “Del Campo a la Mesa” (COM, 2020) puede también conseguirse empleando las nuevas tecnologías combinadas con una adecuada formación del usuario. Un ejemplo de los nuevos avances lo podemos observar en el desarrollo de equipos capaces de aplicar de forma variable en función de las características de la vegetación que se ha llevado a cabo en el seno del proyecto H2020 OPTIMA (<http://optima-h2020.eu>). Entre otros avances, el desarrollo de un equipo de aplicación variable para frutales, llevado cabo por el grupo de investigación de la Universitat Politècnica de Catalunya (Salas et al., 2022) permite ahorros de hasta el 20 % en función de la heterogeneidad de la plantación, y todo gracias al empleo de tecnologías como sensores de ultrasonidos y dispositivos de posicionamiento.

Además de las variadas técnicas de teledetección, se está ensayando la utilidad de sensores de proximidad que permiten detectar en el propio cultivo, o en el suelo del mismo, la cantidad de organismo nocivo y su localización (Foto 3C, D) (Peña et al., 2015). Véase, por ejemplo, el prototipo RoboWeedMaps desarrollado en la Universidad de Aarhus, Dinamarca (<https://vision.eng.au.dk/roboweedmaps/>). Estos sensores de proximidad se pueden incorporar a la propia maquinaria de pulverización o espolvoreo, o instalarlos de manera fija y geo-referenciada en lugares determinados del cultivo o masa forestal. Ese es el caso, por ejemplo, de las trampas electrónicas de insectos plaga. Así, un sistema de toma de decisiones

basado en el uso de trampas electrónicas geo-referenciadas, permitió en las Islas Baleares adaptar las necesidades de PF para el control de la mosca de la aceituna, *Bactrocera oleae*, a las capturas en las trampas de feromonas en cada zona del olivar, mejorar por tanto su eficiencia y aumentar la compatibilidad con la acción de los enemigos naturales de control biológico (Kalamatianos et al., 2018).

Aunque la Agricultura de Precisión ha empezado a desarrollar técnicas de aplicación de PP. FF. que están permitiendo mejorar su eficiencia y mitigar sus efectos negativos sobre la salud humana y el medio ambiente, **la mayor parte de limitaciones encontradas precisan de más conocimientos y de la innovación que de ellos se derive.** En tal sentido, los objetivos de la I + D en Sanidad Vegetal que deberían promover avances en la aplicación de técnicas de control de mayor precisión de la que tienen las técnicas actuales, incluyen, entre otros: (i) la mejora de los sistemas que permiten caracterizar la vegetación a tratar, tanto en cultivos como en masas forestales; (ii) el reconocimiento en la legislación fitosanitaria de la necesidad de no tratar las superficies no diana de la vegetación para disminuir los riesgos y el impacto ambiental de los tratamientos fitosanitarios; (iii) la caracterización de la distribución espacial de las poblaciones de organismos nocivos y de las plantas afectadas; y (iv) la modelización de la dinámica de los mismos que permita predecir el resultado de variar la cantidad de insumo a aplicar, o los provenientes de los cambios en las condiciones climáticas.

C2.3.4. Otros ámbitos para la mejora de la Sanidad Vegetal con la Agricultura de Precisión

El desarrollo de sensores que permitan registrar datos de los diversos factores medioambientales que influyen sobre las plagas, enfermedades y malas hierbas, y su utilización en sistemas de toma de decisiones, no solo concierne a la aplicación de productos fitosanitarios, sino que también puede ser de utilidad para varios sistemas de producción y diversas técnicas de protección. Un ámbito en el que la aplicación de la Agricultura de Precisión está progresando rápidamente es el de los **cultivos protegidos, en donde los factores medioambientales a los que están expuestas las plantas están más controlados y pueden ser medidos y modificados con gran precisión.** Los invernaderos se pueden manejar para ajustar las condiciones ambientales en cada momento y lugar, de manera que prevalezcan en los niveles óptimos para reducir al mínimo posible el riesgo de plagas y enfermedades o su diseminación a corta distancia, en base a modelos epidemiológicos y de dinámica de poblaciones que nutren los sistemas de toma de decisiones específicos de cada especie cultivada (Kumar et al., 2021). Asimismo, los mencionados sensores también se pueden incorporar a los sistemas de cultivo sin suelo para la adecuación de la cantidad y momentos de aplicación de PP. FF. y otros insumos.

Posiblemente, **la monitorización de las plagas, enfermedades y malas hierbas sea el campo en el que la Agricultura de Precisión debería contribuir en mayor medida en los próximos años a ofrecer al agricultor o silvicultor y al técnico:** (i) datos de previsión y recomendaciones de tratamiento específicos de cada explotación, optimizados y reducidos al máximo; (ii) sistemas de gobierno basados en satélites; (iii) equipos de protección de cultivos basados en sensores y satélites; (iv) aplicación de herbicidas con tecnología de sensores; (v) otros métodos de control de malas hierbas controlado por sensores y /o robots; y (vi) uso de drones para aprovechar el tiempo de tratamiento óptimo y la reducción de la deriva de los tratamientos.

De la mejora en la precisión y rapidez en las intervenciones, y del ahorro de mano de obra en ese ámbito, dependen en buena medida la aplicabilidad de métodos no químicos para la gestión integrada de los agroecosistemas; en la actualidad, los costes de varios de dichos métodos son todavía demasiado altos si se quieren aplicar con la precisión requerida. **La adquisición, digitalización y uso de datos sobre la densidad de población de los artrópodos fitófagos y malas hierbas y de la incidencia y severidad de las enfermedades se pueden mejorar con diversas técnicas que hoy en día se están investigando, como**

es el caso del reconocimiento de imágenes (Mahlein, 2016; Kalamatianos et al., 2018) o las incluidas en la llamada inteligencia artificial. Es posible que el equipamiento necesario para ello sea excesivamente costoso para su adquisición por pequeños productores y se precise de formación muy especializada para su utilización; en ese caso, se pueden organizar servicios mancomunados por zonas y grupos de cultivo que facilite la asesoría por personal especializado. Una ventaja adicional de la utilización de técnicas de la Agricultura de Precisión es que los datos digitalizados de varios lugares y años se pueden almacenar, intercambiar y analizar conjuntamente para corregir las decisiones que se hayan demostrado como ineficientes (White et al., 2021) y para ganar en la trazabilidad de las decisiones aplicadas en todo el proceso relativo a la Sanidad Vegetal, desde el productor hasta el consumidor.

Consciente de todo ello, el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación ha publicado el **II Plan de Acción 2021-2023 de la Estrategia de Digitalización del sector agroalimentario y del medio rural**, con un importe de 64 millones de euros para dicho período. Entre otros temas, supone un cambio en la apertura de datos, la formación y el asesoramiento en competencias digitales, la generación de información o la financiación al emprendimiento digital. Su presupuesto supone más del 87 % del presupuesto total del Plan y el 70 % de este bloque se financia con fondos europeos de recuperación. Por otra parte, el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia para canalizar los fondos destinados por la UE para hacer frente al impacto económico de la pandemia de la COVID-19, también contempla una serie de medidas para la ejecución de la estrategia de digitalización del sector agroalimentario que incluyen aprobar el programa de apoyo para la aplicación de la agricultura de precisión y tecnología 4.0 en el sector agrícola y ganadero.

C2.4. A modo de conclusiones

Según Adam (2020), la gran pregunta actual es ¿cuándo y cómo se utilizarán los drones y los robots en las explotaciones agrícolas y forestales europeas para diagnosticar problemas fitosanitarios, aplicar productos y mejorar la producción de los cultivos? Si bien existen prototipos de *agrobots*, aún no se están utilizando de forma rutinaria en el campo español. Sin embargo, los drones ya están despegando en nuestra agricultura. Aunque utilizados principalmente para capturar imágenes y proporcionar datos, los drones permiten el monitoreo permanente de un cultivo y pueden ayudar a los agricultores a reaccionar más rápidamente ante amenazas como malas hierbas, plagas y enfermedades y mejorar la aplicación en tiempo real. En Japón, por ejemplo, los drones realizan tratamientos aéreos y se utilizan para distribuir ciertos agentes biológicos como huevos de avispa. Pero actualmente estos tratamientos están muy restringidos en la UE, precisan de autorización expresa previa y solo se pueden usar para aquellos productos autorizados para tratamientos aéreos. La teledetección también podría ser utilizada en las prospecciones oficiales, como en el caso de *X. fastidiosa*, bacteria prioritaria de cuarentena en la UE y para la que ya existe una metodología puesta a punto para ser usada en vehículos tripulados (Zarco-Tejada et al., 2021).

Como se indicaba al principio, para aumentar la productividad agrícola y la sostenibilidad en la Sanidad de los cultivos y las masas forestales, se hace ineludible suministrar en el lugar exacto necesario la cantidad necesaria de insumo para optimizar el rendimiento y reducir el riesgo de impactos negativos sobre el consumidor y el medio ambiente. Medir con precisión en el espacio y el tiempo las características y condiciones bióticas y abióticas del medio, permitirá saber dónde y cuándo hay que suministrarlos y modificar las condiciones ambientales para hacerlas óptimas. Esos datos, preferentemente digitalizados, serán procesados por equipamientos de precisión con la finalidad de proveer al cultivo con las condiciones y recursos definidos por modelos *ad hoc*. En un reciente estudio promovido por el Panel para el Futuro de la Ciencia y la Tecnología (*Panel for the Future of Science and Technology* (STOA) de la Secretaría del Parlamento de la UE, en el que se evalúa el impacto potencial de la Agricultura de Precisión y otros seis tipos de tecnologías para la protección de los cultivos (mecanización, mejora genética, control biológico, resistencia inducida, aplicación

de principios ecológicos para la diversificación de los sistemas, y los productos fitosanitarios), Bremmer et al. (2021) concluyen que la Agricultura de Precisión tiene un impacto potencial positivo en el rendimiento de los cultivos y la competitividad agrícola en la UE, así como en otros factores relacionados con la biodiversidad, el medio ambiente, y la salubridad y seguridad alimentarias.

En este capítulo se han expuesto varios ejemplos de los progresos que se están haciendo en la aplicación de la Agricultura de Precisión en el campo de la Sanidad Vegetal y de algunas limitaciones que deben resolverse con la investigación en los próximos años, incluyendo: (i) la teledetección o los sensores de proximidad para el seguimiento de las poblaciones de los agentes nocivos o de sus efectos en el cultivo, y del estado de crecimiento o desarrollo del mismo; (ii) la aplicación de PP. FF. en cultivos 3D, con la determinación del volumen de producto a aplicar y la discriminación de los lugares del campo de cultivo en donde no es necesario hacerlo; y (iii) la posibilidad de modificar las condiciones medioambientales en cultivos de invernadero, de manera que resulten menos favorables para el desarrollo de plagas y enfermedades sin afectar el desarrollo óptimo del cultivo, está particularmente avanzada.

Uno de los campos en donde tradicionalmente se ha ambicionado la automatización fiable es en la identificación de los agentes nocivos; si bien todavía se limitan a ciertas plagas, enfermedades o malas hierbas, los progresos logrados en este campo, a pesar de los esfuerzos de investigación que se están llevando a cabo en muchos modelos, son insuficientes. Por otra parte, los avances del uso de vehículos aéreos en China han creado nuevos desafíos todavía no totalmente resueltos para la industria de la aviación no tripulada en el monitoreo de cultivos, muestreos de plagas y enfermedades, de malas hierbas y tecnología de tratamientos (Yang et al., 2018).

Según la FAO (FAO, 2020; Santos Valle y Klienzle, 2020) la denominada Agricultura 4.0 integra ya una serie de innovaciones para producir productos agrícolas. Estas innovaciones engloban la Agricultura de Precisión, pero también Internet de las cosas y *big data* para lograr una mayor eficiencia de producción. Internet de las cosas es la infraestructura de red global donde se descubren objetos físicos y virtuales con identidades únicas integrados a la perfección (teniendo en cuenta los problemas de seguridad y privacidad) en la red de información asociada, desde donde pueden ofrecer y recibir servicios que son elementos de los procesos de negocio definidos en el entorno en el que se activan (Kiritsis, 2010). La inteligencia artificial es la capacidad de un ordenador digital o un robot controlado por ordenador para realizar tareas comúnmente asociadas con seres inteligentes y pueden ser programas que se comportan como humanos, operan como humanos y piensan como humanos, o tener su propia forma racional de procesar información y/o comportamiento, aun con las limitaciones de la inteligencia computarizada. Sus aplicaciones son infinitas en las muchas características de la tecnología (Santos Valle y Klienzle, 2020). Además, en el contexto de la agricultura, cualquier elemento que intervenga en la cadena de valor del cultivo producirá datos que luego podrán ser procesados para diversos fines. La tecnología de la información y las comunicaciones (TIC) incluye diferentes tipos de tecnologías que transmiten información a los usuarios a través de telecomunicaciones. Incluyen redes inalámbricas, *bluetooth*, internet, teléfonos móviles, SMS y MMS o el Método LIDAR que combina diferentes sensores de varias frecuencias y tipos de luz para medir distancias que luego pueden usarse para crear imágenes en 3D (Santos Valle y Klienzle, 2020).

Esta Agricultura 4.0, que ya está en marcha, forma parte de la dimensión 4.0 en la que todo está conectado. Todo emite datos que pueden ser captados y analizados de forma masiva. Y tras este análisis, el agricultor o técnico usuario recibe las mejores opciones para no errar en su decisión. Se trata de disponer de toda la información suministrada por la gran cantidad de sensores que coexisten en una explotación agrícola, poderla centralizar a través de internet y permitir la toma de decisiones inteligentes basadas en dicha información, bien en tiempo real, bien en diferido. Podríamos decir que

es la aplicación del *bigdata* al sector agrícola con el apoyo de sistemas de captación y transmisión de datos en tiempo real.

Al igual que en la industria, en la agricultura 4.0, mediante el uso de brazos robóticos o de vehículos autónomos, es posible automatizar la realización de diversas tareas de mantenimiento o manejo de los campos o comprobar el estado de los cultivos mediante el uso de otros sensores, y tomar las medidas necesarias. **Con los datos recopilados mediante otras tecnologías y sensores, es posible hacer uso del *Machine Learning*.** Mediante esta tecnología se puede analizar los datos obtenidos para extraer diversas conclusiones, a la vez que se aprende de la nueva información de dichos datos. El uso de estas tecnologías permite determinar múltiples variables, por ejemplo, el momento óptimo para cosechar cultivos, o las medidas necesarias para una mayor calidad del producto.

La Agricultura 4.0 contempla cómo se cultiva actualmente en algunas explotaciones de países con una agricultura muy tecnificada y cómo serán en el futuro próximo las producciones agrarias, donde la robótica, las telecomunicaciones, la información digital y el marketing digital estarán detrás de nuestros alimentos, nuestra ropa y de millones de productos derivados de la agricultura y la silvicultura. Y ello exigirá formación especializada adicional de los agricultores, asesores y técnicos para hacer frente a todos los desafíos planteados; pero hay que ser conscientes de que la agricultura del mañana, se está ya escribiendo hoy.

Finalmente, un aspecto importante a tener en cuenta para garantizar el éxito de cualquier desarrollo tecnológico es el relacionado con la formación de los usuarios. De nada sirven los interesantes desarrollos tecnológicos anteriormente expuestos si estos no llegan de forma adecuada al usuario final o si, por las razones que fueren, la información no se canaliza de forma adecuada. Este es un aspecto de absoluta prioridad para la Comisión Europea que pone siempre en el centro de atención de todas sus acciones al agricultor como usuario final. Como ejemplo de acciones dedicadas a mejorar el nivel de conocimiento y la adopción de nuevas tecnologías por parte de los agricultores europeos puede destacarse la nueva Plataforma INNOSETA (www.innoseta.eu). INNOSETA, un proyecto Europeo liderado por la Universitat Politècnica de Catalunya (Gil et al., 2020) ofrece a todos los usuarios implicados en el proceso de protección de cultivos, una plataforma totalmente accesible, disponible en ocho idiomas distintos, donde de forma fácil y ordenada el usuario puede conocer y utilizar todos aquellos materiales, desarrollos industriales, materiales formativos y otros elementos ya disponibles que, por causas diversas, muchas veces jamás podría servirse de ellos.

C2.5. Bibliografía

Adam, U. 2020. Precision farming and drones. <https://croplife.org/case-study/precision-farming-and-drones-enhance-application-of-crop-protection-products/> (consultado 10 noviembre 2021).

Bremmer, J., Riemens, M., y Reinders, M. 2021. The future of crop protection in Europe. Scientific Foresight Unit (STOA). European Parliamentary Research Service. PE 656.330. 44 pp.

Campos, J., García-Ruiz, F., y Gil, E. 2021. Assessment of vineyard canopy characteristics from vigour maps obtained using UAV and satellite imagery. *Sensors* 21: 2363. <https://doi.org/10.3390/s21072363>.

COM. 2020. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions A

Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0381>

European Commission. 2014. Precision agriculture – An opportunity for EU farmers – Potential support with the CAP 2014-2020. European Parliament's Committee on Agriculture and Rural Development. Joint Research Centre (JRC) of the European Commission. Monitoring Agriculture ResourceS (MARS) Unit H04. <http://www.europarl.europa.eu/studies>.

FAO. 2019. WaPOR - FAO portal to monitor water productivity through open access of remotely sensed derived data. <https://wapor.apps.fao.org>. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.

- FAO. 2020. Agriculture 4.0. Agricultural robotics and automated equipment for sustainable crop production. Integrated Crop Management 24. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- Gebbers, R., y Adamchuk, V. 2010. Precision agriculture and food security. *Science* 327: 828-831. doi.org: 10.1126/science.1183899.
- Gil E., Campos, J., Ortega, P., Llop J., Gras A., Armengol E., Salcedo R., y Gallart M. 2019. DOSAVIÑA: Tool to calculate the optimal volume rate and pesticide amount in vineyard spray applications based on a modified leaf wall area method. *Comput. Electron. Agric.* 160: 117-130.
- Gil, E., Gallart, M., Gioelli, F., Balsari, P., Koutsouris, A., Codis, S., Nuyttens, D., y Fountas, S. 2020. INNOSETA – An H2020 European project to fill the gap between research and professional users in crop protection. En: P. Balsari, S. E. Cooper, E. Gil, C. R. Glass, W. Jones, B. Magri, y J. Van de Zande, eds. *Aspects of Applied Biology* 144, 2020 International Advances in Pesticide Application. Brighton (UK).
- Gogoi, N.K., Deka, B., y Bora, L.C. 2018. Remote sensing and its use in detection and monitoring plant diseases: A review. *Agric. Rev.* 39: 307-313.
- Hearn, A.B., y Bange, M.P. 2002. SIRATAC and Cotton LOGIC: persevering with DSSs in the Australian cotton industry. *Agric. Syst.* 74: 27-56.
- Innovatione. 2020. Aplicaciones de satélites de teledetección en agricultura. Innovatione <https://innovatione.eu/2020/07/15/aplicaciones-satelites-teledeteccion-agricultura/>
- Kalamatianos, R., Karydis, I., Doukakakis, D., y Avlonitis, M. 2018. DIRT: The *Dacus* image recognition toolkit. *J. Imaging* 4: 129.
- Kiritsis, D. 2010. Closed-loop PLM for intelligent products in the era of the internet of things. *Comput-Aided Des.* 43: 479-501. doi:10.1016/j.cad.2010.03.002.
- Kumar S., Saravaiya S. N., y Pandey, A. K. 2021. Precision farming and protected cultivation. Concepts and applications. CRC Press 342 pp.
- Lázaro, E., Makowski, D., y Vicent, A. 2021. Decision support systems halve fungicide use compared to calendar-based strategies without increasing disease risk. *Commun. Earth Environ.* 2: 224. doi.org/10.1038/s43247-021-00291-8.
- Liaghat, S., y Balasundram, S.K. 2010. A Review: The role of remote sensing in precision agriculture. *Am. J. Agric. Biol. Sci.* 5: 50-55.
- López-Granados, F. 2011. Weed detection for site-specific weed management: mapping and real-time approaches. *Weed Res.* 51, 1-11.
- Lowenberg-DeBoer, J., y Erickson B. 2019. Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy J.* 111,4:1-18.
- Mahlein, M. 2016. Plant disease detection by imaging sensors. Parallel and specific demands for Precision Agriculture and plant phenotyping. *Plant Dis.*:241-251. doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340-FE.
- Montull, J.M., Soenderskov, M., Rydhal, P., Boejer, E.M., y Tamberner, A. 2014. Four years validation of decision support optimising herbicide dose in cereals under Spanish conditions. *Crop Prot.* 64: 110-114
- Nabi, A., Narayan, S., Afroza, B., Mushtaq, F., Mufri, S., y Malik, A. 2017. Precision farming in vegetables. *J. Pharmacogn. Phytochem.* 6: 370-375.
- Peña, J.M., Torres-Sánchez, J., Serrano-Pérez, A., De Castro, A.I., y López-Granados, F. 2015. Quantifying efficacy and limits of unmanned aerial vehicle (UAV) technology for weed seedling detection as affected by sensor resolution. *Sensors* 15: 5609-5626.
- Román, C., Llorens, J., Uribeetxebarria, A., Sanz, R., Planas, S., y Arnó, J. 2020. Spatially variable pesticide application in vineyards: Part II, field comparison of uniform and map-based variable dose treatments. *Biosyst. Eng.* 195: 42-53.
- Salas, B., Ortega, P., Berger, L., y Gil, E. 2022. Smart orchard sprayer to adjust pesticide dose to canopy characteristics. Págs. 157-164, en: P. Balsari, S. E. Cooper, E. Gil, C. R. Glass, W. Jones, B. Magri, y J. Van de Zande, eds. *Aspects of Applied Biology* 147, 2022 International Advances in Pesticide Application, Münster (Germany).
- Santos Valle, S., y Kienzle, J. 2020. Agriculture 4.0 – Agricultural robotics and automated equipment for sustainable crop production. Integrated Crop Management Vol. 24. Rome, FAO.
- Sims, B., Corsi, S., Gbehounou, G., Kienzle, J., Taguchi, M. y Friedrich, T. 2018. Sustainable weed management for conservation agriculture: Options for smallholder farmers. *Agriculture*, 8: 118. <https://doi.org/10.3390/agriculture8080118> (consultado 14 octubre 2021).
- Stern, V. M., Smith, R.F., van den Bosch, R., y Hagen, K.S. 1959. The integrated control concept. *Hilgardia* 29: 81101.
- Vasconez, J.P., Kantor, G.A., y Auat Cheein, F.A. 2019. Human-robot interaction in agriculture: A survey and current challenges. *Biosyst. Eng.* 179: 35-48.
- Weiss, M., Jacob, F., y Duveiller, G. 2020. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sens. Environ.* 236. doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402.
- White, E.L., Thomasson, J.A., Auvermann, B., Kitchen, N.R., Pierson, L.S., Porter, D., Baillie, C., Hamann, H., Hoogenboom, G., Janzen T., Kosla R., Lowenberg-DeBoer J., McIntosh, M., Murray S., Osmond D., Setty, A., Stevenson, C., Tevis, J., y Werner, F. 2021. Report from the Conference "Identifying obstacles to applying big data in agriculture". *Precis. Agric.*: 306-309.
- Yang, S., Yang X., y Mo, J. 2018. The application of unnammed aircraft systems to plant protection in China. *Precis. Agric.*: 278-92.
- Zarco-Tejada, P.J. Poblete, T., Camino, C., Gonzalez-Dugo, V., Calderon, R., Hornero, A., Hernandez-Clemente, R., Román-Écija, M., Velasco-Amo, P., Landa, B.B., Beck, P.S.A., Saponari, M., Boscia, D., y Navas-Cortés, J.A. 2021. Divergent abiotic spectral pathways unravel pathogen stress signals across species. *Nat. Commun.* 12: 6088. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26335-3>.

C3. Capítulo C3. El desarrollo y utilización de cultivares resistentes a organismos nocivos como elemento clave de la Sanidad Vegetal

C3.1. Razón de ser de la resistencia a organismos nocivos en la Sanidad Vegetal

El número de enfermedades y plagas que afectan a los cultivos y masas forestales es comparativamente pequeño, si se consideran la cantidad y diversidad de artrópodos y otros invertebrados fitófagos, patógenos microbianos (bacterias, fitoplasmas, hongos, nematodos, oomicetos, protozoos, virus, y viroides) y plantas superiores parásitas que interaccionan de forma continua con las especies agrícolas y silvícolas en la naturaleza. Esta limitación es consecuencia de un conjunto de capacidades denominadas colectivamente **resistencia**, que las plantas han desarrollado en el curso de su co-evolución con los distintos organismos nocivos para reducir la magnitud del perjuicio asociado al parasitismo –que en el caso de las enfermedades da lugar al concepto de **patogenismo** (parasitismo que da lugar a enfermedad)– y a la fitofagia.

La existencia de variación en la severidad de los ataques de enfermedades y plagas entre diferentes cultivares de plantas ha sido observada y descrita desde el siglo XVIII, pero su naturaleza genética no se estableció hasta principios del siglo XX, cuando Biffen describió que la resistencia a la roya amarilla del trigo (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) era regulada por un solo gen recesivo. En la actualidad, **el uso de cultivares de plantas resistentes a los agentes causales de plagas y enfermedades es posiblemente el método de control más económicamente eficiente y ambientalmente sostenible** (Foto 1A-C). Comparado con el uso de productos fitosanitarios presenta las ventajas de: (i) tener menor coste; y (ii) carecer de efectos negativos sobre la salud de agricultores y consumidores, y el medioambiente. Además, la resistencia en la planta no solo es **compatible con la aplicación de otros métodos de control de enfermedades y plagas** (ej., control biológico, modificaciones en prácticas de cultivo, etc.) sino que potencia su efectividad, por lo cual es **elemento clave para aplicación eficiente de la Gestión Integrada (GIP)** de aquellas. Por ello, la identificación y posterior introgresión de genes de resistencia contra los organismos nocivos se considera en la actualidad un **objetivo clave en los programas de mejora genética de las plantas cultivadas y especies forestales** (Bailey-Serres et al., 2019). Una amplia descripción de los programas de mejora genética para resistencia a artrópodos fitófagos y patógenos de los principales cultivos herbáceos extensivos, hortícolas y frutales leñosos en España se puede encontrar en Pérez de Castro y Díez Niclós (2019).

La mejora genética de la resistencia a agentes causantes de enfermedades y plagas presenta **características que la diferencian de la que tiene como objetivos otros caracteres** (ej., rendimiento, sequía, temperaturas desfavorables, etc.), porque: (i) los **fitófagos y patógenos desarrollan en el curso del tiempo variantes que superan las resistencias desplegadas en cultivos y áreas geográficas** (ej., variantes patogénicas, ver más abajo) -de manera que aquellas **no son necesariamente estables y efectivas en diferentes áreas de cultivo**-; y (ii) debe asegurar que la introgresión de genes de resistencia no origina detrimento alguno en el rendimiento y calidad de la cosecha de cultivares mejorados. Además, el desarrollo de resistencia a organismos nocivos es un proceso prolongado y costoso si se usan las técnicas convencionales (que excluyen la transgénesis), y requiere de una estrecha **colaboración interdisciplinaria entre genetistas, entomólogos y patólogos agro-forestales** porque el éxito en la mejora requiere un **profundo conocimiento de la biología de los fitopatógenos y los fitófagos, así como de los mecanismos de interacción con sus plantas huésped**. Todo ello hace que la mejora contra los agentes causantes de enfermedades y plagas deba ser concebida como **estratégica y continuada en**

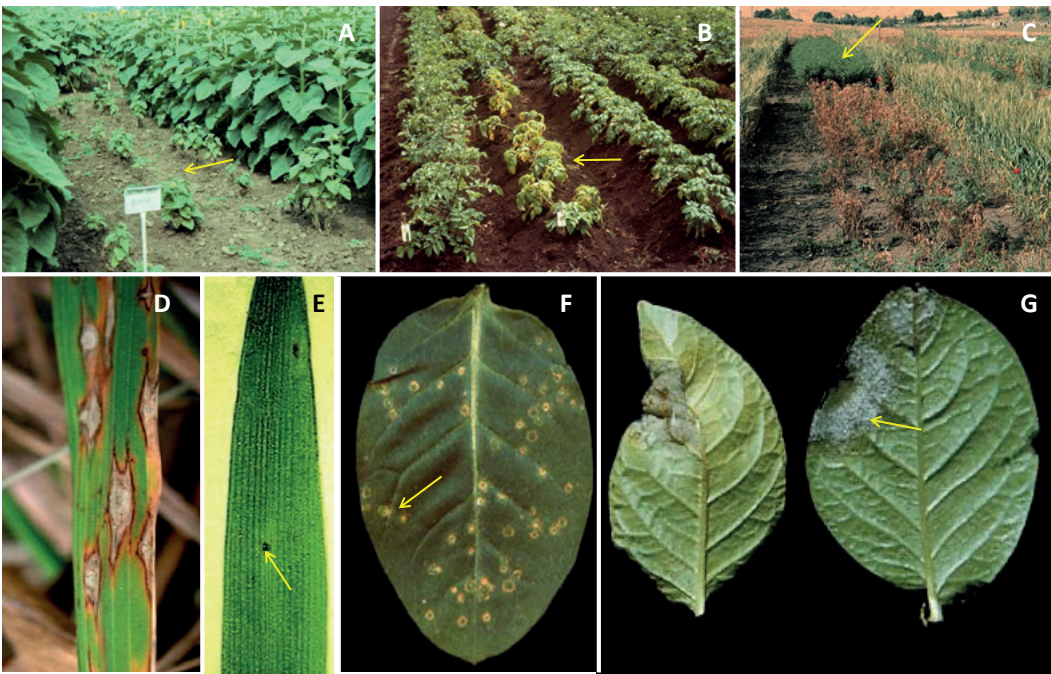


Foto 1. Selección y fenotipos de resistencia a agentes fitopatógenos en plantas cultivadas. **A.** Selección de genotipos de girasol resistentes a *Plasmopara halstedii*, el oomiceto causante del mildiu (nótese las plantas enanas susceptibles indicadas por la flecha); **B.** Selección de genotipos de patata resistentes a *Ralstonia solanacearum*, la bacteria que causa la marchitez (nótese las plantas susceptibles amarillentas indicadas por la flecha) (Cortesía de H.D. Thurston); **C.** Eficiencia del cultivar de garbanzo resistente 'ILC 72' (flecha) comparado con el tratamiento del cv. 'Blanco lechoso' susceptible con el fungicida bitertanol, en el control de la rabia del garbanzo causada por el hongo *Ascochyta rabiei* (nótese las plantas de garbanzo necrosadas y las líneas de trigo que las limitan, que actuaban de barrera entre parcelas de garbanzo adyacentes); **D.** Lesiones foliares en arroz susceptible a la necrosis de la panoja del arroz causada por *Magnaporthe oryzae* (anamorfo: *Pyricularia oryzae*); **E.** Resistencia hipersensible a *M. oryzae* en arroz expresada por el punto necrótico que indica la flecha; **F.** Resistencia hipersensible en hojas de tabaco al virus de la mancha anular del tomate (*Tomato Ring Spot Virus*, ToRSV), expresada por la formación de lesiones necróticas (flecha) en la que permanece circunscrito el virus (Cortesía de H.D. Thurston); **G.** Síntomas y esporulación de *Phytophthora infestans* (agente causal del mildiu) en hojas de un cultivar de patata con resistencia parcial (izda.) comparado con los que se producen en un cultivar susceptible (flecha) (Cortesía de H.D. Thurston).

el tiempo, a fin de hacer posible el desarrollo de resistencias efectivas contra las nuevas variantes para sustituir a los cultivares superados por estas.

C3.2. Naturaleza de la resistencia a agentes causantes de enfermedades

Resistencia a un patógeno es la cualidad genéticamente regulada en la planta de restringir el crecimiento y/o reproducción de este en sus tejidos y consecuentemente el desarrollo de enfermedad asociada a él. Conceptualmente, resistencia es antónimo de susceptibilidad –la disposición genéticamente determinada en la planta de desarrollar enfermedad en su interacción con el patógeno-, y ambas son magnitudes relativas que varían en intervalos de valores inversamente proporcionales. En las plantas operan superpuestos dos tipos generales de resistencia: (i) una que protege a una especie vegetal contra la gran cantidad de microorganismos que establece contacto con ella y se denomina **resistencia no-huésped**; y (ii) otra que opera contra los microorganismos que han desarrollado patogenicidad sobre dicha especie en el curso de su co-evolución, que se denomina **resistencia huésped** y la expresan determinados cultivares de la especie susceptible. En ambos tipos de resistencia, la protección de la planta es proporcionada por un conjunto de **mecanismos de defensa controlados por genes distintos de los que regulan el fenotipo de resistencia**, cuya expresión tiene lugar en la proximidad del lugar de infección por el patógeno (**resistencia localizada**). A las dos líneas de defensa

antes mencionadas se superpone una **tercera línea defensiva, denominada resistencia sistémica adquirida** -referida como SAR (acrónimo de *Systemic Acquired Resistance*)- o **resistencia sistémica inducida** -referida como ISR (acrónimo de *Induced Systemic Resistance*)-, cuya característica singular es la expresión de mecanismos de defensa en tejidos distantes del lugar de infección (resistencia sistémica).

C3.2.1. Naturaleza de la resistencia no-huésped

La resistencia no-huésped, también referida como resistencia de la especie e inmunidad, ha sido definida como la **capacidad de todos los genotipos de una especie vegetal de conferir resistencia contra todos los genotipos de una especie patógena**, incluso en las condiciones ambientales más favorables para el desarrollo de enfermedad, si bien su naturaleza genética y mecanística es todavía desconocida (Panstruga y Moscou, 2020). La resistencia no-huésped es la **forma de resistencia de mayor durabilidad en el tiempo** y que mayor nivel de protección generalizada confiere a la planta -en la que en todo caso se produce la muerte de un pequeño número de células escasamente discernible- (cf., **reacción o respuesta hipersensible**, Apartado C3.2.2.). Y en razón de estas características, se ha especulado ampliamente sobre la posibilidad de que la resistencia no-huésped sea explotada por los mejoradores genéticos de plantas, a fin de incrementar durabilidad y generalidad de la resistencia contra los patógenos de las especies vegetales cultivadas.

Ciertamente, la apreciación de durabilidad de la resistencia no-huésped deriva de la observación de que, en la inmensa mayoría de casos, ha permanecido muy estable -tanto en sistemas naturales como en agroecosistemas- en escalas de tiempo históricas (seculares y posiblemente milenios). Sin embargo, esta durabilidad puede ser superada eventualmente por la emergencia de nuevos patógenos en periodos de tiempo variables. Por ejemplo, *Pyricularia oryzae* -el hongo que causa la necrosis de la panoja del arroz- había estado asociado a la gramínea silvestre antepasada del arroz durante un largo periodo de tiempo, hasta que adquirió patogenicidad sobre el arroz en China a partir de una población ancestral que infectaba aquella 9.000 años a.C., al tiempo que se producía la domesticación del cultivo. La emergencia del nuevo patógeno fue seguida de su expansión y diseminación global mediadas por el establecimiento de grandes áreas de cultivo del nuevo huésped (Couch et al., 2005). La **superación de la resistencia no-huésped también puede tener lugar en periodos cortos de tiempo**, según lo indican casos recientes de **extensión de la gama de huéspedes o de cambio de huésped de ciertos patógenos**, y puede ocurrir asociada con las circunstancias y prácticas de la agricultura moderna, como son: (i) la introducción de cultivos en nuevas áreas geográficas; (ii) la introducción de agentes exóticos asociada con la intensificación del comercio agrícola internacional y el transporte de material vegetal infectado; y (iii) el desarrollo de nuevas especies cultivadas (McDonald y Stukenbrock, 2016). Un caso paradigmático de la primera de dichas posibilidades es la **emergencia de la necrosis de la espiga del trigo**, descrita en Brasil por vez primera en 1985. Esta nueva enfermedad está **asociada con dos variantes patogénicas de *P. oryzae***, *P. oryzae* patotipo Triticum y la nueva especie *P. graminis-tritici*, que se han postulado como **derivadas de poblaciones de *P. oryzae* que infectaban pasto mulato (*Urochloa brizantha*, sinónimo *Brachiaria brizantha*)**, una gramínea forrajera de origen africano que fue introducida en Brasil como pasto para ganado en la década de 1960 (Castroagudín et al., 2016; McDonald y Stukenbrock, 2016).

Uno de los mecanismos que subyacen en la emergencia de patógenos que superan la resistencia no-huésped es el **desarrollo de híbridos interespecíficos en hongos y oomicetos fitopatógenos**, que se viene constatando con frecuencia creciente durante los últimos 20-30 años coincidiendo, curiosamente, con el incremento de introducciones de especies exóticas de ellos en nuevas áreas geográficas (McDonald y Stukenbrock, 2016). Según Brasier (2000), la **profusión de introducciones de especies fúngicas exóticas en un área propicia el establecimiento de hibridaciones con especies autóctonas**

de las que han estado geográficamente aisladas, ocurre porque las barreras genéticas entre ellas son más débiles que las existentes entre especies con-geográficas. Un caso particularmente interesante de hibridación interespecífica es el hongo asexual *Verticillium longisporum*, un híbrido anfidiplóide resultante de tres eventos de hibridación por fusión vegetativa entre cuatro parentales haploides, de los cuales dos son linajes de *Verticillium dahliae* y otros dos son especies desconocidas, nunca encontradas. *V. longisporum* solo es patogénico sobre crucíferas -excepto brócoli que es susceptible a *V. dahliae*-, pero el cultivo más extenso y gravemente afectado es la colza oleaginosa (Depotter et al., 2016). Posiblemente, los determinantes de la patogenicidad sobre crucíferas fueron adquiridos de las especies parentales desconocidas, o emergieron de la combinación de múltiples determinantes patogénicos existentes en los diversos parentales.

El desarrollo de nuevas especies cultivadas mediante hibridación interespecífica no está exento de riesgos en la aparición de *novo* de patogenicidad específicamente adaptada a ellas. Un ejemplo de esto es la aparición en el año 2001 del oídio del triticale, un nuevo cereal híbrido de trigo y centeno que se ha cultivado en Europa desde la década de 1960. Esta enfermedad es causada por *Blumeria graminis* f. sp. *triticales*, una nueva variante de *B. graminis* (sinónimo *Erysiphe graminis*) derivada posiblemente de la hibridación entre *B. graminis* f. sp. *tritici* (oídio del trigo) y *B. graminis* f. sp. *secalis* (oídio del centeno), cuya selección fue propiciada por la extensión del triticale en Europa Central. *B. graminis* f. sp. *triticales* ha debido retener genes que determinan la patogenicidad de *B. graminis* f. sp. *tritici* porque es patogénica en trigo y triticale, pero no en centeno (McDonald y Stukenbrock, 2016).

En resumen, los ejemplos anteriores inciden sobre el paradigma de estabilidad de la resistencia no-huésped, y ponen de manifiesto el extraordinario potencial de nuevos agentes fitopatógenos para emerger, evolucionar y diseminarse con rapidez en los agroecosistemas, propiciado por: (i) la escasa diversidad genética de los cultivos; (ii) la distribución uniforme de ellos a gran escala espacial; y (iii) la facilidad de distribución promovida por el comercio y transporte de material vegetal infectado, que son propios de la agricultura moderna.

C3.2.2. Naturaleza de la resistencia huésped

La resistencia huésped puede ser categorizada por: (i) su fenotipo; (ii) su regulación genética; y (iii) el tipo de la interacción que las variantes patogénicas del agente causal mantienen con los cultivares de la especie huésped. La resistencia huésped se manifiesta con un amplio espectro de intensidad de expresión, uno de cuyos extremos es un fenotipo de resistencia completa en la que el patógeno queda circunscrito en el lugar y durante el proceso de infección, de manera que no llega a establecer una relación parasítica con la planta y el desarrollo de síntomas en ella es mínimo. La ausencia de síntomas asociada con la resistencia completa es referida como inmunidad con frecuencia creciente, un término que no debe ser confundido con la inmunidad en mamíferos que implica la interacción entre antígenos y anticuerpos. En estos últimos coexisten dos sistemas inmunes, a uno de los cuales, el de inmunidad innata, se asemeja el que subyace en la resistencia de las plantas mediada por el reconocimiento entre moléculas de la planta y el patógeno, que se estudia en el Apartado C3.2.2.4.1.

En el extremo opuesto de dicho espectro se encuentra el fenotipo resistencia parcial, que no impide el establecimiento de la infección, pero limita la extensión con que el patógeno coloniza y/o se reproduce en los tejidos de la planta. El tipo más común -pero no único- de resistencia completa es la denominada reacción o respuesta hipersensible (HR, acrónimo de *Hypersensitive Reaction*) (más correctamente, muerte celular por hipersensibilidad, una forma de la muerte celular programada), que se caracteriza por la muerte rápida y localizada de las células vegetales invadidas por el patógeno y de aquellas que se encuentra en su proximidad (Foto1D-G). En ocasiones, la resistencia parcial es referida erróneamente

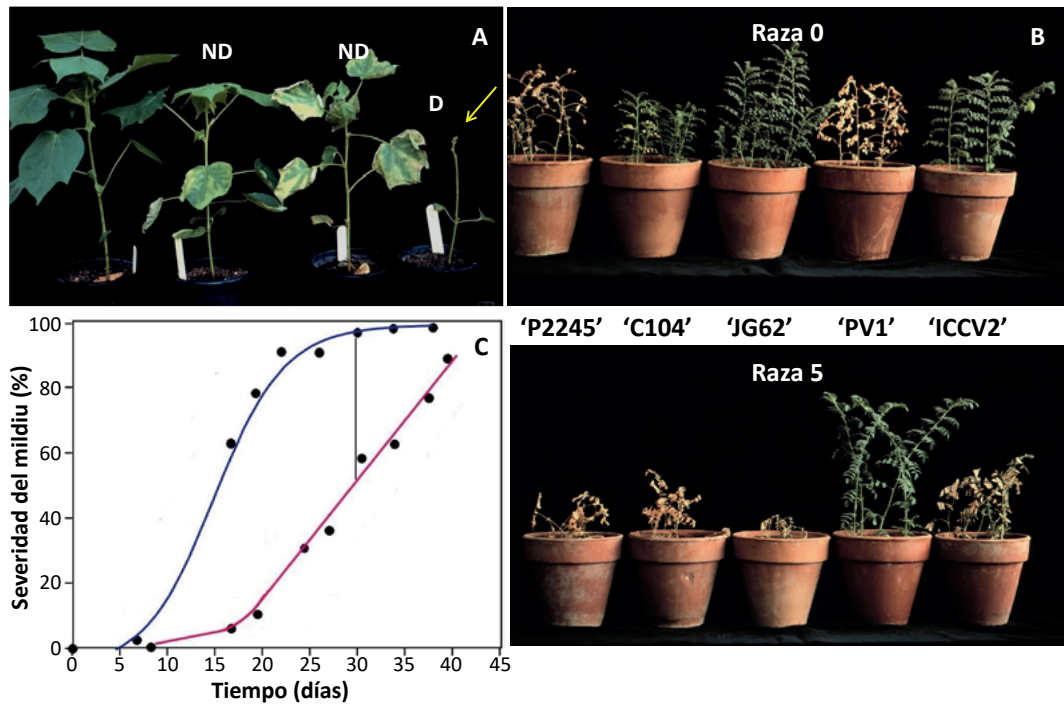


Foto 2. Variantes patogénicas de hongos fitopatógenos (A, B) y efectos de la resistencia cuantitativa sobre el desarrollo de la enfermedad (C). **A.** Síntomas de verticilosis en plantas del cv. 'Acala SJ-2' de algodón infectadas artificialmente con los patotipos defoliante (D) y no-defoliante (ND) de *Verticillium dahliae*. Nótese la defoliación y reducción de crecimiento diferenciales inducidas por el patotipo D comparada con el ND; **B.** Reacción diferencial de los cultivares de garbanzo 'P2245', 'C104', 'JG62', 'PV1', e 'ICCV2' a las razas 0 y 5 de *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris*, agente causal de la marchites del garbanzo; **C.** Desarrollo temporal del mildiu de la patata causado por *Phytophthora infestans* en un cultivar con resistencia cuantitativa (cv. 'Sebago'), comparado con el correspondiente en un cultivar susceptible ('Russet Rural'). La enfermedad progresó a una tasa de infección aparente de 0,753 lesiones/día en el cv. 'Russet Rural', y de 0,254 lesiones/día en el cv. 'Sebago' resistente. Nótese que la reducción de dicha tasa aparente de infección en 'Sebago' propició que la cantidad de enfermedad fuese el 50% de la máxima alcanzada en el cv. 'Russet Rural' susceptible 30 días después del comienzo de la enfermedad, que tuvo lugar 8 semanas después de la siembra del cultivo. Adaptado de Fry, 1978.

como tolerancia, un término que conceptualmente concierne la capacidad de un cultivar de tener un crecimiento y/o rendimiento satisfactorio con niveles de infección propios de cultivares susceptibles en los que aquellos son reducidos. En contraste con la resistencia, la tolerancia no reduce el nivel de infección en la planta, sino que propicia que en ella se establezcan elevadas poblaciones del patógeno. En consecuencia, la mejora mediante tolerancia puede tener repercusiones negativas importantes y graves sobre la epidemiología de las enfermedades, porque la selección de susceptibilidad a la infección que promueve determina que el uso de los cultivares mejorados aporte inóculo abundante del patógeno para cultivos próximos o subsiguientes.

En lo concerniente a su regulación genética, la resistencia huésped puede ser: (i) un carácter de herencia cualitativa regulada por uno o muy pocos genes de efecto individual claramente discernible (mono u oligogénica), denominados genes *R*; o (ii) un carácter de herencia cuantitativa regulada por un conjunto de genes de efecto individual menor pero aditivo (poligénica). Mientras que las resistencias de tipo mono- u oligogénico y poligénico son reguladas por genes cromosómicos, la resistencia a un escaso número de patógenos es controlada por genes de claro efecto individual ubicados en el citoplasma celular (resistencia citoplásmica o extracromosómica). Ejemplos notables de esta última son la resistencia a dos hongos patógenos de maíz, *Bipolaris maydis* (necrosis foliar sureña, *Southern corn leaf blight*) y *Phylllosticta maydis* (mancha amarilla de la hoja), en las que la resistencia es conferida por la ausencia de un gen mayor en las mitocondrias del citoplasma normal de maíz, que en citoplasmas de cultivares androestériles susceptibles codifica una proteína que reconoce la toxina que determina la patogenicidad de ambos hongos.

La efectividad de la resistencia huésped depende de las variantes patogénicas predominantes en las poblaciones de los patógenos -principalmente en el caso de hongos y oomicetos- que comprenden: (i) patotipos -definidos como grupos de biotipos distinguibles entre sí por el tipo de síntomas que originan en la planta-; y (ii) razas patogénicas -definidas como conjunto de biotipos con capacidad de superar la resistencia de un cultivar conferida por genes de resistencia específicos (Foto 2 A, B). En la actualidad, esta capacidad es referida de forma generalizada como virulencia, de manera que las razas que no superan la efectividad de otros genes de resistencia se denominan avirulentas. En razón de dicha estructura de variantes patogénicas en las poblaciones del patógeno, la resistencia es categorizada como: (i) raza específica o diferencial -cuando es efectiva solo contra razas determinadas del patógeno-; y (ii) raza no-específica o generalizada -cuando es operativa contra todas las razas patogénicas conocidas de aquel-, ambas también referidas por los términos resistencia vertical y horizontal, respectivamente, actualmente en desuso. Las relaciones entre los tipos de resistencia categorizados por el fenotipo, la regulación genética, y la interacción con las variantes patogénicas no son directas. Aunque la resistencia raza-específica es generalmente completa y mono- u oligogénica, ambos fenotipo y regulación genética también se presentan en algunas resistencias raza-no específica; y, similarmente, algunas resistencias de fenotipo parcial y herencia poligénica se expresan diferencialmente contra determinadas razas patogénicas.

C3.2.2.1. Características de la resistencia cualitativa mono- y oligogénica

Este tipo de resistencia es operativa contra todos los tipos de agentes fitopatógenos, y el carácter cualitativo de su fenotipo, generalmente dominante y de HR, facilita su rápida identificación entre los segregantes de cruzamientos entre parentales resistentes y susceptibles a un patógeno. Ello ha propiciado que los genes *R* hayan sido incorporados rápidamente en los programas de mejora genética vegetal desde principios del siglo XX, y que los cultivares resistentes derivados de ellos -en muchos casos mediante introgresión de especies silvestres o cultivadas sexualmente compatibles con la especie cultivada- se hayan venido utilizando extensa e intensivamente en la agricultura moderna. Sin embargo, las investigaciones sobre la naturaleza bioquímica y molecular de la resistencia cualitativa y raza-específica han demostrado que: (i) su herencia y naturaleza son complejas, a diferencia de la genética simple percibida de las primeras investigaciones realizadas para su uso en la mejora de resistencia que siguió al descubrimiento de Biffen; y (ii) el genoma de una especie vegetal puede contener un gran número de genes asociados con resistencia a una diversidad de agentes fitopatógenos, siendo la resistencia a algunos de estos regulada por varias decenas de ellos. Por ejemplo, el genoma del trigo contiene más de 90 genes que regulan la resistencia raza-específica a las royas del tallo (*Puccinia graminis* f. sp. *tritici*), de la hoja (*Puccinia recondita*) y amarilla (*P. striiformis* f. sp. *tritici*), así como al oídio (*B. graminis* f. sp. *tritici*), de los cuales más de 20 conciernen la resistencia contra *P. recondita* (Gururani et al., 2012).

C3.2.2.1.1. Organización de los genes *R*

Entre los aspectos más relevantes que conciernen a la complejidad de los genes *R* son de destacar: (i) los genes *R* pueden estar ubicados en loci simples mono o multialélicos y encontrarse en condición dominante o recesiva [ej., los genes *I1* de *Solanum pennellii* e *I2* de *Solanum pimpinellifolium* confieren resistencia, respectivamente, contra las razas 1 y 2 de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (fusariosis vascular del tomate); los genes *foc-1*, *foc-2*, *foc-3*, *foc-4*, y *foc-5* son operativos contra las razas 1, 2, 3, 4, y 5 de *F. oxysporum* f. sp. *ciceris* (fusariosis vascular del garbanzo), respectivamente; y más de 20 alelos diferentes en el locus *Mla* de la cebada regulan resistencia raza-específica contra *B. graminis* f. sp. *hordei* (oídio de la cebada)]; (ii) los genes *R* que confieren resistencia raza-específica se presentan más frecuentemente agrupados en loci grandes y complejos, que comprenden copias múltiples de secuencias estrechamente ligadas cuyo número varía ampliamente entre genotipos de una especie vegetal; y la generación de nuevos genes *R* puede tener lugar por recombinación entre secuencias estrechamente ligadas (recombinación intragénica) o entre secuencias repetitivas en regiones intergénicas (recombinación intergéné-

nica) [ej., 109 de los 149 genes *R* identificados en *Arabidopsis thaliana* constituyen 40 grupos de 2 a 8 genes, y los 40 genes restantes comprenden copias únicas; y los loci *Dm3* de resistencia a *Bremia lactucae* (mildiu de la lechuga) y *M* de resistencia a *Melampsora lini* (roya del lino) comprenden 22 y 15 secuencias, respectivamente]; (iii) un solo gen *R* o un solo locus complejo pueden regular resistencias contra agentes taxonómicamente relacionados o no [ej., el gen *Mi* del tomate confiere resistencia contra los nematodos *Meloidogyne incognita* y *M. javanica*, así como contra razas específicas del pulgón de la patata *Macrosiphum euphorbiae*; y en trigo, el locus *Lr34* (referido como *Lr34/Pm38/Sr 56/Yr18*) confiere resistencia raza-no específica contra *P. recondita*, *B. graminis* f. sp. *tritici*, *P. graminis* f. sp. *tritici* y *P. striiformis* f. sp. *tritici*]; (iv) genes *R* funcionalmente idénticos pueden existir en loci independientes de una especie vegetal, de especies diferentes, o de diversos genotipos de ellas, indicando que los genes *R* son miembros de familias de multigenes, presumiblemente bien conservados entre taxones (ej., la resistencia contra la raza 3 de *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici* es controlada independientemente por los genes *I3* e *I7* identificados, respectivamente, en las líneas LA716 y PI414773 de *S. pennellii*; y (v) los genes *R* pueden interactuar entre sí mediante relaciones de dosis génica, complementariedad, o supresión, produciendo en este último caso un efecto negativo de la base genética del genotipo vegetal receptor que es importante en la mejora genética de resistencia (ej., la resistencia raza-específica contra *B. graminis* f. sp. *hordei* conferida por el gen *Mla12* requiere la presencia de los loci *Rar7* y *Rar2*, y un gen en el cromosoma 7D del trigo, que es alélico o estrechamente ligado con el gen *Lr34* de resistencia a *P. recondita*, es supresor de la resistencia a *P. graminis* f. sp. *tritici*).

C3.2.2.1.2. Estructura molecular de los genes *R*

Las tecnologías de biología molecular han permitido desvelar la estructura molecular de cerca de 80 genes *R* implicados en la resistencia a bacterias, hongos, nematodos, oomicetos y virus fitopatógenos durante los últimos 25 años; y las proteínas codificadas por dichos genes se pueden clasificar en ocho grupos (I-VIII), basados en la organización de sus dominios amino-acídicos y localización citoplásmica (grupos I, II) o transmembrana (grupos III-V) (Gururani et al., 2012).

La mayoría de los genes *R* clonados codifican proteínas intracelulares que tienen un dominio de unión a nucleótidos (NBS), y otro dominio con 8-47 repeticiones ricas en leucina (20-29 aminoácidos) (LRRs) -que se refieren como proteínas NB-LRR o NLR (grupos I, II)-, de los cuales el dominio LRR está implicado generalmente en interacciones proteína-proteína (Michelmore et al., 2013). Las proteínas NB-LRR constituyen una de las familias de multigenes más grande y variable de las existentes en plantas angiospermas y gimnospermas, comprendiendo centenares de genes en algunas de las primeras. Las proteínas NB-LRR se pueden subdividir en dos grupos principales, según posean un receptor con similitud al Toll-interleukin-1 de mamíferos (TIR) en su dominio amino terminal (TNLs), o carezcan de él (CNLs), en cuyo caso presentan a menudo (pero no siempre) un dominio enrollado en espiral (CC, *coiled coil*) en su amino terminal (Michelmore et al., 2013). La estructura completa de las proteínas NB-LRR comprenden, pues, un dominio N-terminal TIR o CC, un dominio central NB, y un dominio C-terminal LRR. Ejemplos de genes que codifican proteínas *R* del tipo TNL son el gen *N* de resistencia al virus del mosaico (TMV) en tabaco y el *L6* de resistencia a la roya en lino; y de aquellos que codifican proteínas *R* del tipo CNL lo son los genes *RPS2* y *RPM1* de resistencia a la bacteria *Pseudomonas syringae* en *A. thaliana* y el gen *I2* de resistencia a *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici* en tomate (Gururani et al., 2012). Un nuevo tipo de proteína TNL (III) es la codificada por el gen *RRS1* de resistencia a la bacteria *Ralstonia solanacearum* en *A. thaliana*, que se caracteriza por una extensión en el terminal C con una señal de localización nuclear y un dominio del factor transcripcional WRKY (Gururani et al., 2012). En resumen, los genes *R* que codifican proteínas NB-LRR se encuentran en una amplia variedad de plantas y son operativos contra patógenos de muy diversa naturaleza.

Otros tipos de proteína *R* incluyen las que carecen de dominio NBS, pero poseen un dominio LRR extra-citoplásmico anclado en un dominio transmembrana, junto con: (a) un reducido extremo C citoplás-

mico (IV) [ej., los genes *Cf9*, *Cf4* y *Cf2* de resistencia a *Cladosporium fulvum* (cladosporiosis del tomate)]; (b) un dominio serina-treonina quinasa (V) [ej., el gen *Xa21* de resistencia a *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* (necrosis bacteriana del arroz)]; o (c) un dominio PEST (Pro-Glu-Ser-Thr) para la degradación de proteínas y otro de proteínas implicadas en la señalización de endocitosis celular (VI) (ej., los genes *Ve1* y *Ve2* de resistencia a *V. dahliae* en tomate y otras plantas).

Finalmente, existen dos tipos de **proteínas R que carecen de dominios NB y LRR (VII, VIII)**, de los que son ejemplos: (a) la codificada por el gen *RPW8* en *A. thaliana*, que regula resistencia raza no-específica contra una amplia diversidad de oídios y comprende un dominio proteico de membrana al que se une otro CC (VII); y (b) la codificada por los genes *Hm1* y *Pto* que confieren resistencia contra *Cochliobolus carbonum* [anamorfo: *Helminthosporium carbonum*] (necrosis foliar del maíz) y *P. syringae* pv. *tomato* (mancha bacteriana del tomate), respectivamente (VIII). A diferencia de otros genes *R*, *Hm1* codifica una enzima reductasa que detoxifica la toxina que es determinante primario de la patogenicidad de *C. carbonum* en maíz.

La estructura y ubicación de las proteínas R citoplásmica son coherentes con una **presumible actividad receptora de moléculas producidas por fitopatógenos intracelulares** (ej., virus), o que colonizan intercelularmente los tejidos vegetales, pero excretan factores de virulencia que son transportados al interior del citoplasma celular (ej., bacterias), contra los cuales dichos genes confieren resistencia. Por el contrario, los dominios LRR extra-citoplásmicos de otros dos tipos de proteínas R sugieren que pueden actuar como **receptores de moléculas producidas por patógenos que colonizan intercelularmente los tejidos vegetales**. El que varios de los tipos de proteínas R compartan una determinada estructura (ej., un dominio NBS), permite **identificar candidatos de genes R en plantas mediante ensayos de reacción en cadena de la polimerasa** -empleando como iniciadores oligonucleótidos diseñados de los aminoácidos conservados en los dominios NBS-, y comparar las secuencias así obtenidas con las de genes *R* conocidos. Sin embargo, la identificación de un gen que confiere resistencia a un patógeno específico dista de ser fácil, porque **los genes con secuencias NBS son comunes en plantas y, además, algunos de ellos con similitud de secuencias pueden no ser funcionales (pseudogenes)**.

C3.2.2.2. Características de la resistencia cuantitativa

Esta resistencia proporciona a la planta una protección parcial contra la enfermedad (**resistencia parcial**) que es regulada por **loci de caracteres cuantitativos (QTL, Quantitative Trait Loci)**; es decir, un grupo de genes de efecto individual escaso pero aditivo, localizados en una región cromosómica, que regula la expresión de un fenotipo con distribución continua y segregación transgresiva de los descendientes de cruzamientos entre parentales resistentes y susceptibles. Estudios recientes de germoplasmas de especies cultivadas indican que en los genomas vegetales **existen centenares de QTLs para resistencia parcial a diversas enfermedades de plantas** (Michelmore et al., 2013). De hecho, conceptualmente **todas las plantas cuentan con un cierto nivel de resistencia cuantitativa y parcial superpuesta sobre la resistencia cualitativa mono/ oligogénica**, que aparentemente es suma de la defensa residual que permanece en la planta después de que las resistencias raza no-específica y raza-específica hayan sido superadas.

Además de **poligénica o multigénica**, la resistencia cuantitativa también recibe otras denominaciones según las características que se le atribuyen en cuanto a: (i) la interacción que manifiesta con las razas del patógeno (**general, horizontal, raza-no específica**); (ii) la forma en que opera sobre el desarrollo de la epidemia en el cultivo (**reductora de la tasa de progreso de la enfermedad en el tiempo**); (iii) el estado o edad de la planta en el que se expresa (**de la planta adulta**); y (iv) su estabilidad (**durable**) (Hu y Yang, 2019; Parlevliet, 1979). La naturaleza poligénica de la resistencia se ha demostrado en patosistemas tan diversos como royas [ej., la roya coronada de la avena (*Puccinia coronata* f. sp. *avenae*), las royas del tallo

de la cebada (*P. graminis* f. sp. *hordei*) y del trigo (*P. graminis* f. sp. *tritici*), la roya amarilla del trigo (*P. striiformis* f. sp. *tritici*), etc.), mildius [ej., el mildiu de la patata (*Phytophthora infestans*)], y necrosis foliares [ej., la necrosis de la hoja del maíz (*C. carbonum*)]. Durante los últimos años se han producido avances notables en el conocimiento de la naturaleza y utilización de la resistencia cuantitativa que pueden influir positivamente en la mejora de la resistencia, incluyendo: (i) la caracterización de genes que contribuyen a ella; (ii) el cartografiado de QTLs asociados a resistencia parcial, y el desarrollo de marcadores de ADN estrechamente ligados a ellos que facilita su identificación en generaciones segregantes de cruzamientos entre parentales susceptibles y resistentes; (iii) la identificación de grupos de QTLs que confieren resistencia a varios patógenos de una planta conjuntamente [ej., cinco QTLs en trigo que confieren resistencia a *Fusarium culmorum* (necrosis del cuello de cereales), *Fusarium graminearum* (necrosis de la espiga de la cebada y el trigo), *Parastagonospora nodorum* (sinónimos *Stagonospora nodorum* y *Septoria nodorum*; necrosis de las glumas del trigo), y *Zymoseptoria tritici* (sinónimo *Septoria tritici*; mancha necrótica de la hoja del trigo)]; y (iv) reunir varios QTLs en un mismo genotipo vegetal (ej., *Lr34/Yr18/Pm38* y *Lr46/Yr29/Pm39* que confieren resistencia múltiple a *P. recondita*, *P. striiformis* f. sp. *tritici*, y *B. graminis* f. sp. *tritici*, en trigo) (St. Clair, 2010).

El efecto de la resistencia cuantitativa sobre el progreso de la enfermedad en un cultivo es mediado por sus componentes, cuyos determinantes moleculares son escasamente conocidos todavía. En el caso de las micosis foliares (ej., antracnosis, mildius, oídios, royas, etc.) dichos componentes incluyen la reducción de: (i) la frecuencia de infección; (ii) el tamaño de las lesiones o colonias fúngicas; y (iii) la producción de esporas en los sitios de infección; así como el incremento de: (i) el periodo de incubación (PI) (el tiempo que transcurre entre la infección y el desarrollo de los síntomas); y (ii) el periodo de latencia (el tiempo transcurrido entre la infección y la reproducción del patógeno) (Parlevliet, 1979). Estos componentes de la resistencia cuantitativa se expresan solamente en plantas adultas, y dan lugar a un efecto conjunto de ralentizar el desarrollo global de la enfermedad en el campo que en royas, mildius, oídios y fusariosis vasculares es referido, respectivamente, como *slow rusting* (desarrollo lento de las royas), *slow mildewing* (desarrollo lento de mildius y oídios) y *slow wilting* (desarrollo lento de las fusariosis vasculares) (Foto 2C) (Ellis et al., 2014; Jiménez-Díaz et al., 2015; Parlevliet, 1979).

En contraposición con la fragilidad de la resistencia cualitativa derivada de su naturaleza raza-específica, una de las características más apreciadas de la resistencia cuantitativa es su efectividad contra todas las razas conocidas del patógeno, que subyace en los términos generalizada y raza no-específica. Por ello, se ha postulado que el uso continuado de cultivares con resistencia cuantitativa no ejerce presión selectiva en favor de la virulencia de razas patogénicas que eventualmente puedan superar su eficacia, y en consecuencia se ha venido considerando que la resistencia cuantitativa permanece estable en el tiempo. Sin embargo, investigaciones sobre enfermedades causadas por patógenos biotrofos [ej., *P. infestans* (mildiu de la patata) y *P. striiformis* f. sp. *tritici* (roya amarilla del trigo)] han demostrado que la eficiencia de la resistencia cuantitativa contra ellos puede disminuir con su uso continuado, de manera que a lo largo del mismo se produce una erosión (más que supresión) en la magnitud del fenotipo resistente (Poland et al., 2009).

C3.2.2.3. Interacción entre el genotipo de la planta y el del patógeno en la resistencia raza-específica: la relación gen a gen

La capacidad de razas virulentas de superar la resistencia conferida por genes *R* puso de manifiesto que su efectividad depende del genotipo del patógeno, y los estudios de dichas razas indicaron que la virulencia también es regulada por genes mendelianos. Sin embargo, la forma en que dichos genotipos han de interactuar para que se exprese el fenotipo de resistencia permaneció desconocida, hasta que Harold H. Flor propusiera la hipótesis de una relación gen a gen entre las razas de un patógeno y los

cultivares con resistencia a ellas, que constituye una de las contribuciones científicas a la Fitopatología más relevantes en el siglo XX (Flor, 1956). Dicha hipótesis -demostrada molecularmente en la actualidad- establece que, durante su coevolución, los patógenos y sus huéspedes han desarrollado sistemas genéticos complementarios, de manera que **para cada gen que condiciona la resistencia en la planta existe en el patógeno un gen específico y complementario de aquél que condiciona su virulencia sobre ella**. En sus investigaciones, Flor también observó que el fenotipo resistente es generalmente dominante en la planta, mientras que virulencia y avirulencia son recesiva y dominante, respectivamente, y los alelos que la regulan son referidos con los prefijos *avr* y *AVR* (Flor, 1956).

Las numerosas investigaciones que siguieron a los trabajos pioneros de Flor han constatado que la **relación gen a gen se cumple en las interacciones de los grandes grupos de patógenos biotrofos y hemibiotrofos (bacterias, hongos, oomicetos, virus, nematodos, y fanerógamas parásitas) y artrópodos fitófagos con sus plantas huésped**, tanto en patosistemas agrícolas como naturales. En todos ellos, los genes que regulan la resistencia en la planta y la virulencia en el patógeno se comportan como genes condicionales, es decir que la expresión de uno de ellos requiere la presencia del otro, de manera que: (i) cualquier gen *R* solo es operativo si en el patógeno existe un *locus* con el alelo *AVR* complementario; (ii) cualquier gen *R* es inefectivo si en el patógeno existe un *locus* con el alelo *avr* complementario; (iii) una sola combinación de alelos *R - AVR* que resulta en resistencia es epistásica (manifiesta dominancia no alélica) sobre otras combinaciones de alelos de la planta y el patógeno que pueden dar lugar al desarrollo de enfermedad; y (iv) el desarrollo de enfermedad en la planta requiere que cada alelo de gen *R* en la planta sea complementado por su alelo *avr* complementario en el patógeno (esto es, ningún alelo *R* es complementado por su alelo *AVR* específico). Esta singular interacción entre alelos de resistencia y de virulencia fue resumida en una ingeniosa analogía "cerradura" (alelo *R*) - "llave" (alelo *avr*) para facilitar la comprensión de la relación gen a gen sin necesidad de formación genética (Browning, 1963). Según esta analogía, el figurado acceso a una vivienda (desarrollo de enfermedad) con una puerta de entrada de *n* "cerraduras" (alelos *R*) requiere disponer de una "llave" específica (alelos *avr*) para cada una de ellas, y la sola existencia de una "cerradura" (un alelo R_x) sin su "llave" complementaria (el alelo avr_x) impide el acceso (expresión de resistencia en la planta).

La investigación de la relación gen a gen en diversos patosistemas agrícolas también ha puesto de manifiesto que **tanto en la regulación genética de la resistencia, como en la de la virulencia, existen excepciones a la forma simple en que fueron formuladas por Flor**, que en el caso de los genes de resistencia se corresponden con las indicadas en el Apartado C3.2.2.1.1., e incluyen, por ejemplo: (i) herencia recesiva; (ii) resistencia controlada por dos genes; (iii) acción de genes modificadores; (iv) acción de genes supresores; y (v) acción de dosis génica (Christ et al., 1987). Sin embargo, el consenso general es que **dichas variaciones no alteran el patrón general de los fenotipos que se desarrollan en la interacción entre los dos alelos de los genes de resistencia y de virulencia, en tanto que no se altera la especificidad de la resistencia, que solo se expresa en una (*R - AVR*) de las cuatro interacciones genotípicas posibles**.

C3.2.2.4. Las bases moleculares de la relación gen a gen y el sistema inmune de las plantas contra los agentes microbianos

La interpretación mecanística que emerge de la especificidad de la interacción alélica que regula la resistencia en el modelo gen a gen de Flor, esto es *R - AVR*, es que las **proteínas codificadas por los alelos *R* en la planta interactúan con las proteínas codificadas por los alelos *AVR* complementarios**, que presumiblemente se unen específicamente en una relación análoga a la que caracteriza a receptor y ligando entre antígeno y anticuerpo. En este esquema, el desarrollo de la respuesta susceptible es consecuencia de que: (i) la planta no produce la molécula receptora (genotipo *rr*) del producto del alelo *AVR*; (ii) el producto del patógeno virulento (genotipo *avravr*) no es reconocido por la molécula producida en la planta resistente (genotipos *R*-); o (iii) tanto la proteína receptora como el ligando

reconocido por esta no se producen en la interacción (genotipo *rr/avravr*). Los genes *R* actuarían pues como genes de reconocimiento del ligando producido por el patógeno, fruto del cual se activa la expresión de una compleja secuencia de respuestas defensivas inespecíficas contra el agente invasor codificadas por “genes defensivos” en la planta, que dan lugar al fenotipo resistente. La validez de este modelo molecular ha sido demostrada con la clonación de los genes *R* y *AVR*, y la caracterización de sus correspondientes productos proteínicos (cf., Apartado C3.2.2.1.2.). Sin duda, el descubrimiento de los mecanismos moleculares que subyacen en la capacidad de defensa de la planta y de virulencia en el patógeno, constituye uno de los hitos más relevantes en la comprensión de las interacciones entre las plantas y sus patógenos.

C3.2.2.4.1. Un sistema de inmunidad innata en las plantas contra los agentes microbianos

El progreso en la comprensión de los mecanismos moleculares que subyacen en las interacciones planta-patógeno culminó con la propuesta del modelo zigzag para unificar la resistencia no-huésped y la relación gen a gen (Jones y Dangl, 2006), en el que se postula que ambas son resultado de la respuesta del sistema inmune de las plantas -que guarda una sorprendente similitud con la inmunidad innata (no mediada por anticuerpos) del sistema inmune de los vertebrados- y depende de la capacidad defensiva de cada célula individual que comprende defensas preformadas e inducibles. Según dicho modelo una especie vegetal cuenta con dos líneas de defensa, en las que se activan mecanismos defensivos inducibles tras el reconocimiento de moléculas derivadas del patógeno por receptores específicos presentes sobre la superficie celular o intracelularmente en la planta. La primera línea de defensa de una especie discrimina a los patógenos de otras especies que no lo son sobre ella, mediante una familia de proteínas receptoras dispuestas sobre la superficie vegetal denominadas PRRs (acrónimo de *Pattern Recognition Receptors*). Las PRRs reconocen componentes moleculares altamente conservados (sujetos a escasa presión de selección) de los patógenos, que en razón de la similitud del sistema inmune innato vegetal con el sistema inmune innato de los vertebrados se han denominado con el acrónimo PAMPs (acrónimo de *Pathogen Associated Molecular Patterns*, estructuras moleculares asociadas a patógenos) -anteriormente establecido por investigadores del sistema inmune animal-. A dicho acrónimo se han unido posteriormente el de MAMPs (acrónimo de *Microbe Associated Molecular Patterns*, estructuras moleculares asociadas a microbios) en razón de que los microorganismos no patogénicos de plantas también poseen estructuras reconocibles por las PRRs; y más tarde el de DAMPs (acrónimo de *Damage Associated Molecular Patterns*). Estos últimos comprenden estructuras moleculares de la planta asociadas a daño producido por los patógenos durante los procesos de infección o por heridas causadas por artrópodos fitófagos, que incluyen moléculas como oligosacáridos (*v. gr.*, oligogalacturónidos y oligos derivados de β -glucanos) producidos por la degradación de la pared celular vegetal, y un conjunto de péptidos señalizadores que se denominan de forma genérica fitocitoquinas por su similitud funcional con las citoquinas de mamíferos (Boller y Felix, 2009).

Los PRRs vegetales son proteínas de tipo receptor referidas como RLKs (*Receptor Like Kinases*) y RLPs (*Receptor Like Proteins*) que, en general, constan de un dominio extracelular de unión a ligando que es diverso, *v. gr.*, con LRR (*Leucine Rich Repeat*, repeticiones ricas en leucina), un dominio transmembrana y un dominio citoplásmico que es de tipo quinasa en las RLKs (Lu y Tsuda, 2021). Para ambos receptores, RLKs y RLPs, la especificidad de unión a ligando es determinada por la naturaleza de los dominios extracelulares, que son muy diversos y entre los que se pueden destacar por su nivel de caracterización los siguientes: (i) de tipo LRRs para ligandos proteicos; (ii) de tipo LysM (“motivo” lisina) para glucanos; (iii) lectinas para carbohidratos; y (iv) dominios repetidos similares al factor de crecimiento epidérmico que se encuentran en receptores de la familia de quinastas, para los oligogalacturónidos derivados de la pared de la célula vegetal.

Las PAMPs -anteriormente denominadas “elicitors” generales (*elicitors*: moléculas producidas por un agente microbiano o resultantes de su actividad desintegradora de la pared celular vegetal, que inducen una respuesta defensiva en la planta)-, comprenden una variedad de estructuras moleculares altamente conservadas, comunes en el conjunto de un tipo de patógenos para cuyos ciclos vitales son esenciales. Ejemplos de ellas son: (i) los fragmentos flg22 y flg28 de la proteína del flagelo de las bacterias; (ii) las moléculas resultantes de la degradación de la pared celular (glucanos, mananos, quitina, quitosano, péptidos) y de la membrana (ergosterol) de los hongos y oomicetos; (iii) los compuestos derivados de la degradación enzimática de la pared celular vegetal por los microorganismos no patogénicos en el proceso de invasión de la planta o por heridas (Schellenberger et al., 2019); y (iv) los péptidos sintetizados en respuesta al daño celular (fitocitoquinas). En el modelo zigzag de Jones y Dangl (2006), el reconocimiento de los PAMPs/MAMPs/DAMPs por las proteínas receptoras RLKs/RLPs activa una respuesta defensiva denominada PTI (*PAMP-Triggered Immunity*, inmunidad inducida por PAMP), que inhibe el crecimiento microbiano y contribuye a la resistencia no-huésped. El establecimiento del parasitismo por los microorganismos patogénicos de una especie vegetal requiere la supresión de las respuestas defensivas asociadas a la PTI, que es efectuada por moléculas secretadas por el patógeno -denominadas efectores (*effectors*) o factores de virulencia- y determina la denominada susceptibilidad mediada por efector (ETS, *Effector Triggered Susceptibility*, susceptibilidad inducida por efector).

La ETS es contrarrestada por una segunda línea del sistema inmune innato superpuesta sobre la PTI, que es mediada por el reconocimiento directo o indirecto de los efectores por los receptores intracelulares NLRs (los productos de los genes *R*), que anula la PTI y se corresponde con la resistencia en los sistemas gen a gen (Dodds y Rathjen, 2010). Esta segunda línea de defensa -denominada ETI (*Effector Triggered Immunity*, inmunidad inducida por efector)- se diferencia de la PTI en que los PRRs reconocen a un amplio espectro de especies patogénicas -dada la naturaleza de los PAMPs como estructuras moleculares altamente conservadas-, mientras que las proteínas NLRs de la ETI reconocen efectores de estirpes o razas específicas de la especie patogénica. Sin embargo, la protección conferida por la ETI no es permanente porque los patógenos evitan el reconocimiento por los productos de los genes *R* mediante el desarrollo de nuevos efectores -que actúan como factores de virulencia sobre dichos genes-, o por la delección de los genes que codifican la producción de los ya existentes (esto es, el desarrollo de nuevas razas patogénicas); y en la homeostasis de las interacciones huésped-parásito propia de los sistemas naturales, las plantas evolucionan mediante nuevos genes *R* que contrarrestan la infección por nuevas razas.

El desarrollo de las PTI y ETI da lugar a cambios celulares, y a la activación de rutas de transducción de señales reguladoras de la transcripción de genes implicados en mecanismos defensivos. Estas rutas se habían considerado distintivas e independientes, pero datos recientes indican que ambas comparten algunos componentes de señalización y son interactivas entre sí, así como que la extensión de esta interacción influye notablemente sobre la respuesta inmune final (Lu y Tsuda, 2021). De igual manera, los mecanismos de defensa desencadenados por el reconocimiento molecular en las PTI y ETI son muy similares, e incluyen la formación de especies reactivas de oxígeno, la muerte celular (cf., Apartado C3.2.2.), la acumulación de lignina y la producción de compuestos antimicrobianos como fitoalexinas, glicoproteínas ricas en hidroxiprolina, proteínas ricas en glicina, proteínas relacionadas con la patogénesis (proteínas PR), etc. (Gill et al., 2015). Datos recientes indican que la PTI potencia la respuesta ETI en contra de lo que se había pensado inicialmente.

La activación local de la respuesta del sistema inmune, sean la PTI o la ETI, también está implicada en una tercera línea defensiva de naturaleza sistémica (la SAR, resistencia sistémica adquirida, y la ISR, resistencia sistémica inducida, cf., C3.1.1.). El concepto actual es que la SAR es inducida por patógenos y: (i) se inicia con la activación local de la respuesta PTI o ETI; (ii) su señalización a larga distancia es mediada

por el ácido salicílico y otros metabolitos vegetales; y (iii) la expresión en los tejidos alejados del inductor está asociada con la activación de genes que codifican proteínas PR. Por el contrario, la ISR: (i) es inducida por una diversidad de bacterias y hongos habitantes de la rizosfera y beneficiosos para las plantas, y tiene lugar sin que se desarrollen síntomas visibles en el tejido radical con el que están asociados; (ii) su iniciación requiere la colonización del sistema radical de la planta por los microorganismos inductores -que pueden establecer una relación epífita o endofita- durante la cual suprimen la expresión de respuestas defensivas por la planta, y producen "elicitors" que determinan el comienzo de la respuesta ISR; (iii) los "elicitors" son de naturaleza muy variada (ej., lipopolisacáridos, sideróforos, antibióticos y compuestos orgánicos volátiles de las bacterias; y proteínas con actividad enzimática y péptidos "elicitors" de los hongos); y (iv) tiene lugar sin la acumulación de proteínas PR y es regulada por una ruta independiente del SA en la que intervienen las fitohormonas ácido jasmónico y etileno. La posibilidad de manipular artificialmente la expresión de los mecanismos defensivos implicados en las PTI, ETI y SAR mediante la aplicación exógena de "elicitors" seleccionados, o de la ISR mediante la aplicación de microorganismos que la inducen, para el control de enfermedades, constituye un área de estudio actual y relevante en la Sanidad Vegetal (Lee et al., 2016).

Aunque el sofisticado modelo zigzag de interacciones moleculares en la defensa de las plantas contra sus patógenos cuenta con amplia aceptación y es considerado como el nuevo dogma central de la Fitopatología (Bent y Mackey, 2007), recientemente se ha cuestionado que, por su simplicidad, sea adecuado para incluir el amplio marco de simbiosis entre plantas y microorganismos -desde las parasíticas a las mutualistas-, así como de ligandos que debe percibir el sistema inmune vegetal. Cook et al. (2015) propusieron un modelo alternativo -denominado modelo de invasión para describir todas las interacciones entre plantas y sus patógenos y fitófagos, así como microorganismos endofitos o mutualistas, según el cual ciertas estructuras moleculares receptoras de la planta reconocen cualquier molécula microbiana o vegetal que indiquen invasión de aquella-. La complejidad de este nuevo modelo llevó a modificarlo con una dimensión espacial, a fin de diferenciar entre el reconocimiento de las moléculas que interviene en la invasión por receptores en el apoplasto y el que tiene lugar en el citosol, así como a simplificarlo para acomodarlo a los patógenos adaptados a una especie vegetal solamente (Kanyuka y Rudd, 2019). Además, este modelo de invasión espacial categoriza a todos los receptores del sistema inmune como receptores de la superficie celular o receptores intracelulares, de manera que los primeros son definidos como proteínas unidas a membranas que tienen dominios extracelulares para el reconocimiento de todas las moléculas implicadas en la invasión del apoplasto, incluyendo PAMPs, DAMPs y efectores de los patógenos, y constituyen por lo tanto un marco de receptores más amplio comparado con las PRRs.

C3.2.2.4.2. Mecanismos que subyacen en el reconocimiento entre plantas y microorganismos

Los mecanismos que subyacen en el reconocimiento de las proteínas efectoras por los productos de los genes *R* constituyen uno de los temas más intrigantes de la investigación fitopatológica en la actualidad (Bialas et al., 2018). Los estudios realizados hasta ahora -fundamentalmente con las proteínas R NB-LRR (también denominadas NLR), el más común de los tipos conocidos- han revelado que la interacción física receptor-ligando entre efector y proteína R puede tener lugar de forma directa o indirecta.

Uno de los modelos de interacción indirecta más populares es el denominado modelo guarda (*guard model*), que se basa en el concepto de que la proteína efectora tiene una diana específica en la planta que puede estar co-localizada con la proteína R y es indispensable para la actividad patogénica del efector en ausencia de esta última. Según este modelo, la proteína R actúa como "guardiana" de la diana vegetal monitorizándola para detectar la modificación que el efector origina en ella, de manera que dicha detección activa la expresión de los mecanismos de defensa en la planta que resultan en el fenotipo de resistencia, y la ausencia de ella da lugar a la enfermedad en la planta susceptible (van der

Hoorn y Kamoun, 2008). Implícitamente, el modelo guarda explicaría cómo una diversidad de efectores en una misma (o diferentes) raza(s) patogénica(s) de un patógeno puede(n) ser reconocida(s) por un solo gen *R* al tener una diana común, de manera que un limitado número de genes *R* puedan ser efectivos en la protección de las plantas contra una amplia diversidad de patógenos.

Como en el caso del modelo zigzag anterior, el modelo guarda no explica necesariamente todas las interacciones entre proteínas *R* y *Avr*, porque recientemente se han puesto de manifiesto algunas inconsistencias entre dicho modelo y datos sobre reconocimiento indirecto. Para confrontar dichas inconsistencias se han propuesto y demostrado dos modificaciones del modelo guarda, denominadas respectivamente **modelo señuelo** (*decoy*) (van der Hoorn y Kamoun, 2008) y de **dominios integrados** (Sarris et al., 2016). Mientras que en el caso del señuelo la diana del efector es requerida para la actividad de la proteína *R*, el modelo de dominios integrados se basa en **receptores complejos derivados de la fusión de las proteínas NLR con dominios señuelo de la planta, que sirven como cebo de los efectores del patógeno y permiten así su reconocimiento**. Los avances en las tecnologías para la secuenciación, ensamblaje y anotación de los genomas, así como para la identificación de efectores, están propiciando un **nuevo paradigma en la mejora genética de resistencia a las enfermedades** a través de la identificación de genes *R* utilizando las secuencias efectoras como sonda (Gibriel et al., 2016).

C3.2.2.4.3. La interacción proteína-proteína no es el único mecanismo en la regulación del sistema inmune vegetal: el papel de los sARNs

Aunque la investigación sobre los mecanismos que subyacen en el sistema inmune de las plantas se ha venido centrando en el papel que desempeñan moléculas proteicas en la interacción entre microorganismos y plantas, durante la última década ha **emergido un nuevo mecanismo en dicha interacción que concierne a moléculas de ARN no codificante de cadena simple y pequeño tamaño (18 a 30 nucleótidos) (sARNs, small ARNs)**, que desempeñan funciones clave en la regulación de la expresión génica y la estabilidad de los genomas en eucariotas mediante la supresión de ácido nucleicos –denominada silenciamiento génico– (Tang et al., 2021).

Los sARNs generados en plantas se pueden categorizar en dos tipos principales: (i) **microARNs (miARNs)**; y (ii) **sARN interferentes (siARNs, small interfering ARNs)**, en base a diferencias en las rutas de biogénesis y modo de acción. Los miARNs se generan a partir de precursores de ARN de cadena simple de genes *MIR* y silencian a sus dianas mediante la **degradación o la inhibición de la traducción de ARN mensajero (mARN)** – tras la transcripción-, y en algunos casos por **metilación del ADN que bloquea la transcripción**. Por el contrario, los siARNs se producen por la escisión enzimática de ARN de cadena doble y separación de las dos cadenas mediante una helicasa. El origen de dicho ARN y la forma en que subsiguientemente son procesados los fragmentos de cadena simple dan lugar a varios subtipos de siARN, que originan silenciamiento fundamentalmente en la transcripción mediante metilación del ADN, y en algunos casos por escisión de ARN mensajero.

El fenómeno del silenciamiento génico mediado por sARNs despertó interés entre los fitopatólogos, cuando se describió el **silenciamiento de genomas virales por siARNs** generados durante el proceso de infección de plantas por virus fitopatógenos. Con posterioridad, dicho interés se ha acrecentado con el descubrimiento de que los principales grupos de patógenos **inducen en la planta la formación de miARNs y siARNs, que suprimen o incrementan el desarrollo de la respuesta de su sistema inmune** confrontando los PAMS y efectores de aquellos (Tang et al., 2021). Por ejemplo, la respuesta PTI de *Arabidopsis* a la bacteria *Pseudomonas syringae* pv. tomato –no patogénica en dicha planta- es mediada por miR393, un miARN de *Arabidopsis* inducido por el PAMP flg22 de la flagelina de la bacteria que silencia el mARN en la síntesis de auxina necesaria para el desarrollo de enfermedad. Similarmente, la infección de *Arabidopsis* por una estirpe de *P. syringae* pv. tomato portadora del gen efector *avrRpt2*, induce espe-

cíficamente un siARN anti-sentido que contribuye a la resistencia estimulando la expresión del gen *RPS2* de resistencia raza-específica; y esta tiene lugar mediante el silenciamiento del gen *PPLR* que es supresor de la ruta de señalización de *RPS2*.

En el caso de hongos fitopatógenos, la formación de miARNs puede suprimir o intensificar la resistencia en la planta. Por ejemplo, la infección por *P. oryzae* induce varios miARNs en arroz que suprimen la expresión de resistencia e incrementan el desarrollo de síntomas –fundamentalmente mediante el silenciamiento de factores de la transcripción–; y en cebada, otros miARNs suprimen la resistencia al oídio (*B. graminis* f. sp. *hordei*) mediada por el grupo de alelos *Mla*. Curiosamente, la supresión de resistencia no solo implica a mecanismos que se expresan de forma localizada, sino que también puede tener lugar contra los que se expresan lejos del lugar de infección. Así, la infección del cv. 'Desirée' de patata por *P. infestans* induce la producción localizada y sistémica de miARN160 que suprime la expresión de SAR. Por el contrario, también se han identificado miARNs que contribuyen a la expresión de esta resistencia contra *P. oryzae* en arroz y contra *P. tritici* f. sp. *striiformis* en trigo (Tang et al., 2021).

La infección por virus fitopatógenos de ARN o ADN activa la producción de miARNs o siARNs endógenos de la planta y de siARNs derivados del virus (vasi-ARNs), que inhiben el ARN viral mediante la escisión de mARN, silencian el ADN del virus por metilación del ADN, o afectan a la resistencia en la planta. Por ejemplo, la infección de arroz por el virus del estriado del arroz (RSV) induce el miARN Osa-miR444 que anula la represión a la que está sujeta una proteína clave en la ruta del silenciamiento del ARN viral en ausencia de infección, de manera que la resistencia contra el virus es resultado del silenciamiento del ARN viral y de los genes de la planta que operan en la represión de dicha proteína. Contrariamente, la resistencia contra el virus del mosaico del tabaco (TMV) regulada por el gen *N* se expresa tras la reducción de varios miARNs y siARNs, que en ausencia de infección reprimen la expresión de dicho gen.

La importancia de los sARNs como elementos determinantes en las interacciones entre plantas y patógenos se ha visto reforzada recientemente, por el descubrimiento de que dichos sARNs se pueden incorporar en micro-vesículas extracelulares parecidas a los exosomas de animales y desplazarse entre células vegetales a través de los plasmodesmos y del floema, e incluso bidireccionalmente entre hongos y plantas (Thomma y Cook, 2018). Este desplazamiento bidireccional de sARNs tiene dos efectos diferentes sobre el sistema inmune vegetal. De una parte, algunos sRNAs producidos por la planta y transportados en micro-vesículas hasta el lugar de invasión son incorporados a la hifa invasora y suprimen la virulencia del hongo patógeno. Ejemplos de ello son determinados miARNs en algodón y siARNs en *A. thaliana* producidos respectivamente tras la infección por *V. dahliae* y *Botrytis cinerea*, que silencian específicamente a genes relacionados con la virulencia de dichos hongos y contribuyen a la defensa de la planta contra ellos. De otra parte, algunos sARNs pueden servir como efectores y suprimir la respuesta inmune de la planta secuestrando las rutas de su ARN interferente. Por ejemplo, tras la infección, varios siARNs de *B. cinerea* son transportados a la célula del huésped y suprimen la respuesta inmune incidiendo sobre el mARN de diversos genes que codifican factores de transcripción y quinasas implicados en la defensa de la planta.

El conocimiento sobre el papel de sARNs en el sistema inmune vegetal ha impulsado varias tecnologías basadas en ellos que son de aplicación en el control de enfermedades, entre las que son de destacar el uso de miARN artificiales (amiARN), el silenciamiento génico inducido por virus (VIGS), y el silenciamiento génico inducido mediante pulverización foliar de ARNs (SIGS). Las tecnologías amiARN y VIGS se emplean ampliamente para desarrollar plantas transgénicas resistentes a uno o varios virus fitopatógenos simultáneamente, si bien la aplicación práctica de ellas es frenada todavía por el cuestionamiento legal y social del uso de organismos modificados genéticamente (OMGs) en la Unión Europea (UE). La pulverización foliar de plantas con sARNs propicia su incorporación al patógeno –como un “ARN fungicida”– y se ha demostrado efectiva para reducir los síntomas causados por *B. cinerea* y *Scl-*

rotinia sclerotiorum en colza, *P. infestans* en patata, y *V. dahliae* en tomate. La tecnología SIGS puede ser una alternativa válida a la transgénesis para el uso de sARNs en el control de enfermedades, pero su eficiencia práctica es dificultada todavía por la rápida degradación de los ARNs desnudos, y requiere el desarrollo de materiales (ej., nano vesículas) que sirvan de vehículo para la aplicación y estabilización de los ARNs (Tang et al., 2021; Thomma y Cook, 2018).

C3.2.3. Luces y sombras de la mejora de plantas y utilización de cultivares mejorados para resistencia cualitativa

Las características genéticas y fenotípicas de la resistencia regulada por genes *R* han propiciado que la introgresión de estos, y la uniformidad genética espacio-temporal de los cultivares mejorados, hayan sido y continúen siendo las estrategias predominantes en la mejora y utilización de las resistencias desarrolladas. Esta uniformidad genética y la naturaleza raza-específica común de los genes *R* propician el desarrollo de ciclos de crecimiento y quiebra (*boom y bust*) de los cultivares resistentes, que son consecuencia de la superación (anulación) de la resistencia conferida por el gen *R* introgresado, por cambios que se producen en la estructura de la población del patógeno en favor de razas virulentas sobre aquel.

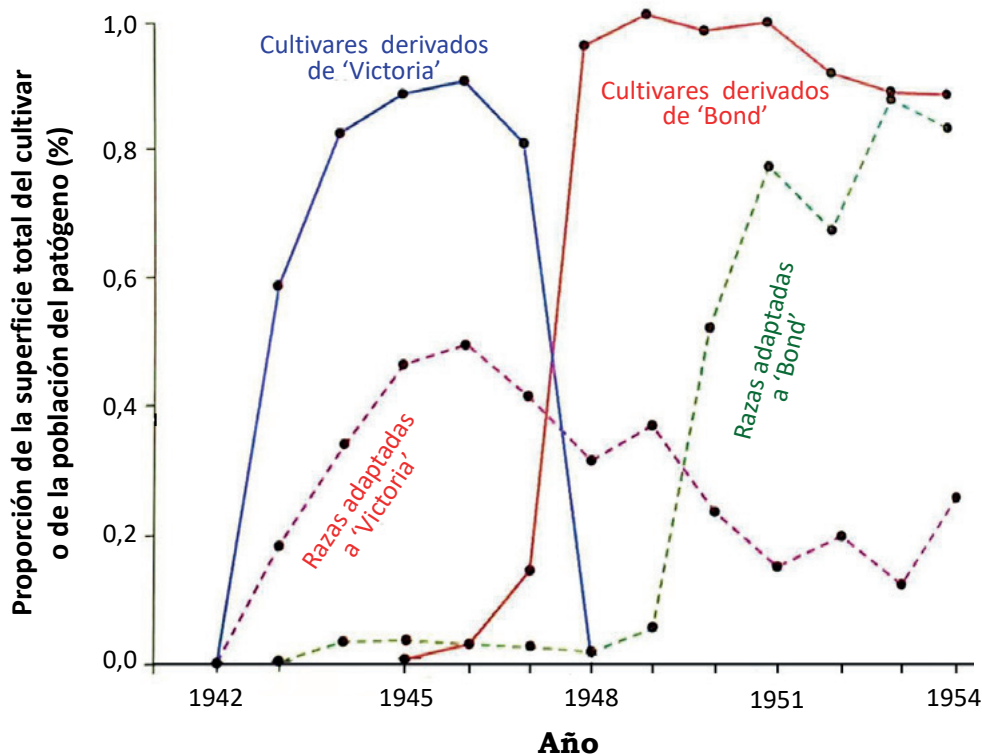


Foto 3. Desarrollo de razas virulentas de *Puccinia coronata* (roya coronada de la avena) asociado a la extensión del cultivo de cultivares de avena resistentes. Adaptado de McDonald, B.A. 2004. Population Genetics of Plant Pathogens. The Plant Health Instructor. doi:10.1094/PHI-A-2004-0524-01.

La superación de la resistencia raza-específica es particularmente relevante en hongos biotrofos causantes de mildius, oídios y royas, y se ha venido repitiendo en el curso del tiempo. Por ejemplo, el 90% de la avena cultivada en el Estado de Iowa (EE. UU.) en el periodo 1942-1945 era portadora del gen de resistencia a *P. coronata* f. sp. *avenae* (roya coronada de la avena) introgresado del genotipo 'Victoria' de *Avena bizantina*. Esta expansión territorial fue acompañada de un incremento en la prevalencia de razas de dicha roya virulentas sobre cultivares derivados de 'Victoria', que motivó su sustitución en 1946 por otros derivados del cv. 'Bond' resistentes a las razas de *P. coronata* f. sp. *avenae* virulentas sobre los cultivares derivados de 'Victoria'. Sin embargo, la subsiguiente expansión de cultivares tipo 'Bond', que alcanzaron prácticamente el 100% de la superficie cultivada

de avena pocos años después de su introducción, fue acompañada de un incremento paralelo de la prevalencia de razas del patógeno adaptadas a 'Bond' que eran prácticamente inexistentes en años anteriores (Foto 3). Medio siglo después, el sector triguero mundial fue conmocionado por las devastaciones que originó la raza UG99 (= TTKSK según el sistema de nomenclatura de razas norteamericano) de *P. graminis* f. sp. *tritici* (roya del tallo) identificada en Uganda, que es una nueva raza de esta roya virulenta sobre los genes de resistencia *Sr2* y *Sr31* presentes en el 70% de los cultivares de trigo que se habían demostrado efectivos a nivel mundial durante los 30 años anteriores (Singh et al., 2011). Tras la primera detección de la nueva raza UG99, se identificaron hasta 11 variantes de ella en un único linaje clonal que varían en virulencia sobre los genes de resistencia *Sr24*, *Sr31* y *Sr36* y sus combinaciones, y que se han diseminado en 13 países a lo largo del este de África desde Egipto hasta África del Sur.

La inestabilidad de la resistencia conferida por los genes *R* es consecuencia de la selección direccional en favor de las razas virulentas sobre ellos, que: (i) existían con baja frecuencia en la población inicial del patógeno; (ii) derivan de mutaciones/recombinaciones genéticas en las razas avirulentas primigenias; (iii) resultan de extensas reestructuraciones cromosómicas; o (iv) son inmigrantes de poblaciones geográficamente distantes (Brown, 1995; de Jonge et al., 2013). En el caso de patógenos de reproducción estrictamente asexual, como las ff. spp. de *F. oxysporum*, las nuevas razas capaces de superar múltiples genes *R* se desarrollan por acumulación de mutaciones en razas preexistentes, que tiene lugar: (i) en eventos múltiples e independientes (razas patogénicas polifiléticas); o (ii) por una serie de cambios discretos y secuenciales, en el que razas en un mismo linaje derivan unas de otras mediante ganancias o pérdidas de virulencia sobre la resistencia existente (razas patogénicas monofiléticas) (Jiménez-Gasco et al., 2004). El origen monofilético o polifilético de las razas patogénicas influye de forma directa sobre las estrategias de desarrollo y utilización de cultivares con genes *R*, porque la resistencia contra razas con distintas historias evolutivas desarrollada en un ámbito geográfico no es necesariamente eficiente cuando se utiliza en un ámbito evolutivo diferente.

En la resistencia a bacterias fitopatógenas es paradigmático el caso de *R. solanacearum*, que ha planteado serios problemas por su gran diversidad genética y amplio espectro patogénico. Por ejemplo, la resistencia contra la bacteria a partir de genes de la especie *Solanum phureja* introgresados en patata se demostró inestable en distintas localidades por la influencia de la temperatura y la intensidad luminosa; y la conferida por varios *loci* en el cultivar 'Hawai 7996' de tomate -que ha sido el más estudiado- tuvo un comportamiento inestable en distintas condiciones medioambientales. Ambos ejemplos y otros muchos, parecen convertir en una quimera la obtención de un cultivar universalmente resistente contra *R. solanacearum*, e indican la conveniencia de buscar fuentes de resistencia apropiadas para cada ecosistema y las estirpes locales. Además, como en otros casos, la resistencia del cultivar debe ser gestionada mediante una estrategia de GIP que reduzca la presión de inóculo bacteriano en la rizosfera, suelo, malas hierbas y agua de riego (López y Biosca, 2005; Huet et al., 2014).

C3.2.3.1. Estrategias para optimizar el uso eficiente de la resistencia raza-específica

La fragilidad de esta resistencia ante el riesgo de razas virulentas no debe llevar a desmerecer necesariamente las ventajas de su fácil obtención y alta protección de la planta, si su desarrollo y utilización se llevan a cabo con las cautelas que derivan de su naturaleza y de la selección direccional que promueven. Por ello, comprender los factores que subyacen en la inestabilidad de la resistencia raza-específica es clave para diseñar estrategias de mejora y utilización de cultivares con resistencia estable.

McDonald y Linde (2002) propusieron que la estabilidad de la resistencia raza-específica reside en el potencial evolutivo de las poblaciones de los patógenos -más que en la naturaleza de los genes de resistencia- que es influida por: (i) cambios o deleciones en la secuencia del ADN de genes individuales

que dan lugar a **nueva variación genética** y a razas virulentas sobre genes *R* efectivos (mutaciones) -influidos por el tamaño de la población del patógeno y la frecuencia de mutación inherente (esto es, menor número de mutantes en poblaciones pequeñas)-; (ii) **la probabilidad de que la nueva variación generada se transfiera a las generaciones siguientes del patógeno** -que también es influida por el tamaño de su población, de manera que los mutantes generados en poblaciones pequeñas tienden a desaparecer en el curso del tiempo por la deriva genética-. **La diversidad genética tiende a ser menor** -y la estabilidad de las poblaciones mayor- **en los patógenos que se caracterizan por baja tasa reproductiva y pequeñas poblaciones** (ej., hongos y oomicetos residentes en el suelo), y en aquellos en los que estas son reducidas periódicamente por medidas de control; (iii) **el intercambio de genes -o de genotipos completos** en el caso de patógenos de reproducción estrictamente asexual- **entre poblaciones geográficamente separadas** (migración de genes y genotipos). Los patógenos que producen propágulos fácilmente diseminados por el viento (ej., bacterias, mildius, oídios, royas, virus transmitidos por pulgones, etc.) tienden a desarrollar poblaciones con mayor diversidad genética que los escasamente diseminados por aquel (ej., patógenos residentes en el suelo), y sus razas virulentas tienen mayor probabilidad de entrar en contacto con plantas cuya resistencia superan; y (iv) **la recombinación genética** -por conjugación entre bacterias; recombinación entre estirpes virales que co-infectan una planta; y reproducción sexual, parasexualidad, o reestructuración cromosómica en hongos- **que propicia que las nuevas virulencias se redistribuyan con rapidez entre genotipos mejor adaptados** y confiere mayor riesgo de superación de resistencias comparado con los patógenos que no experimentan recombinación.

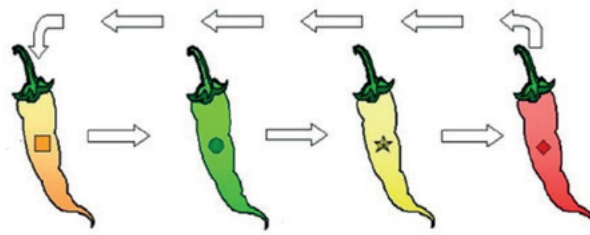
McDonald y Linde (2002) utilizaron un índice basado en los referidos factores para predecir el riesgo de superación de resistencia en un conjunto de 51 bacterias, hongos, nematodos y oomicetos, y concluyeron que los patógenos con: (i) **elevada tasa de mutación**; (ii) **gran tamaño de población**; (iii) **alto potencial de migración**; y (iv) **un sistema reproductivo mixto (asexual y sexual)**, tienen el mayor potencial de superación de resistencias; mientras que el menor potencial para ello lo presentan los patógenos de reproducción estrictamente asexual, baja tasa de mutación, escaso potencial de migración y poblaciones de pequeño tamaño. Y gran parte de dichas conclusiones fueron confirmadas por García-Arenal y McDonald (2003) en virus fitopatógenos, utilizando los tres últimos de los factores i-iv.

Además de por los factores antes referidos, la estabilidad de la resistencia raza-específica es **influida positivamente por pérdida adaptativa** derivada de las mutaciones que originan nuevas razas virulentas (esto es, un coste adaptativo de la ganancia de virulencia), y **negativamente por la selección direccional** que determinan el monocultivo y la homogeneidad genética sobre grandes áreas geográficas que promueven los agroecosistemas modernos. La selección direccional puede ser **interrumpida por estrategias en el uso de los genes *R*** que incrementen la diversidad en el agroecosistema y frenen el desarrollo evolutivo del patógeno, incluyendo: (i) **el despliegue regional e internacional de genes *R* diferentes**; (ii) **la gestión agronómica de los genes *R* y de los cultivos** (ej., rotación espacio-temporal de genes *R*, rotación de cultivos, fragmentación de la distribución de cultivos en/ entre explotaciones para evitar su homogeneidad espacial, cultivo intercalado de especies diferentes, etc.); y, en particular (iii) **estrategias de mejora de resistencia que propicien el incremento de la diversidad génica en los cultivares resistentes** [ej., combinación de varios genes *R* en un mismo cultivar (es decir, "piramidar" dichos genes)] y/o **la diversidad genotípica de los cultivos** (es decir, **mezcla de isólinas o de cultivares, resistentes y susceptibles**) (Foto 4) (McDonald, 2014; McDonald y Linde, 2002). La eficiencia comparativa de dichas estrategias no ha sido contrastada directa y experimentalmente, pero su estudio mediante un modelo estocástico demo-genético concluyó que **ninguna de ellas es universalmente óptima** (Rimbaud et al., 2018).

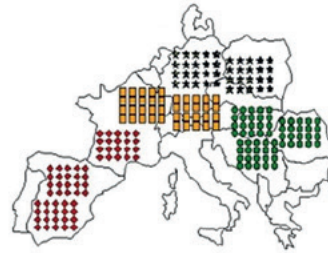
Foto 4. Estrategias para la utilización de genes *R* que regulan la resistencia cualitativa raza-específica.

A. Uso tradicional de genes *R* individuales en una secuencia que se acomoda al ciclo boom-bust; **B.** Cada gen se despliega en una extensión /tiempo limitados, y el cultivar resistente se retira de uso antes de que en la población del patógeno se alcance un frecuencia elevada de estirpes virulentas sobre él; **C.** Todos los genes *R* se reúnen en un mismo cultivar; **D.** Se despliegan diferentes genes *R* en diferentes territorios geográficos; **E.** Se utilizan para cultivo mezclas de líneas o cultivares agrónomicamente iguales pero que difieren en los genes *R* que portan. Adaptado de McDonald y Linde, 2002.

A. Uso individual: “cavar, sembrar, rezar”

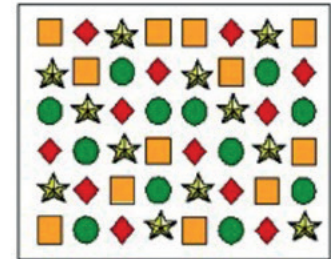
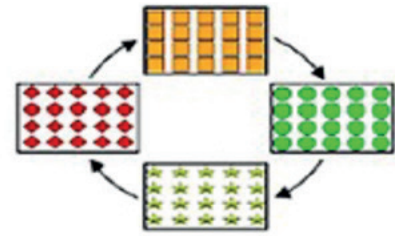


C. Piramidar (acumular)



D. Despliegue regional o internacional

B. Rotaciones en el espacio y el tiempo



E. Cultivares multilíneas y mezclas de cultivares

Las estrategias que conciernen el despliegue espacial de genes *R*, su separación temporal o espacial mediante la gestión agronómica de los cultivos, o la diversificación genotípica mediante mezclas, interrumpen la selección direccional propiciando la ocurrencia de alelos o genotipos distintos en momentos y lugares diferentes, y reduciendo con ello la tasa con que se incrementa la frecuencia de los alelos o genotipos mutantes. Sin embargo, estas estrategias no se han explotado todavía con extensión en los agroecosistemas actuales, presumiblemente porque constituyen inconvenientes para las prácticas agronómicas consuetudinarias. La estrategia de utilización de genes *R* más comúnmente utilizada es la combinación piramidal de varios genes *R*, que se ha empleado fundamentalmente contra royas de cereales. La superación de la resistencia conferida por la combinación de genes *R* requeriría el desarrollo de superrazas con mutaciones en cada *locus* de avirulencia sobre cada gen *R*, cuya probabilidad de ocurrencia sería el producto de las probabilidades de mutación individuales asumiendo que dichos *loci* son independientes. Sin embargo, los mecanismos por los que la combinación de genes *R* confiere estabilidad a la resistencia no son suficientemente conocidos, porque la asunción de independencia no excluye otras relaciones génicas, ni todos los genes *R* contribuyen igualmente en una combinación piramidal o se expresan igualmente en genotipos que difieren en su base genética (Mundt, 2018).

C3.2.4. Luces y sombras de la mejora y utilización de cultivares mejorados para resistencia cuantitativa

A diferencia de la resistencia raza-específica, la resistencia cuantitativa tiene como sello distintivo no estar sujeta al ciclo de crecimiento y quiebra, y ser efectiva independientemente de las razas del patógeno que prevalecen en los lugares de utilización -posiblemente porque no se basa en el reconocimiento entre receptores y elicitores-. Sin embargo, la evidencia acumulada con patógenos de alta tasa reproductiva, elevado potencial de migración y sistema reproductivo mixto -como mildius, oídios y royas-, indica que la eficiencia de esta resistencia puede disminuir con el tiempo de uso por la evolución de estirpes mejor adaptadas, en un proceso de erosión que es menos fácil de percibir que el ciclo de crecimiento y quiebra, por la influencia del medioambiente sobre la interacción entre los caracteres de herencia cuantitativa en la planta y en el patógeno (cf., Apartado C3.2.2.2.). A pesar del riesgo de erosión, la resistencia

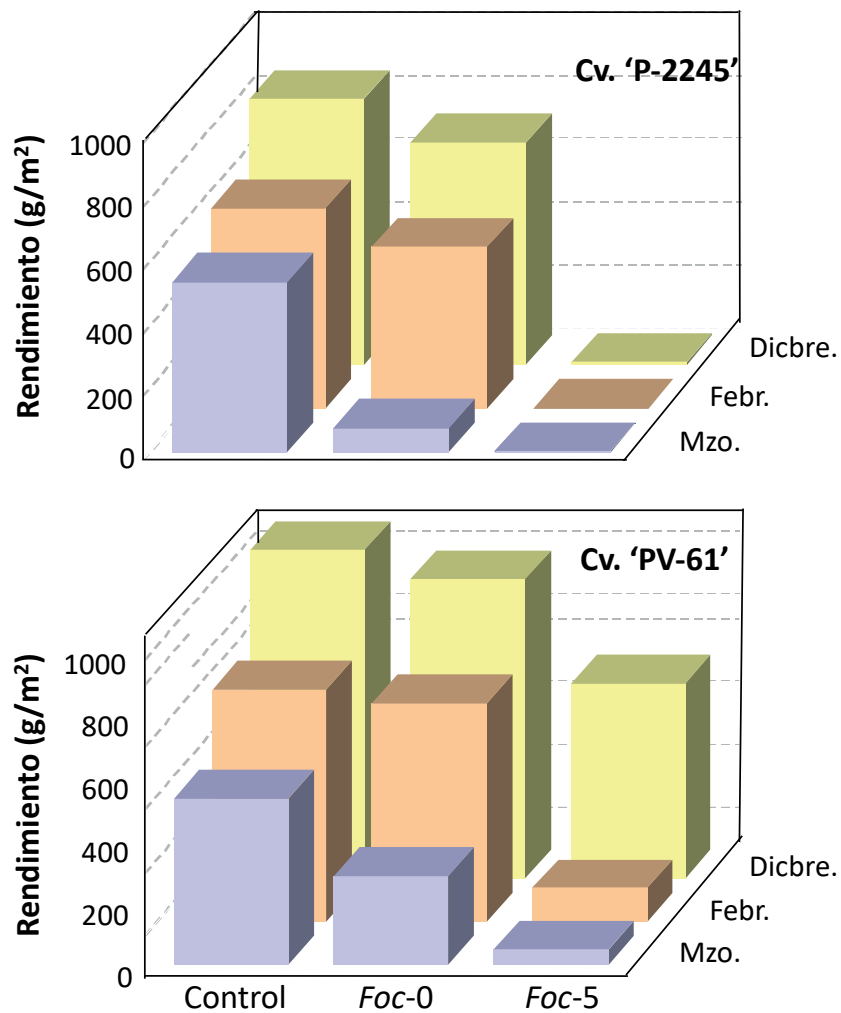
cuantitativa se ha convertido en **objetivo prioritario en los programas de mejora genética de especies vegetales** -siempre que ello no comprometa a caracteres agrónomicamente importantes, como adaptación, calidad, rendimiento, etc. (Boyd et al., 2013)-, porque desempeña un papel clave en la puesta en práctica de las estrategias de GIP de las enfermedades de las plantas (ver más abajo).

La mejora de resistencia cuantitativa presenta **mayor complejidad que la de resistencia raza-específica**, por la distribución continua y transgresiva del fenotipo de resistencia parcial en los cruzamientos entre parentales resistentes y susceptibles propia de su herencia poligénica, así como porque dicho fenotipo se expresa generalmente en la planta adulta y es influido notablemente por el medioambiente. Por ello, **la selección en las generaciones segregantes debe tener lugar en condiciones de campo**, y en lugares que aseguren la **prevalencia de una población diversa de razas virulentas** -para asegurar la naturaleza de raza-no específica- y **condiciones favorables para el desarrollo adecuado de la enfermedad** - para evitar el riesgo de que la resistencia parcial sea "oscurecida" por una presión de enfermedad excesiva.

La presencia de razas de virulencia contrastada en el lugar de selección es importante, a fin de evitar que **el fenotipo de resistencia parcial sea enmascarado por la expresión de genes *R* contra razas avirulentas** que puedan existir en los genotipos segregantes. De hecho, tal circunstancia no solo interfiere con la identificación de resistencia parcial en dichos genotipos, sino que también da lugar a la erosión de la dotación genética en los genotipos seleccionados. Esta última consecuencia fue denominada "**efecto Vertifolia**" por Van der Plank, para referirse a la **pérdida de resistencia parcial en el cv. 'Vertifolia' de patata durante la introgresión de los genes R_3 y R_4 de resistencia completa a *P. infestans*** (mildiu de la patata), porque durante la selección de resistencia no existían razas virulentas sobre dichos genes. La ausencia de razas virulentas imposibilitó la detección de resistencia parcial, y el nivel de esta que existía en los genotipos parentales se perdió inadvertidamente durante el proceso de mejora del cv. 'Vertifolia'. Esta pérdida de resistencia parcial dio lugar a ataques en dicho cultivar por razas virulentas sobre los genes R_3 y R_4 , cuya gravedad fue superior a la que se produjo en cultivares no mejorados con dichos genes.

La valiosa estabilidad de la resistencia cuantitativa no exime a esta de algunas limitaciones importantes ante variaciones en los factores que determinan el desarrollo de enfermedad severa, que se deben considerar y ponderar para la utilización eficiente de dicha resistencia. Por ejemplo, el nivel de protección que la resistencia parcial confiere al cv. 'PV-61' de garbanzo contra razas virulentas de *F. oxysporum* f. sp. *ciceris* (fusariosis vascular), **disminuye acentuadamente a medida que se incrementa la densidad de inóculo del patógeno en el suelo a la temperatura óptima para el desarrollo de la enfermedad (25 °C)**, y la magnitud de dicho efecto varía con las razas del patógeno (Jiménez-Gasco et al., 2004). De forma parecida, en condiciones de campo, **la resistencia parcial de los cvs. 'Arbequina', 'Changlot Real', 'Empeltre', 'Frantoio' y 'Koroneiki' de olivo es efectiva contra la verticilosis en suelos con 5 propágulos/g del patotipo defoliante de *V. dahliae***, pero la gravedad de la enfermedad **aumenta significativamente cuando el suelo contiene 21 propágulos/g** (Trapero-Casas et al., 2013). De igual manera, y puesto que la resistencia cuantitativa interfiere limitadamente la colonización del tejido infectado, pero no impide el desarrollo de enfermedad, **su efectividad contra bacterias, hongos y oomicetos que atacan la copa de la planta se ve comprometida por condiciones ambientales que favorecen su ciclo de infección y diseminación** (ej., ambientes muy húmedos o lluviosos). En igualdad de otras circunstancias, la magnitud de dicho efecto en detrimento de la efectividad de la resistencia cuantitativa en ambientes muy favorables, es mayor en enfermedades en las que se producen varios ciclos de infección (enfermedades policíclicas), que en las se desarrolla un solo ciclo (enfermedades monocíclicas). En consecuencia, el conocimiento de los factores que comprometen la eficiencia de la resistencia cuantitativa es necesario para establecer **directrices para maximizar su efecto en el control de las enfermedades de un cultivo**.

Foto 5. Influencia de la resistencia parcial en el cv. 'PV-61' comparado con la susceptibilidad del cv. 'P-2245', sobre el efecto de avanzar la fecha de siembra de garbanzo de principio de primavera a principio del invierno en Andalucía en el rendimiento de semilla en suelos infestados por las razas 0 (*Foc-0*) (moderadamente virulenta) y raza 5 (*Foc-5*) (altamente virulenta) de *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris*. Nótese que el efecto neto de la práctica de cultivo es influido por la virulencia de la raza del patógeno y la susceptibilidad del cultivar.



A pesar de las limitaciones indicadas arriba, la efectividad de la resistencia cuantitativa potencia las estrategias de GIP de las enfermedades de las plantas, porque permite sumar a aquella la de otras medidas de lucha y aprovechar el beneficio de las que tienen escaso efecto individual pero fácil aplicación. Por ejemplo, la resistencia cuantitativa en cultivares de patata y los tratamientos con fungicidas protectores reducen la tasa con que el mildiu (*P. infestans*) se incrementa en el tiempo, y ambos efectos son aditivos de manera que la diferencia entre el efecto del cultivar más resistente y el más susceptible equivale a la aplicación semanal de 0,7 kg/ha del fungicida mancozeb (actualmente no autorizado en la UE), y el control de la enfermedad en cultivares resistentes es posible con el tratamiento de aproximadamente un tercio de la dosis semanal necesaria para una efectividad similar en cultivares susceptibles (Fry, 1978). Similarmente, la siembra del cv. 'PV-61' de garbanzo parcialmente resistente a *F. oxysporum* f. sp. *ciceris* a principios de invierno retrasa el inicio de la fusariosis vascular, ralentiza su desarrollo, y reduce la cantidad final de enfermedad y la pérdida de rendimiento de semilla que ocasiona, comparado con el desarrollo de la enfermedad y la pérdida de rendimiento que se producen cuando el mismo cultivar se siembra a principio de primavera -la fecha de siembra tradicional- (Foto 5) (Navas-Cortés et al., 1998). Sin embargo, dicho adelanto de la siembra no tiene efecto sobre la enfermedad en cultivares susceptibles. Presumiblemente, en estos efectos subyace la influencia de la temperatura del suelo sobre el desarrollo de la fusariosis vascular, que se reduce significativamente con temperaturas inferiores a 20 °C.

C3.3. Mejora de resistencia a artrópodos fitófagos

C3.3.1. Tipos de relaciones planta-fitófago: desde el estudio ecológico de las relaciones a la comprensión de los mecanismos implicados en las mismas

La mayor parte de las plantas sirven de alimento a artrópodos entre los cuales algunos seleccionan unas pocas especies vegetales y otros son más generalistas. En ninguno de los casos las plantas son pasivas de forma que, tal como se dijo más arriba (Apartado C3.1.), el número de artrópodos fitófagos que se alimentan de plantas en ecosistemas naturales es infinitamente superior al número de fitófagos que causan problemas de plagas en ecosistemas agroforestales. Ello es debido a una diversidad de **mecanismos que limitan las densidades de fitófagos**, entre los cuales se destacan en esta sección las características de las plantas huésped cultivadas que limitan las tasas de crecimiento de las poblaciones de fitófagos y, en consecuencia, **los daños que estos causan en aquellas** (en los casos en que el daño depende directamente de la densidad del fitófago). Sin embargo, los mecanismos que determinan las relaciones planta huésped- fitófago no son independientes de los que operan en las relaciones que se dan en los ecosistemas agroforestales, de modo que, una vez más, hay que decir que la utilización de la relación bi-trófica (mecanismos de regulación de abajo arriba, *bottom-up*) considerada en esta sección para incluirla en la GIP, debe ser enmarcada en la globalidad de la red trófica (mecanismos de abajo arriba y de arriba abajo, *top-down*, así como otras relaciones interespecíficas, como competencia o depredación intragremial).

Cuando se empezó con la selección de cultivares para mejorar la cantidad y calidad de las cosechas, se identificaron caracteres de las especies de plantas cultivadas que aparentemente no contribuían a conseguir aquel objetivo. En consecuencia, dichos caracteres se suprimieron en la mejora de cultivares asumiendo que el coste de su producción por las plantas podía dirigirse a mejorar el rendimiento, aunque fuera a costa de hacerlos más accesibles a los fitófagos y aumentar la incidencia de las plagas. Ello exigió un mayor esfuerzo de control, lo que en aquel tiempo se abordó principalmente con la aplicación de productos fitosanitarios. Pronto, sin embargo, se tomó conciencia de que **prescindir de los caracteres que conferían a las plantas cultivadas resistencia contra los agentes nocivos causantes de daños y enfermedades era renunciar a una herramienta muy valiosa para la GIP** (cf., Apartados C3.1 y C3.2.). La ciencia empezó entonces a esforzarse en comprender los mecanismos que subyacen en las relaciones entre plantas huésped, fitófagos y sus enemigos naturales, e intentar aprovecharlos para la obtención de cultivares resistentes, tanto directa como indirectamente (mediante mejora de la atracción a la planta de enemigos naturales). Como tantas veces ha ocurrido en todas las ramas de la ciencia y la tecnología, la resistencia a plagas se abordó científicamente después de haberse aplicado empíricamente con notable éxito. Un ejemplo de ese éxito fue la utilización de vides americanas resistentes a la filoxera como patrones de viníferas en la segunda mitad del siglo XIX, que permitieron la supervivencia de la viticultura en Europa. Mucho tiempo después se puede destacar el texto seminal de Painter (1951), que fue fundamental en ese desarrollo científico de la resistencia a artrópodos fitófagos y enmarcó la investigación en ese campo en los 50 años siguientes. Painter clasificó las **relaciones entre fitófagos y plantas en tres tipos**: (i) no-preferencia (que pasó pronto a denominarse **antixenosis**); (ii) **antibiosis**; y (iii) **tolerancia de la planta**. En la antixenosis, la planta tiene características que impiden que el fitófago la seleccione para alimentarse, o para realizar la puesta. En la antibiosis, el fitófago tiene acceso a la planta, pero algunos caracteres de la misma suponen una merma en el desarrollo, crecimiento, fecundidad y supervivencia del fitófago cuando empieza a alimentarse. Finalmente, Painter definió la **tolerancia como la capacidad de la planta de soportar una cantidad de daño que le cause una disminución del rendimiento inferior a la que sufriría otra planta no tolerante, sometida a la misma cantidad de daño** (cf., Apartado 3.2.2.). De forma paralela a esa división, Painter dividió la relación entre la planta y el comportamiento fitófago en tres fases: (i) la **búsqueda de una planta huésped por parte de un fitófago**, que puede ser aleatoria o guiada por señales olfativas o visuales de la planta y que acaba con el encuentro de ambos; (ii) la **inspec-**

ción de la planta por el fitófago para evaluar su idoneidad como huésped o para la puesta y desarrollo de la descendencia; que habitualmente también es guiada por estímulos olfativos o visuales pero a más corta distancia que en la fase anterior, y también gustativos o físicos si el fitófago prueba (mordiéndolo o picando, según su aparato bucal) alguna parte de la planta y es capaz de detectar la toxicidad de algún compuesto o metabolito presente, o de percibir alguna característica que le dificulte el acceso a la parte nutritiva del huésped como la dureza exterior del tejido atacado; y finalmente (iii) en el caso de respuesta positiva en las fases anteriores se da la **explotación de la planta para la alimentación y/o puesta**, que puede ser el resultado de multitud de elementos estimulantes e inhibidores en la planta y del estado fisiológico del fitófago.

Tal como señala Stout (2013), el marco definido por Painter para la investigación sobre la relación planta huésped - fitófago ha dado lugar sin duda a un gran avance en el conocimiento de la ecología y evolución de aquella relación, así como de los metabolitos y compuestos vegetales implicados en la misma. Sin embargo, continúa Stout, **la investigación se ha centrado más en los efectos causados por los caracteres implicados y raramente se ha ahondado en los mecanismos que conducen a esos efectos, cuyo conocimiento facilitaría el desarrollo más rápido de cultivares resistentes**. En la misma línea de razonamiento, se ha dicho que esa aproximación a la resistencia vegetal contra los fitófagos explica que haya tenido menor desarrollo como método de control de plagas que en el caso de las enfermedades. Actualmente, con la mejora de las técnicas utilizadas para estudiar, aislar, cuantificar y caracterizar los factores de las plantas que interfieren con el comportamiento y fisiología de los fitófagos y sus enemigos naturales, se ha avanzado significativamente en el conocimiento de los mecanismos reales responsables de la resistencia de las plantas y en su introducción en nuevos cultivares. La prevención en la UE respecto del empleo de alguna de dichas técnicas, en particular la transgénesis, puede dificultar ese camino (cf., Apartado C3.4.).

Sin embargo, a pesar de las limitaciones de la aproximación ecológica a la resistencia con vistas a su utilización en la GIP, determinados mecanismos -que podríamos agrupar con el nombre de "**resistencia por evasión del huésped**"- se han revelado en la práctica de utilidad en varios cultivos y rotaciones. Dichos mecanismos son variados, pero entre los más utilizados están: (i) el uso de **ciclos de cultivo para que no coincidan los estados fenológicos de la planta más sensibles a un fitófago** y los máximos poblacionales de estos; (ii) la **disminución de la apariencia de las plantas cultivadas al mezclarlas con otras**, cultivadas o no, y así dificultar el reconocimiento a distancia del huésped atractivo para el fitófago; y (iii) la **resistencia inducida** -en contraposición con la resistencia constitutiva tratada hasta ahora- por la que determinados cultivares se vuelven menos preferidos por el fitófago cuando ya han sido atacados previamente por otros fitófagos, patógenos o incluso por enemigos naturales facultativamente fitófagos (Silva et al., 2021) -a los que nos referimos más adelante-. Esos mecanismos de evasión o resistencia inducida se aplican mediante prácticas culturales *ad hoc*, tales como: (i) **la gestión de la época de siembra**; (ii) **el no cultivo**; o (iii) **cultivos intercalados**, para lo cual se precisan cultivares con caracteres adecuados a fin de que expresen esa menor repercusión de la acción de los fitófagos y en ese sentido se puedan incluir entre los métodos de control de plagas por resistencia. Otro tipo de resistencia surgido del estudio ecológico de la relación planta huésped - fitófago es la llamada **resistencia indirecta**, en la que se reducen las poblaciones de los fitófagos que se relacionan con el cultivar resistente, porque este **facilita la participación y eficiencia de los enemigos naturales de los fitófagos** que potencialmente podrían ser plagas, de no mediar la actividad de esos enemigos naturales.

C3.3.2. Aprovechamiento de los caracteres que confieren a las plantas la resistencia a los fitófagos

La observación de que algunos caracteres de las plantas cultivadas confieren resistencia a los artrópodos fitófagos es muy antigua, aunque la incorporación de manera fundamentada de esos caracteres a los cultivares comerciales no se produce hasta que se inicia el desarrollo y aplicación de la genética vegetal.

Los principios básicos, la aplicación práctica, y las limitaciones de la mejora genética de la resistencia de las plantas a los fitófagos son en buena parte comunes a los que se han expuesto sobre la resistencia a fitopatógenos en apartados anteriores. En el Apartado C3.3.1. anterior hemos procurado describir los principales tipos de relaciones entre las plantas huésped y los fitófagos, y esbozar los mecanismos implicados en ellas. Ahora nos referiremos a los caracteres de las plantas que más comúnmente se han introducido en los cultivares comerciales para conferirles resistencia o tolerancia a los fitófagos, que dividimos en físicos y químicos si bien algunos de los caracteres que se mencionan tienen propiedades de barreras físicas a la vez que son defensas químicas. La obra de Walters (2011) constituye una buena síntesis de este tema.

C3.3.2.1. Caracteres físicos

Nos referiremos a: (i) la presencia de ceras sobre la superficie foliar; (ii) los tricomas en hojas y otros tejidos de las plantas; (iii) canales secretores de látex y resinas en hojas y tallos; y (iv) la rigidez y enrollamiento de las hojas.

C3.3.2.1.1. Ceras sobre la superficie foliar

Las ceras epicuticulares contribuyen tanto a la defensa de la planta contra los fitopatógenos como contra los artrópodos fitófagos. El principal mecanismo que interviene en la defensa de la planta es que el insecto no puede fijarse bien en la hoja, lo cual dificulta su alimentación o puesta. Esas mismas ceras pueden contener sustancias que pueden tener un papel complementario en la resistencia del cultivar.

C3.3.2.1.2. Tricomas

La pubescencia de la superficie foliar y del tallo también puede dificultar el movimiento de los insectos fitófagos sobre la superficie de la planta, y el acceso de los insectos chupadores a los tejidos vasculares en el caso que la longitud de los tricomas impida al insecto clavar el pico hasta las células que contienen el alimento buscado. La presencia de tricomas puede ser un carácter constitutivo de la planta que le confiere resistencia a algunos fitófagos, pero en ocasiones también se ha observado que es un carácter inducido por el ataque de un fitófago. En el caso de tricomas glandulares, la defensa física contra los fitófagos puede complementarse con sustancias de acción química como se verá en el Apartado C3.3.2.2. Las consecuencias negativas de la pubescencia para el comportamiento de insectos fitófagos se dan también para los enemigos naturales de esos mismos fitófagos. Un ejemplo típico es la extraordinaria pubescencia de algunos cultivares de tomate que disminuye la capacidad de inspección de los adultos de *Encarsia formosa*, un parasitoide utilizado tradicionalmente para el control biológico de la mosca blanca de los invernaderos, en cuyas ninfas pone los huevos cuando en la inspección del envés de la hoja reconoce una ninfa sin parasitar; en consecuencia, las hojas glabras permiten la inspección de un mayor número de ninfas y por tanto el parasitoide es más eficiente.

C3.3.2.1.3. Canales secretores

Son relativamente corrientes las especies vegetales capaces de secretar sustancias pegajosas como látex y resinas, que se almacenan en los canales de los haces vasculares de las plantas. Estas sustancias pegajosas se liberan cuando la planta es dañada por un fitófago y dificultan el movimiento e impiden la alimentación de los insectos fitófagos, que pueden llegar a ocasionarle la muerte por inanición en el caso de individuos de tamaño pequeño (inmaduros). Además de la acción física, las secreciones pueden contener sustancias químicas tóxicas que acentúan el efecto negativo para el fitófago.

C3.3.2.1.4. Dureza y enrollamiento de las hojas

La dureza de un tejido vegetal puede dificultar su desgarramiento por el fitófago y por tanto la tasa de ingestión, o reducir su digestibilidad al estar implicadas sustancias indigeribles tales como la celulosa y la lignina. Así, por ejemplo, es conocido que la acumulación de sílice en algunas gramíneas dificulta su

acceso a la alimentación por parte de algunos fitófagos a la vez que reduce su digestibilidad. Además de barrera física, la acumulación de silicatos puede constituir un mecanismo bioquímico de sensibilización para algunos insectos fitófagos (Alhousari y Greger, 2018). Aunque con un cierto grado especulativo, se ha observado que la precocidad o retraso del proceso de desenrollado en la formación de la hoja puede tener un papel en la atracción del fitófago hacia las hojas jóvenes, de forma que cuanto más tardío es ese proceso menor atracción para el fitófago y por tanto menor daño por alimentación del fitófago.

C3.3.2.2. Caracteres químicos

Las plantas producen una gran cantidad de sustancias con papeles diversos en la defensa contra los fitófagos, que intervienen en momentos diversos y con mecanismos distintos en la relación planta huésped-fitófago. Son los llamados metabolitos secundarios de plantas, ya que no desempeñan una función en el metabolismo vegetal. Curiosamente, estos metabolitos secundarios de las plantas tienen un cierto papel en la cocina y en la medicina.

Las sustancias defensivas se conocen como sustancias alelo-químicas y pueden actuar en la resistencia de las plantas a los fitófagos por su carácter tóxico o por su papel disuasorio (*deterrent*) de la alimentación en algunos fitófagos. En los apartados siguientes nos referiremos a grupos de sustancias particularmente conocidas como alelo-químicas, incluyendo terpenos, fenoles, compuestos nitrogenados y diversas proteínas con efecto en el sistema digestivo de los fitófagos.

C3.3.2.2.1. Terpenos

Existen en las plantas numerosos tipos de terpenos con múltiples actividades anti-artrópodo, algunas de las cuales se han explotado en insecticidas comerciales bien conocidos como las piretrinas o la azadiractina. Algunos terpenos son directamente tóxicos, y otros son más bien disuasorios o antiapetitivos. Los terpenos se acumulan en órganos diversos de las plantas, como los tricomas mencionados anteriormente, o están contenidos en exudados de látex y resinas. Los insectos precisan tomar de las plantas sustancias como colesterol o sitoesterol para sintetizar hormonas esteroidales –otra familia de terpenos- que son cruciales para su crecimiento y desarrollo (p.e., la hormona de la muda en los insectos, la 20-hidroxiecdisona, pertenece a esta familia). Algunos de los esteroides que los insectos toman de las plantas -como por ejemplo las fitoecdisonas- son capaces, sin embargo, de mimetizar la acción de la hormona de la muda y crear disfunciones en los insectos fitófagos y por tanto constituir un mecanismo defensivo para las plantas. Aludamos, por fin, a otra forma de uso de tipos de terpenos entomotóxicos que algunos artrópodos fitófagos toman de las plantas y les sirven para defenderse de los depredadores sin que se vean afectados por ellos. Por ejemplo, se ha puesto de manifiesto recientemente el papel de algunos monoterpenoides en la resistencia constitutiva o inducida del tomate a la araña roja, a la vez que se ha vislumbrado la implicación de uno de los depredadores de la araña en la resistencia inducida (Weinblum et al., 2021).

C3.3.2.2.2. Fenoles

Los flavonoides son los fenoles más habituales en las plantas con un papel en sus relaciones con los fitófagos. Una vez más, hay que decir que los efectos de esos compuestos en los insectos fitófagos pueden ser tóxicos, disuasorios y, en ocasiones, son usados para el reconocimiento de huéspedes aptos para la alimentación.

C3.3.2.2.3. Compuestos nitrogenados

Este apartado incluye varios grupos de compuestos, el más conocido de los cuales es probablemente el de los glucosinolatos. Estos últimos son muy comunes en plantas de la familia Brassicaceae y muchos insectos fitófagos los hidrolizan en su cuerpo produciendo compuestos muy tóxicos para ellos. Los insectos fitófagos especializados en las mencionadas crucíferas no hidrolizan los glucosinolatos y ello les

permite eludir los efectos tóxicos de los hidrolizados. Estos insectos, de hecho, utilizan los glucosinolatos para localizar sus plantas huésped (sustancias llamadas kairomonas), que también pueden explotar sus enemigos naturales para localizar a la presa (denominadas en este caso sinomonas) (ver C3.3.2.2.5.). Otros insectos pueden alimentarse de las crucíferas al evitar alimentarse de los órganos que contienen los glucosinolatos.

C3.3.2.2.4. Proteínas inducibles con efecto en el sistema digestivo de los fitófagos

Algunas proteínas producidas por las plantas pueden inhibir la capacidad de los insectos que se alimentan de ellas para absorber el alimento. Unas de las proteínas más estudiadas a ese respecto son **inhibidoras de proteasas**, cuya acción consiste en **inhibir la proteólisis y así reducir la disponibilidad de aminoácidos necesarios para el fitófago**. Es corriente que la síntesis y acumulación de estas proteínas en la planta se induzcan cuando esta es atacada por el fitófago.

C3.3.2.2.5. Compuestos volátiles

Las plantas producen una gran cantidad y variedad de compuestos volátiles con funciones diversas, cuya composición sirve a los fitófagos para reconocer a sus plantas huésped, o para discriminar el acercamiento y aceptación de las plantas no-huésped. Aunque muchos de esos compuestos forman parte de la constitución de la planta, su producción aumenta como respuesta al ataque de ciertos fitófagos.

C3.3.3. Señalización en la planta del ataque de un fitófago y su comunicación a la población

Hemos visto en las líneas precedentes un gran número de mecanismos físicos y químicos mediante los cuales las plantas se defienden de las acciones de los fitófagos. Tal como ocurre con los patógenos causantes de enfermedades en las plantas, esos mecanismos defensivos de las plantas tendrían una eficiencia mucho menor en proporcionar resistencia a los fitófagos, si las plantas huésped no tuvieran mecanismos que les advirtieran con cierta antelación de la amenaza de los fitófagos, para responder con las respuestas indicadas cuando y donde sean pertinentes según las especies fitófagas atacantes. **Vea-mos qué mecanismos de señalización del ataque de fitófagos se han estudiado y cómo se comunica este a tejidos y plantas circundantes al lugar del ataque**. Dado que varios de los procesos y mecanismos de señalización y comunicación son comunes con el ataque de patógenos, nos ceñiremos a los más relevantes para señalar y comunicar el ataque de fitófagos y distinguirlo de otros agentes nocivos, bióticos o abióticos.

Desde hace años es conocido que la mordedura de un tejido por parte de un insecto masticador induce en el tejido la **secreción de una sustancia señal que es capaz de provocar local o sistémicamente la expresión de genes con respuesta de defensa en la planta atacada**, la cual produce una **variedad de compuestos volátiles y no volátiles**; es un proceso parecido al que ocurre cuando el fitófago inicia la inspección de una planta para la puesta. La señalización del ataque a una planta huésped por un agente nocivo tiene muchos compuestos comunes para los distintos tipos de agentes, y a ellos nos hemos ya referido en apartados anteriores relativos a la señalización de la acción de fitopatógenos (cf., Apartado C3.2.2.3.). Por tanto, no entraremos en detalles en este apartado, sino que nos limitaremos a mencionar los compuestos más estudiados en la señalización del ataque de fitófagos.

Los tres principales tipos de moléculas señalizadoras localmente que provocan la respuesta de defensa contra fitófagos son de la familia de los jasmonatos, así como el etileno y el ácido salicílico. Se ha visto que el tipo de alimentación del insecto fitófago determina en gran medida la naturaleza del señalizador del ataque, siendo los jasmonatos y el etileno los más frecuentes en insectos masticadores, y el ácido salicílico en plantas atacadas por insectos chupadores tales como pulgones y moscas blancas.

Los tejidos alejados de la zona de la planta atacada por un fitófago también reciben **sistémicamente** la señal del ataque al poco tiempo de iniciarse, principalmente a través del floema. La investigación sobre el tipo de compuestos que intervienen en ese proceso indica que, entre otros, distintos tipos de jasmonatos intervienen también en la señalización sistémica, además de hacerlo en la local. La señalización sistémica incluso se puede dar dentro de un mismo tejido, de modo que una parte distante de la zona atacada puede ser advertida rápidamente del ataque. Las moléculas señalizadoras a larga distancia son en ocasiones volátiles, y su producción es determinada por señalizadores locales y sistémicos como los mencionados jasmonatos, etileno y ácido salicílico. **Los señalizadores volátiles complementan la actividad de los señalizadores vasculares al desplazarse más rápidamente entre tejidos alejados, en particular en especies de plantas arbóreas o arbustivas.** Además de intervenir en la producción de compuestos de defensa, los señalizadores volátiles atraen enemigos naturales, tanto parasitoides como depredadores, desde cierta distancia. Los compuestos volátiles emitidos por una planta atacada por un fitófago para suscitar una respuesta de atracción de enemigos naturales, suelen llevar además la información acerca del tipo de fitófago que ha iniciado el ataque a la planta y así discriminar el enemigo natural atraído. En la señalización sistémica también habría que considerar péptidos endógenos de las plantas como sisteminas u otros péptidos como Pep1, etc. Igualmente se han identificado PRRs que reconocen MAMPs/DAMPs de fitófagos que se encuentran en la ovoposición o en la saliva.

Una forma de preparar la planta para un posible nuevo ataque de un fitófago es la llamada **sensibilización** (*priming* en la literatura en inglés). Una vez la planta ha sido atacada por un fitófago (o cualquier otro estrés biótico), la sensibilización la prepara para un nuevo ataque del mismo o similar organismo nocivo y no confiere resistencia *per se* a la acción de un fitófago, sino que hace que la respuesta a un nuevo ataque sea más rápida. Se ha visto que la sensibilización es en ocasiones causada por las sustancias señalizadoras mencionadas en el apartado anterior, y por tanto se puede dar de manera sistémica o por compuestos volátiles en tejidos o plantas no atacadas anteriormente. Al igual que lo dicho anteriormente, la sensibilización también puede implicar a los enemigos naturales facilitando la resistencia indirecta.

En estos últimos apartados de relaciones entre planta huésped y fitófago hemos visto el número y diversidad de factores y mecanismos implicados, que se han estudiado y que ofrecen **muchas oportunidades para el uso de la resistencia de las plantas a los artrópodos fitófagos, oportunidades que sólo en una minoría de casos han sido aprovechadas para crear cultivares resistentes.** Estudiar la genética y heredabilidad de los caracteres vegetales mencionados debería permitir obtener más provecho de la resistencia vegetal a los artrópodos fitófagos. El desarrollo de la biotecnología aplicada a esa finalidad, y en particular la obtención de cultivares genéticamente modificados, puede permitir dar un paso adelante en ese campo. Al propio tiempo de facilitar la utilización de genes que confieren resistencia a los fitófagos en los cultivares de especies cultivadas, las técnicas biotecnológicas de inserción de genes en especies de plantas alejadas taxonómicamente de los organismos donantes, están permitiendo estudiar las interacciones de genes relacionados con la resistencia. Este ha sido el caso de algunos cultivares de maíz en los que se han insertado genes de la bacteria entomopatógena *Bacillus thuringiensis* (Bt) para conferirles resistencia a los taladros (lepidópteros que minan el tallo del maíz), junto con genes responsables de la sobre-expresión de carotenoides con finalidades de mejora del valor nutritivo del maíz. En Girón-Calva et al. (2021) se ponen de manifiesto las interacciones entre ambos genes para modular la resistencia aportada por el Bt según el estado de desarrollo del fitófago. **Sin lugar a dudas, necesitamos de mucha más investigación para aprovechar mejor la resistencia vegetal a plagas e integrarla en programas de GIP.**

C3.4. Perspectivas en la mejora de cultivares resistentes a patógenos y artrópodos fitófagos

En términos generales, la mejora de la resistencia contra patógenos y artrópodos fitófagos ha sido un objetivo secundario a la de rendimiento y calidad de la producción en los programas de mejora genética de los principales cultivos. Sin embargo, el reconocimiento social de la magnitud de las pérdidas en cantidad y calidad de las cosechas causadas por organismos nocivos, así como de la fragilidad de los cultivos con resistencias ya desarrolladas ante nuevas razas virulentas y el incremento en la emergencia y resurgencia de agentes nocivos, han conferido durante las últimas décadas un renovado impulso a dicha mejora de las resistencias como estrategia fundamental para la protección sostenible de los cultivos agro-forestales (Bailey-Serres et al., 2019; Jeger et al., 2021).

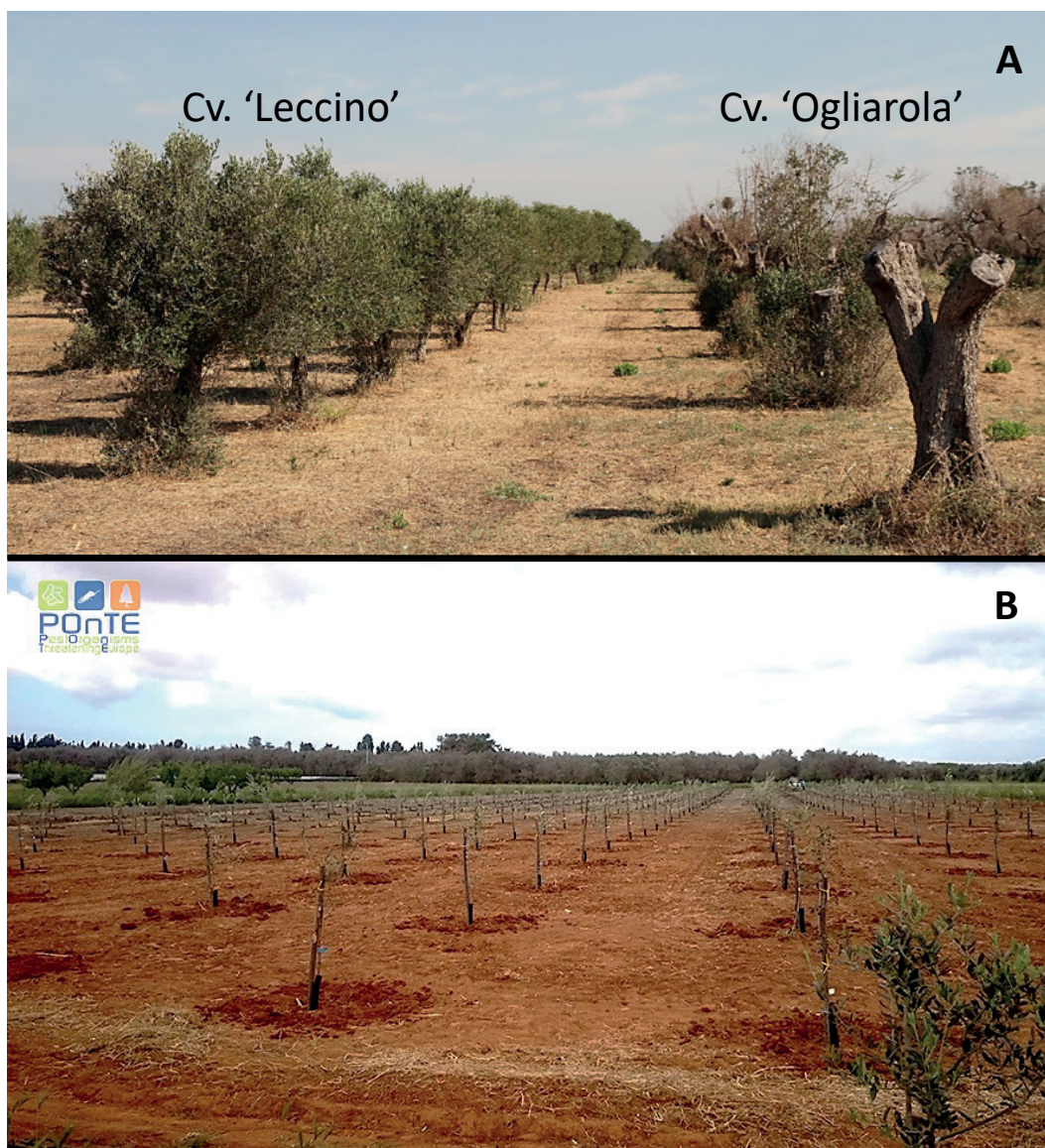


Foto 6. Evaluación de germoplasma de olivo sobre resistencia a la infección natural por *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca* grupo genético ST53, en una zona oliverera gravemente afectada en la Apulia, sur de Italia. **A.** Respuesta resistente del cv. 'Leccino' comparada con la susceptible del cv. 'Ogliarola' (Cortesía de D. Boscia); **B.** Plantación de genotipos de olivo para su evaluación por resistencia a *X. fastidiosa* desarrollada en el marco del proyecto PONTE (*Pest Organisms Threatening Europe*) de la UE; obsérvese un olivar gravemente afectado al fondo de la imagen (Cortesía de B.B. Landa).

Un buen ejemplo de la selección de resistencia en Bancos de germoplasma como vía rápida para disponer de medidas de control contra una nueva enfermedad, es la búsqueda de genotipos de olivo resistentes a la bacteria *Xylella fastidiosa* -responsable de la pérdida de más de 10 millones de olivos en la Apulia, sur de Italia, entre 2013 y 2019-, contra la que solo se aplican medidas de control como la erradicación

de plantas afectadas y los tratamientos insecticidas contra el vector del patógeno. A tal fin, Boscia et al., (2017) han venido evaluando la respuesta a la infección por *X. fastidiosa* en una amplia colección de genotipos de olivo plantados en zonas olivareras de la Apulia gravemente afectadas, que les ha permitido constatar la resistencia de los cvs. 'FS-17' y 'Leccino' a la bacteria (Foto 6).

Por otra parte, la recurrencia en el fenómeno de la superación de resistencias por la aparición de nuevas variantes de los patógenos de mayor virulencia, ha dado en conferir un **gran impulso al desarrollo de resistencias durables** (esto es, **aquellas que permanecen estables en el tiempo no obstante su uso extensivo e intensivo en términos geográficos y temporales**), que se ha venido produciendo mediante estrategias convencionales de recombinación aleatoria de genotipos agronómicamente adaptados y fuentes de resistencia silvestres, selección fenotípica de los genotipos segregantes resistentes, y evaluación en campo de que la resistencia introgresada no conlleva detrimento de rendimiento ni está asociada con caracteres no deseados de los genotipos silvestres. A pesar de la complejidad inherente, **la mejora genética convencional y la selección fenotípica han tenido éxito reconocido en el desarrollo de resistencias durables**. En España, por ejemplo, la evaluación de bancos de germoplasma de cereales y leguminosas ha permitido identificar nuevas fuentes de resistencia a diversos hongos fitopatógenos, y combinar en un mismo cultivar resistencias a varias razas de un mismo patógeno, así como a patógenos diferentes (Pérez de Castro y Díez Niclós, 2019). Sin embargo, dicha estrategia de mejora de resistencia es costosa **en recursos humanos y financieros, y requiere un periodo de tiempo que excede con frecuencia los 10 años**, a pesar de que en el curso de su desarrollo se han ido incorporando mejoras tecnológicas como el uso de marcadores moleculares para la selección y evaluación de la resistencia, y la identificación y detección de nuevas razas.

El conocimiento acumulado durante la última década sobre las bases moleculares de las interacciones entre plantas y microorganismos, y los avances y disponibilidad de plataformas de secuenciación masiva de alto rendimiento y de diversas tecnologías 'ómicas', están propiciando **abundante información sobre los genomas de especies vegetales y de patógenos, así como nuevos abordajes en la mejora de resistencia a estos**. Por ejemplo, el genotipado y cartografiado de colecciones de germoplasma de especies cultivadas y silvestres (<https://www.croptrust.org>) facilita la identificación de nuevas fuentes de resistencia contra patógenos y fitófagos, y la introgresión de nuevas combinaciones de genes de resistencia en cultivares adaptados. Li et al. (2020) han resaltado la factibilidad técnica de caracterizar genes que confieren resistencia de amplio espectro y durable, que es inespecífica respecto de especies patógenas o de sus razas, cuya clonación en plantas ha revelado que codifican receptores PRRs o NLRs, así como proteínas relacionadas con rutas de señalización o con la patogénesis (proteínas PR, cf. Apartado C3.2.2.4.1.). Resultados recientes demuestran que los genes que codifican receptores intracelulares (NLRs) y en particular de superficie (PRRs) no son específicos de linajes vegetales determinados, y pueden ser **transferidos inter-especies de géneros diferentes mediante transgénesis y conferir resistencia en especies no relacionadas** (Bailey-Serres et al., 2019). Estos resultados, junto con la creciente accesibilidad a la diversidad genética disponible en poblaciones naturales de especies silvestres, puede facilitar la recuperación de genes NLRs y PRRs que se perdieron durante la domesticación de especies vegetales o han evolucionado independientemente en linajes vegetales diferentes.

Los beneficios potenciales de estos avances mediante cultivos transgénicos (Pixley et al., 2019) han dado lugar a que estos se utilicen extensivamente y con éxito en numerosos países de varios continentes desde los años 1980s, pero en la UE son de difícil aplicación porque el uso de OMGs está prohibido a pesar de los beneficios que se han derivado de ellos. Todo ello a pesar de que un meta-análisis de 1.783 estudios sobre cultivos de plantas transgénicas y sus posibles efectos en la salud humana y en el ecosistema, publicados entre 2002 y 2012, concluyera que "hasta el momento no se ha detectado ningún riesgo significativo relacionado con el uso de los cultivos transgénicos" (Nicolia et al., 2014). En España,

en particular, se han llevado a cabo bastantes estudios de los posibles efectos del maíz transgénico Bt, cuya siembra y consumo está autorizado, sobre los organismos no diana. Se concluyó de ellos (Comas et al., 2014) que dichos efectos no pudieron detectarse en el sur de Europa después de 10 años de ensayos de campo exhaustivos, y en la actualidad siguen sin detectarse después de un buen número de años con una superficie de siembra muy significativa con esos cultivares transgénicos. Además, un exhaustivo informe del Comité de Cultivos Genéticamente Modificados de la Academia Nacional de Ciencias, Ingeniería y Medicina de los EE.UU., indicó que “no existe evidencia respecto de efectos adversos de cosechas de cultivos modificados genéticamente sobre la salud humana o la animal” (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2016). Por otra parte, y como ejemplo, a pesar de que se ha advertido del riesgo de que las especies de insectos fitófagos de maíz Bt podían generar resistencia a las toxinas producidas en las plantas transgénicas, un plan de seguimiento en España de los niveles de susceptibilidad en poblaciones de campo en las zonas con mayor concentración del maíz Bt, no ha podido detectar resistencia hasta ahora.

No obstante, todo ello y la opinión mayoritaria de los científicos sobre la seguridad de muchos cultivos transgénicos, su libre utilización en agricultura continúa sin ser autorizada en la UE, posiblemente debido a la falta de divulgación de los datos científicos sobre su seguridad, aunque si esté autorizada la importación de productos transgénicos en ciertos países de la UE, como España. Esta es una más de las paradojas de la política agrícola de la UE que han puesto de manifiesto algunos investigadores (véase por ejemplo Masip et al., 2013).

Las dificultades derivadas del rechazo a la introducción de ADN foráneo son superadas con la utilización de la tecnología denominada CRISPR/Cas9 (acrónimo de *clustered regularly interspaced short palindromic repeats*/CRISPR-*associated protein*, repeticiones palindrómicas cortas agrupadas inter-espaciadas regularmente/endo-nucleasa asociada a CRISPR), un sistema que permite modificar el genoma de microorganismos y plantas de forma dirigida y precisa (edición genómica), mediante enzimas que cortan el ADN (endo-nucleasas) guiadas por fragmentos de ARN -sin necesidad de ADN foráneo-, que ha revolucionado la biología molecular y se ha aplicado con éxito en la mejora genética de precisión de diversas plantas cultivadas desde su primera aplicación en 2013 (Zhu et al., 2020). La utilización de la tecnología CRISPR/Cas9 para la mejora de resistencia, se ha centrado en estrategias que evitan la evolución recíproca de virulencia que promueve la introgresión de genes *R*, incluyendo principalmente la edición y modificación de genes que facilitan la infección de la planta por el patógeno -que se conocen como genes de susceptibilidad-, para evitar el inicio de aquella o la colonización subsiguiente. La utilidad y actualidad de dicha estrategia en la mejora para resistencia contra los agentes fitopatógenos ha sido resaltada recientemente por Pallás (2022), quién ha señalado su empleo con éxito para el desarrollo de resistencia contra diversos hongos y oomicetos (ej., *B. graminis* f. sp. *tritici*, *B. cinerea*, *Magnaporthe oryzae* y *Phytophthora capsici*), bacterias (ej., *Erwinia amylovora*, *X. citri* subsp. *citri* y *X. oryzae* pv. *oryzae*) y virus (ej., diversos begomovirus y geminivirus), en cultivos de interés agrícola como arroz, manzano, naranjo dulce, pepino, pomelo, tomate, y trigo, pero no se ha utilizado aún contra artrópodos fitófagos y nematodos. Más recientemente, se ha comenzado a utilizar la tecnología CRISPR/Cas9 para desarrollar resistencia mediante la modificación de las dianas de los efectores producidos por los patógenos (Schenke et al., 2020) (cf., Apartado C3.2.2.4.1.). Ejemplos de ellos son la generación de resistencia de amplio espectro mediante la inactivación de los genes *SWEET* en arroz cuya transcripción es necesaria para el desarrollo de la bacteriosis causada por *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*, del gen *EDR1* que codifica una MAPK quinasa que inhibe la expresión de mecanismo defensivos contra el oídio *B. graminis* f. sp. *tritici*, y del factor iniciación de la transcripción *IF4E* en pepino que es indispensable para la infección por potyvirus (Zhu et al., 2020).

La edición genómica mediante la tecnología CRISPR/Cas9 -u otras nuevas tecnologías diferentes de la transgénesis-, será sin duda una estrategia indispensable para acelerar el desarrollo de nuevos culti-

vares con resistencia durable y múltiple en la UE, y con ello la mejora de la resistencia de los cultivos. Los beneficios derivados de dicha tecnología para la protección sostenible de los rendimientos, deberían auspiciar los mayores esfuerzos para evitar que dichos nuevos cultivares sean incluidos en la legislación de organismos genéticamente modificados de la UE. A tal efecto, los científicos implicados en el desarrollo y aplicación de las referidas tecnologías deberían redoblar los esfuerzos de divulgación y conexión con agricultores, consumidores, y medioambientalistas concernidos con la seguridad alimentaria y el medio ambiente, para evitar los errores que redundaron en la legislación prohibitiva de la UE sobre el cultivo de plantas transgénicas. A dicho objetivo también contribuiría que se promovieran las colaboraciones entre todos los Estados miembros de la UE, sobre las consideraciones científico-técnicas y los ensayos oportunos que sirvan de base para los análisis de riesgo y los sistemas regulatorios de los nuevos cultivares de interés agro-forestal (Bailey-Serres et al., 2019; Jeger et al., 2021).

C3.5. Bibliografía

- Alhousari, F., y Greger, M. 2018. Silicon and mechanisms of plant resistance to insect pests. *Plants* 7: 33.
- Bailey-Serres, J., Parker, J.E., Ainsworth, E.A., Oldroyd, G.E.D., y Schroeder, J.I. 2019. Genetic strategies for improving crop yields. *Nature* 575: 109-118.
- Bent, A.F., y Mackey, D. 2007. Elicitors, effectors, and *R* genes: The new paradigm and a lifetime supply of questions. *Annu. Rev. Phytopathol.* 45: 399-436.
- Bialas, A., Zess, E.K., De la Concepcion, J.C., Franceschetti, M., Pennington, H.G., et al. 2018. Lessons in effector y NLR of plant-microbe systems. *Mol. Plant Microb. Interact.* 31: 34-45.
- Boller, T., y Felix, G. 2009. A renaissance of elicitors: perception of microbe-associated molecular patterns and danger signals by pattern-recognition receptors. *Annu. Rev. Plant Biol.* 60: 379-406.
- Boyd, L.A., Ridout, C., O'Sullivan, D.M., Leach, J.E., y Leung, H. 2013. Plant-pathogen interactions: disease resistance in modern agriculture. *Trends Genet.* 29: 233-240.
- Brasier, C. 2000. Plant Pathology: The rise of hybrid fungi. *Nature* 405: 134-135.
- Brown, J.K.M. 1995. Pathogen's responses to the management of disease resistance genes. Págs. 75-102, en: J.H. Andrews y I.C. Tommerup, eds. *Advances in Plant Pathology* vol. 11. Academic Press. Nueva York.
- Browning, J.A. 1963. Teaching and applying the gene-for-gene hypothesis for interactions in host-parasite systems. *J. Iowa Acad. Sci.* 70: 120-125.
- Castroagudín, V.L., Moreira, S.I., Pereira, D.A.S., Moreira, S.S., Brunner, P.C., Maciel, J.L.N., Crous, P.W., McDonald, B.A., Alves, E., y Ceresini, P.C. 2016. *Pyricularia graminis-tritici*, a new *Pyricularia* species causing wheat blast. *Persoonia* 37: 199-216.
- Comas, C., Lumbierres, B., Pons, X., y Albajes, R. 2014. No effects of *Bacillus thuringiensis* maize on nontarget organisms in the field in southern Europe: a meta-analysis of 26 arthropod taxa. *Transgenic Res.* 23:135-43
- Cook, D.E., Mesarich, C.H., y Thomma, B.P.H.J. 2015. Understanding plant immunity as a surveillance system to detect invasion. *Annu. Rev. Phytopathol.* 53: 541-563.
- Couch, B.C., Fudal, I., Lebrun, M.-H., Tharreau, D., Valent, B., van Kim, P., Nottéghem, J.L., y Kohn, L.M. 2005. Origins of host-specific populations of the blast pathogen *Magnaporthe oryzae* in crop domestication with subsequent expansion of pandemic clones on rice and weeds of rice. *Genetics* 170: 613-630.
- Christ, B.J., Person, C.O., y Pope, D.D. 1987. The genetic determination of variation in pathogenicity. Págs. 7-19, en: M. Wolfe y C.E. Caten, eds. *Populations of Plant Pathogens: their Dynamics and Genetics*. Blackwell Scientific Publications. Oxford.
- de Jonge, R., Bolton, M.D., Kombrink, A., van den Berg, G.C., Yadeta, K.A., y Thomma, B.P. 2013. Extensive chromosomal reshuffling drives evolution of virulence in an asexual pathogen. *Genome Res.* 23: 1271-1282.
- Depotter, J.R.L., Deketelaere, S., Inderbitzin, P., von Tiedemann, A., Höfte, M., Subbarao, K.V., Wood, T.A., y Thomma, B.P.H.J. 2016. *Verticillium longisporum*, the invisible threat to oilseed rape and other brassicaceous plant hosts. *Mol. Plant Microb. Interact.* 17: 1004-1016.
- Dodds, P.N., y Rathjen, J.P. 2010. Plant immunity: towards an integrated view of plant-pathogen interactions. *Nat. Rev. Genet.* 11: 539-548.
- Ellis, J.G., Lagudah, E.S., Spielmeiers, W., y Dodds, P. 2014. The past, present and future of breeding rust resistant wheat. *Front. Plant Sci.* 5: 641. doi: 10.3389/fpls.2014.00641
- Flor, H.H. 1956. The complementary genic systems in flax and flax rust. *Adv. Genet.* 8: 29-54.
- Fry, W.E. 1978. Quantification of general resistance of potato cultivars and fungicide effects for integrated control of potato late blight. *Phytopathology* 68: 1650-1655.
- Gibriel, H.AY., Tomma, B.P.H.J., y Seidl, M.F. 2016. The age of effectors: genome-based discovery and applications. *Phytopathology* 116: 1206-1212.

- García-Arenal, F., y McDonald, B.A. 2003. An analysis of the durability of resistance to plant viruses. *Phytopathology* 93: 941-952.
- Gill, U.S., Lee, S., y Mysore, K.S. 2015. Host versus nonhost resistance: Distinct wars with similar arsenals. *Phytopathology* 105: 580-587.
- Girón-Calva P.S., López, C., Albacete, A., Albajes, R., Christou, P., y Eizaguirre, M. 2021. β -carotene and *Bacillus thuringiensis* insecticidal protein differentially modulate feeding behaviour, mortality and physiology of European corn borer (*Ostrinia nubilalis*). *PLoS ONE* 16(2): e0246696. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246696>.
- Gururani, M.A., Venkatesh, J., Upadhyaya, C.P., Nookaraju, A., Pandey, S.K., y Park, S.W. 2012. Plant disease resistance genes: current status and future directions. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 78: 51-65.
- Hu, L., y Yang, Li. 2019. Time to fight: molecular mechanisms of age-related resistance. *Phytopathology* 109: 1500-1508.
- Huet, G. 2014. Breeding for resistances to *Ralstonia solanacearum*. *Front. Plant Sci.*, 5:715. doi: 10.3389/fpls.2014.00715.
- Jeger, M., Beresford, R., Bock, C. Brown, N., Fox, A., Newton, A., Vicent, A., Xu, X., y Yuen, J. 2021. Global challenges facing plant pathology: multidisciplinary approaches to meet the food security and environmental challenges in the mid-twenty-first century. *CABI Agric. Biosci.* 2:20. <https://doi.org/10.1186/s43170-021-00042-x9>.
- Jiménez-Díaz, R.M., Castillo, P., Jiménez-Gasco, M.M., Landa del Castillo, B.B., y Navas-Cortés, J.A. 2015. Fusarium wilt of chickpeas: Biology, ecology and management. *Crop Protect.* 73: 16-27.
- Jiménez-Gasco, M.M., Milgroom, M.G., y Jiménez-Díaz, R.M. 2004. Stepwise evolution of races in *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* inferred from fingerprinting with repetitive DNA sequences. *Phytopathology* 94:228-235.
- Jiménez-Gasco, M.M., Navas-Cortés, J.A., y Jiménez-Díaz, R.M. 2004. *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* / *Cicer arietinum* pathosystem: a case study of the evolution of plant-pathogenic fungi into races and pathotypes. *Intern. Microbiol.* 7: 95-104.
- Jones, J.D., y Dangl, J.L. 2006. The plant immune system. *Nature* 444: 323-329.
- Kanyuka, K., y Rudd, J.J. 2019. Cell surface immune receptors: the guardians of the plant's extracellular spaces. *Curr. Opin. Plant Biol.* 50: 1-8.
- Lee, S., Whitaker, V.M., y Hutton, S.F. 2016. Mini Review: potential applications of non-host resistance for crop improvement. *Front. Plant Sci.* 7: 997. doi: 10.3389/fpls.2016.00997.
- Li, W., Deng, Y., Ning, Y., He, Z., y Wang, G.-L. 2020. Exploiting broad-spectrum disease resistance in crops: from molecular dissection to breeding. *Annu. Rev. Plant Biol.* 71: 575-6031.
- Lu, Y., y Tsuda, K. 2021. Intimate association of PRR- and NLR-mediated signaling in plant immunity. *Mol. Plant Microb. Interact.* 34: 3-14.
- López, M.M., y Biosca, E. G. 2005. Potato bacterial wilt management: new prospects for an old problem. Págs. 205-224, en: C. Allen, P. Prior, y A. C. Hayward, eds. *Bacterial Wilt Disease and the *Ralstonia solanacearum* Species Complex*. APS. St. Paul, MN.
- Masip, M., Sabalza, E., Pérez-Massot, R.B., Cebrían, D., Twyman, R.M., Capell, T., Albajes, R., y Christou, P. 2013. Paradoxical EU agricultural policies on genetically engineered crops. *Trends Plant Sci.* 18: 312-324.
- McDonald, B.A. 2014. Using dynamic diversity to achieve durable disease resistance in agricultural ecosystems. *Tropical Plant Pathol.* 39: 191-196.
- McDonald, B.A., y Linde, C. 2002. Pathogen population genetics, evolutionary potential and durable resistance. *Ann. Rev. Phytopathol.* 40: 349-379.
- McDonald, B.A., y Stukenbrock, E.H. 2016. Rapid emergence of pathogens in agro-ecosystems: global threats to agricultural sustainability and food security. *Phil. Trans. R. Soc. B* 371: 20160026. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2016.0026>.
- Michelmore, R.W., Christopoulou, M., y Caldwell, K. 2013. Impacts of resistance gene, function, and evolution on a durable future. *Annu. Rev. Phytopathol.* 51: 291-319.
- Mundt, C. 2018. Pyramiding for resistance durability: theory and practice. *Phytopathology* 108: 792-802.
- Navas-Cortés, J.A., Hau, B., y Jiménez-Díaz, R.M. 1998. Effect of sowing date, host cultivar, and race of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* on development of Fusarium wilt of chickpea. *Phytopathology* 88: 1338-1346.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2016. *Genetically Engineered Crops: Experiences and Prospects*. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/23395.
- Nicolia, A., Manzo, A., Veronesi, F., y Rosellini, D. 2014. An overview of the last 10 years of genetically engineered crops safety research. *Crit. Rev. Biotechnol.* 34:77-88. doi: 10.3109/07388551.2013.823595.
- Painter, R.H. 1951. *Insect Resistance in Crop Plants*. MacMillan. New York, NY, USA.
- Pallás, V. 2022. La inversión en sanidad vegetal es esencial para la agricultura sostenible, la seguridad alimentaria y la protección del medio ambiente. *Noticias de Actualidad. Phytoma Newsletter*, 4 de marzo. <https://www.phytoma.com/noticias/noticias-de-actualidad/>.
- Panstruga, R., y Moscou, M.J. 2020. What is the molecular basis of nonhost resistance? *Mol. Plant Microb. Interact.* 33: 1253-1264.
- Parlevliet, J.E. 1979. Components of resistance that reduce the rate of epidemic development. *Annu. Rev. Phytopathol.* 17: 203-222.
- Pérez de Castro, A.M., y Díez Niclós, M.J. 2019. Mejora vegetal relacionada con la Sanidad Vegetal. Págs. 221-261, en: R.M. Jiménez Díaz y M.M. López González, eds. *Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España*. UCOPress, Editorial Universidad de Córdoba. Córdoba.

- Pixley, K.V., Falck-Zepeda, J.B., Giller, K.E., Glenna, L.L., Gould, Mallory-Smith, C.A., Stelly, D.M., y Stewart Jr., C.N. 2019. Genome editing, gene drives, and synthetic biology: Will they contribute to disease-resistant crops, and who will benefit? *Annu. Rev. Phytopathol.* 57: 165-188.
- Poland, J.A., Balint-Kurti, P.J., Wisser, R.J., Pratt, R.C., y Nelson, R.J. 2009. Shades of gray: The world of quantitative disease resistance. *Trends Plant Sci.* 14: 21-29.
- Rimbaud, L., Papaix, J., Barrett, L.G., Burdon, J.J., y Thrall, P.H. 2018. *Evol. Appl.* 11: 1791-1810.
- Sarris, P.F., Cevik, V., Dagdas, G., Jones, J.D.G., y Krasileva, K.V. 2016. Comparative analysis of plant immune receptor architectures uncovers host proteins likely targeted by pathogens. *BMC Biol.* 14: 8. doi: 10.1186/s12915-016-0228-7.
- Schellenberger, R., Touchard, M., Clément, C., Baillieul, F., Cordelier, S., Crouzet, J., y Dorey, S. 2019. Apoplastic invasion patterns triggering plant immunity: plasma membrane sensing at the frontline. *Mol. Plant Pathol.* doi: 10.1111/mpp.12857.
- Schenke, D., y Cai, D. 2020. Applications of CRISPR/Cas to improve crop disease resistance: beyond inactivation of susceptibility factors. *iScience* 23: 1-11.
- Silva, D. B., Jimenez, A., Urbaneja, A., Pérez-Hedo, M., y Bento, J.M.S. 2021. Changes in plant responses induced by an arthropod influence the colonization behavior of a subsequent herbivore. *Pest Manag. Sci.* 77: 4168-4180. DOI 10.1002/ps.6454.
- Singh, R.P., Hodson, D.P., Huerta-Espino, J., Jin, Y., Bhavani, S., Njau, P., Herrera-Foessel, S., Singh, P.K., Singh, S., y Govindan, V. 2011. The emergence of Ug99 races of the stem rust fungus is a threat to world wheat production. *Annu. Rev. Phytopathol.* 49: 465-481.
- St. Clair, D.A. 2010. Quantitative disease resistance and quantitative resistance Loci in breeding. *Annu Rev Phytopathol.* 48: 247-68.
- Stout, M.J. 2013. Reevaluating the conceptual framework for applied research on host-plant resistance. *Insect Sci.* 20: 263-272, DOI 10.1111/1744-7917.12011.
- Tang, J., Gu, X., Liu, J., y He, Z. 2021. Roles of small RNAs in crop disease resistance. *Stress Biol.* 1:6. <https://doi.org/10.1007/s44154-021-00005-2>
- Thomma, B.P.H.J. y Cook, D.E. 2018. Targeting microbial pathogens. *Science* 360: 1070-1071.
- Trapero-Casas, C., Serrano, N., Arquero, O., Del Río, C., Trape-ro, A., y López-Escudero, F.J. 2013. Field resistance to Verticillium wilt in selected olive cultivars grown in two naturally infested soils. *Plant Dis.* 97:668-674.
- van der Hoorn, R.A.L., y Kamoun, S. 2008. From guard to decoy: a new model for perception of plant pathogen effectors. *The Plant Cell* 20: 2009-2017.
- Walters, D.R. 2011. *Plant Defense. Warding off Attack by Pathogens, Herbivores, and Parasitic Plants.* Blackwell Publishing, Oxford, U.K. 236 pp.
- Weinblum, N., Can'ani, A., Yaakov, B., Sadeh, A., Avraham, L., Optavosky, I., y Tzin, V. 2021. Tomato cultivars resistant or susceptible to spider mites differ in their biosynthesis and metabolic profile of the monoterpenoid pathway. *Front. Plant Sci.* 2021 Feb 26;12:630155.
- Zhu, H., Li, C., y Gao, C. 2020. Applications of CRISPR-Cas in agriculture and plant biotechnology. *Nat. Rev.* 21: 661 677.

C4. Capítulo C4. Control biológico de plagas, enfermedades y malas hierbas

C4.1. Relaciones tróficas en ecosistemas agrícolas y forestales que son utilizadas por el control biológico

Tanto los ecosistemas agrícolas como los forestales mantienen una red de relaciones tróficas que son propias de cualquier ecosistema, aunque generalmente estas son menos abundantes que en los ecosistemas más naturales, por efecto de la drástica reducción del número de productores. Las densidades de población de las especies que comprenden el ecosistema y la incidencia de enfermedades, plagas, e infestaciones de malas hierbas en ellos son el resultado de dichas relaciones, así como de la influencia sobre ellas de las condiciones abióticas concurrentes. En consecuencia, **el conocimiento de esas relaciones bióticas y de las condiciones abióticas permite manejar los agroecosistemas con la finalidad de limitar la repercusión negativa de las plagas, enfermedades y malas hierbas, siempre que ello no sea incompatible con los objetivos de la agricultura y la silvicultura.** El estudio de las referidas relaciones y condiciones no se debe circunscribir al mero entorno de la planta cultivada o masa forestal; por el contrario, debe comprender marcos más globales, **como el paisaje con sus distintos componentes, incluidos los hábitats no agrícolas o los forestales.**

Entre las relaciones tróficas que determinan las densidades de población de los componentes de un agroecosistema se encuentran las que desembocan en perjuicio para una de las especies de la relación, mientras que la otra puede resultar beneficiada o no experimentar efecto alguno. Cuando la especie perjudicada directa o indirectamente es un fitófago causante de plaga, un agente fitopatógeno causante de enfermedad, o una mala hierba, **la relación puede ser aprovechada para el control biológico de la plaga, enfermedad o mala hierba.** Mientras que en el control biológico de plagas la relación más utilizada es la depredación (en ocasiones llamada relación +,- por los ecólogos tróficos), que incluye depredadores *sensu stricto*, parasitoides y organismos entomopatógenos (Heimpel y Mills, 2017), en el control biológico de enfermedades operan un amplio y complejo abanico de interacciones entre microorganismos. Estas relaciones incluyen la antibiosis, la competición por nutrientes y por la utilización u ocupación de sustratos en los que el patógeno sobrevive o zonas del huésped por las que ha de invadirlo, la degradación de compuestos que intervienen en la patogénesis, y el hiper-parasitismo, entre otros, que en ocasiones son producidos y actúan de forma conjunta potenciando la efectividad de control (Garita-Cambronero et al., 2018; O'Brien, 2017; Pal et al., 2006).

C4.2. Presente y futuro del control biológico de plagas

C4.2.1. De la inoculación a la conservación de enemigos naturales

La idea de introducir o aprovechar la actividad depredadora, parasitaria o patogénica de los enemigos naturales de los artrópodos herbívoros que son plaga se remonta a los inicios de la propia agricultura o silvicultura, tal como han señalado tradicionalmente los manuales de control biológico. En épocas más recientes, con el aumento del número de plagas exóticas en la agricultura mundial (cf., Capítulo B1.), el control biológico ha sido objeto de atención creciente por la I+D+TT en Sanidad Vegetal, en particular el llamado **control biológico clásico** en el que se importan **enemigos naturales exóticos para plagas exóticas.**

En la cuenca mediterránea, y en particular en España, la I+D en control biológico clásico puso el foco principal del control biológico en dos grupos de cultivos, los cultivos hortícolas protegidos y los cítricos, que han sido los receptores de un gran número de plagas exóticas e invasoras. En los cultivos protegidos, se han utilizado varias especies exóticas de depredadores y parasitoides desde los años 80 del siglo XX, con éxito notable en el control de las sucesivas plagas exóticas que han ido apareciendo (van Lenteren et al., 2020). Si bien el control biológico clásico mediante cría y suelta periódica de enemigos naturales ha sido el método que inicialmente más se utilizó, tomando en buena parte el ejemplo del manejo de plagas en invernaderos ingleses y holandeses, poco a poco ha ido tomando auge la aplicación del control biológico de conservación en el cual se conserva y potencia la actividad de especies de enemigos naturales autóctonos, en particular de depredadores. Ello ha sido posible gracias al estudio de: (i) la potencialidad del entorno circundante de los invernaderos como fuente de enemigos naturales; (ii) la identificación de especies vegetales que actúan como refugio o como donantes de los mismos; (iii) la corrección de prácticas culturales para permitir la colonización temprana de los invernaderos; y en caso necesario (iv) la inoculación precoz de plantas en el semillero con el enemigo natural autóctono. Esa aproximación, sin embargo, no ha sustituido por completo la estrategia de suelta de enemigos naturales exóticos o la aplicación de preparados de agentes entomopatógenos para el control de lepidópteros. En los cítricos se han ido sucediendo invasiones por parte de una diversidad de insectos y ácaros exóticos que han obligado a la importación y suelta de enemigos naturales también exóticos (García-Marí, 2012); valga citar el ejemplo de la mosca blanca algodonosa de los cítricos que hoy en día es una plaga irrelevante en España por el éxito de la suelta y establecimiento del parasitoide *Cales noacki* hace unos 50 años, o la suelta del depredador *Cryptolaemus montrouzieri* para la plaga del cotonet cuya presencia y actividad debe revalidarse periódicamente con la suelta repetida desde un centro de cría del mismo. Otras plagas de cítricos se están controlando también con técnicas de control biológico clásico y de conservación.

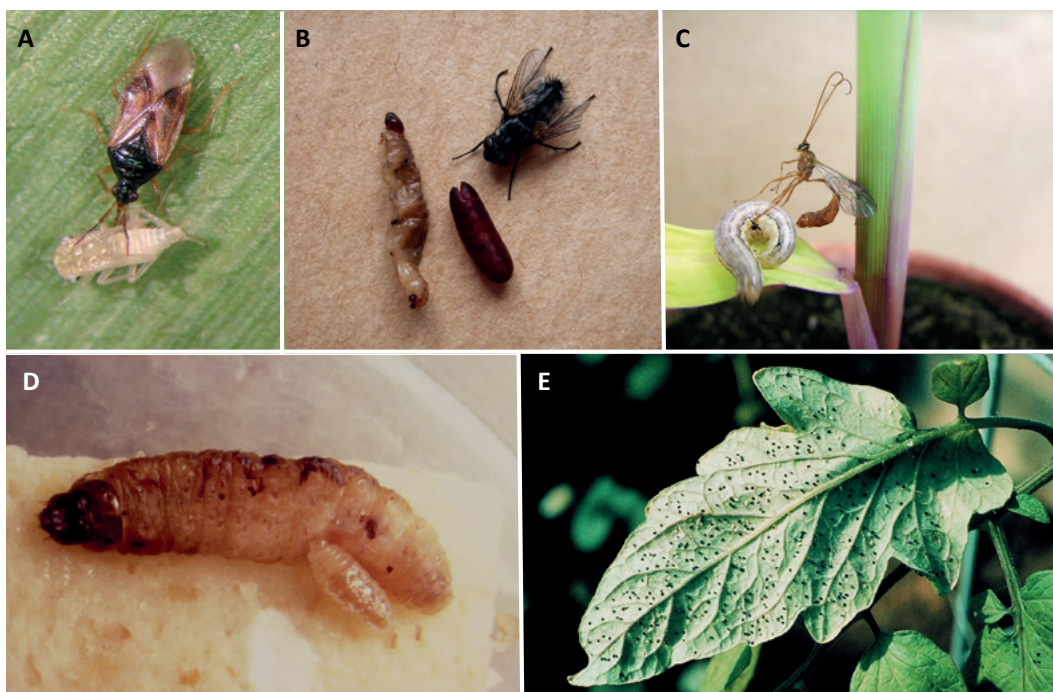


Foto 1. Ejemplos de agentes de control biológico de plagas. **A.** Depredador del género *Orius* clavando el pico en una ninfa de homóptero; **B.** Mosca adulta y su pupario vacío de *Lydella thompsoni*, parasitoide del taladro del maíz, *Sesamia nonagrioides*, cuya larva parasitada ya vacía se ve a la izquierda; **C.** Adulto de himenóptero parasitoide con la larva de uno de sus huéspedes habituales, la plaga *Agrotis segetum*; **D.** Larva de un exoparasitoide que se está alimentando de una larva de *Laspeyresia pomonella*, plaga habitual de manzano; **E.** Envés de una hoja de tomate con numerosas ninfas de mosca blanca (de color negro) parasitadas por *Encarsia formosa*. Cortesía de M. Eizaguirre y R. Albajes.

C4.2.2. El control biológico de plagas en programas de gestión integrada

El éxito del control biológico de plagas en varios cultivos, pero también la insuficiencia de su eficacia como único método de control, ha creado la necesidad de hacerlo compatible con otros métodos de control para poder integrarlo en programas de gestión integrada (Foto 1) (GIP). Para ello, es impres-

cindible comprender cómo funciona la relación bi-trófica presa- depredador (o huésped-parasitoide o huésped- entomopatógeno) y cómo está influida por otros componentes de la red trófica del agroecosistema, incluidos los factores bióticos y del entorno. Ser consciente de la necesidad de comprender esa complejidad para insertar el control biológico en sistemas GIP de manera práctica, fiable y predecible es relativamente reciente. En un principio se trató de hacer compatible el control biológico con el uso de productos fitosanitarios (PP. FF.) en una doble dirección más simple: por un lado, se procuró conocer los efectos secundarios de los PP. FF. sobre los enemigos naturales e incluso se pretendió obtener razas de estos que fueran resistentes a los PP. FF. y, por otro, se procuró no hacer sueltas de enemigos naturales en coincidencia con la aplicación de PP. FF. Con el tiempo, el enfoque de cómo hacer compatible el control biológico con el control químico se ha invertido de forma creciente de manera que los PP. FF. que se autorizan son aquellos que representan un riesgo menor para los enemigos naturales: en las estrategias de tratamiento se evita la aplicación de dichos productos en los estados del cultivo en los que potencialmente pueden perjudicar a los enemigos naturales de las plagas principales. El respeto o incluso la potenciación de los enemigos naturales ya instalados en los ecosistemas agrícolas y forestales se está convirtiendo cada vez más en el objetivo del control biológico y es el llamado control biológico de conservación.

C4.2.3. Los múltiples componentes del control biológico de conservación

Aunque el estudio ecológico de los ecosistemas agrícolas y forestales contaba desde hace tiempo con un progreso notable que permitía fundamentar sólidamente el control biológico de conservación, los inicios prácticos de este método fueron relativamente simplistas, propugnando como estrategias principales: (i) la diversificación vegetal; (ii) la reducción de la intensidad de cultivo; y (iii) el aumento de la biodiversidad del entorno agrícola y forestal. Con el tiempo, sin embargo, el control biológico de conservación se ha ido enriqueciendo gracias al mejor conocimiento de la complejidad de los procesos ecológicos y de comportamiento que operan en los agroecosistemas (Begg et al., 2017). Aunque el manejo del hábitat siga siendo la técnica más preconizada y utilizada, cada vez se comprende y reconoce más la importancia de otras perspectivas, como: (i) la ecología nutricional y química; (ii) la genética molecular; (iii) la capacidad de dispersión de los enemigos naturales y la conectividad de los hábitats; (iv) el marco paisajístico y las interacciones con él de las relaciones que se dan a escalas menores; y (v) los diversos aspectos económicos y sociales. Esa misma conciencia de la complejidad del sistema y su manipulación es en sí misma un progreso considerable para evitar preconizar y aplicar soluciones demasiado simplistas, así como para reforzar el concepto de que la aplicación de la estrategia de control biológico de conservación requiere formación técnica especializada. A ese respecto, a aquellos que quieren huir de dogmatismos se recomienda el artículo de Karp et al., (2018), en el que un meta-análisis de cientos de estudios permite poner en duda la validez de algunas afirmaciones asentadas como dogma en el control biológico de conservación, según las cuales determinados entornos que circundan los cultivos favorecen de por sí la eficiencia de los enemigos naturales de las plagas. Esto hace pensar que, en ocasiones, determinadas disciplinas pretendidas como científicas, como la Agroecología, están más cerca de un credo de opinión no exento de buenos deseos, que de la ciencia.

C4.2.4. El uso de organismos entomopatógenos en el control microbiano de plagas

Buena parte de lo dicho para el control biológico de plagas mediante depredadores y parasitoides en apartados anteriores es válida también para el uso del tercer grupo de enemigos naturales, los entomopatógenos (Lacey, 2017). Cuatro grupos de microorganismos entomopatógenos se utilizan hoy en día con relativa frecuencia en programas de control inoculativo, de conservación o aumentativo: virus, hongos, bacterias y nematodos. Tanto los virus como las bacterias penetran en el insecto huésped por

ingestión, mientras que los hongos lo hacen a través del tegumento, y los nematodos – en asociación mutualista con bacterias que son las determinantes de su acción entomopatógena- a través de los estigmas o membranas inter-segmentales.

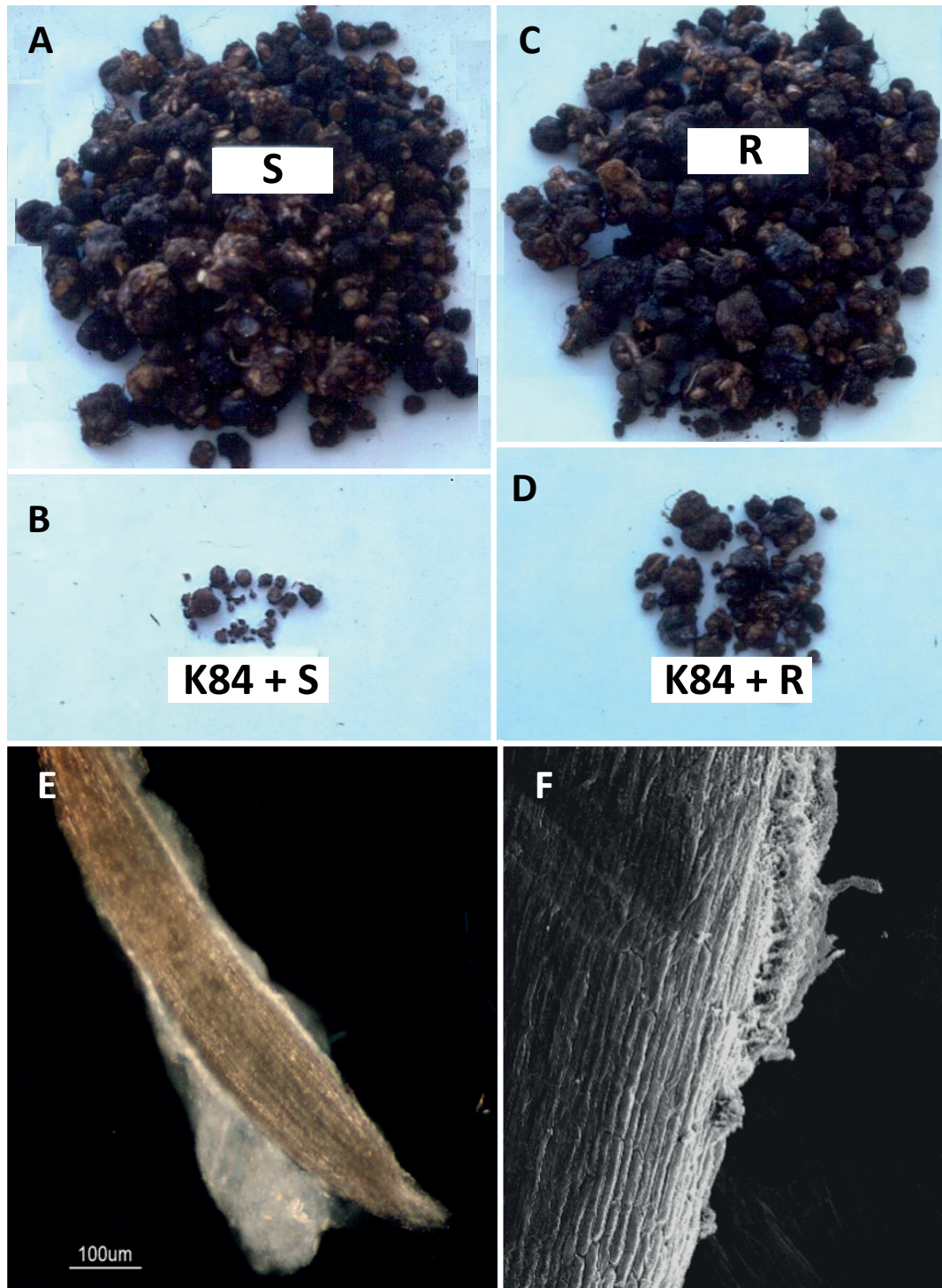
Los cuatro grupos de microorganismos mencionados son capaces de causar epizootias en los insectos fitófagos y, si se conocen bien los factores que las gobiernan incluidas las prácticas culturales, pueden ser aprovechados en programas de control microbiano de conservación, aunque suelen ser en buena medida de eficacia impredecible. Sin embargo, los microorganismos entomopatógenos se usan en su mayor parte en programas inundativos por la aplicación de dosis elevadas del agente microbiano en zonas amplias del cultivo o masa forestal. En este caso, la aplicación se hace mayoritariamente con formulados preparados para la pulverización y se espera un efecto rápido sobre la densidad de población de la plaga. Más del 50 % de los preparados a base de entomopatógenos son de diversas subespecies y cepas de la bacteria *Bacillus thuringiensis* (Bt) y se utilizan para el control de cientos de especies de insectos fitófagos, mayoritariamente lepidópteros; esta bacteria también es el origen de las toxinas que producen algunos de los cultivares de especies vegetales genéticamente modificados, por ejemplo, el llamado maíz Bt autorizado en España y Portugal, aunque no en la mayoría de los países miembros de la UE. Este tipo de control microbiano inundativo está creciendo rápidamente en los últimos años, de forma que los productos basados en el mismo ya sobrepasan el 5 % del uso de los PP. FF. en el mundo (cf., Capítulo B3., Fig. 4). Este uso creciente se justifica por las ventajas del control microbiano con respecto al uso de los PP. FF. de síntesis, tales como su eficacia, especificidad y seguridad, y la progresiva mitigación de sus desventajas, principalmente su alto coste, y en ocasiones su excesiva especificidad y falta de persistencia (véase el capítulo B3 de PP. FF. y en él la parte dedicada a los bioplaguicidas).

Las aportaciones de la biología molecular al estudio de las relaciones entre insectos fitófagos, sus enemigos naturales y sus plantas huésped está aportando mucha luz para el desarrollo de nuevos bioplaguicidas en un doble sentido: bien identificando y explotando nuevas moléculas activas, bien descubriendo nuevas dianas de esas moléculas para el silenciamiento génico que ejercen algunos bioplaguicidas basados en el ARN de doble cadena y que actualmente están en desarrollo (Gatehouse y Pennacchio, 2022). Téngase en cuenta, sin embargo, que el empleo de los mecanismos implicados en la relación tritrófica mencionada con fines de control biológico o para el uso de la resistencia vegetal en programas de GIP es un arma de doble filo. Los mecanismos que nos interesa favorecer para disminuir las densidades de plagas de determinadas especies de artrópodos fitófagos, pueden alterar desfavorablemente otros componentes de esa relación tritrófica para perjudicar los enemigos naturales o la planta cultivada (Pappas et al., 2017).

C4.3. Presente y futuro del control biológico de enfermedades

La estrategia de controlar las plagas de fitófagos por medios biológicos promovida por los entomólogos agrícolas a mediados del siglo XX, estimuló prontamente el interés en el ámbito académico fitopatológico sobre un abordaje similar para el control de las enfermedades de las plantas, que se asentó con la publicación del primer libro dedicado exclusivamente a dicha estrategia de control de enfermedades en 1974 (Baker y Cook, 1974). Desde entonces, tanto dicho interés como la aplicación práctica de los avances derivados de la investigación han crecido espectacularmente, a medida que se ha intensificado la preocupación social por la salubridad alimentaria y la preservación del medio ambiente y ha disminuido la disponibilidad comercial de PP. FF. -especialmente en la Unión Europea (UE)- por la legislación derivada de dicha preocupación. No obstante, es generalizada la sensación de que la aplicación práctica del control biológico de enfermedades de las plantas no ha alcanzado todavía la extensión que sería de desear, acorde con las motivaciones que impulsan su interés académico.

Foto 1. Control biológico de los tumores del cuello y raíces de patrones de frutales causados por *Rhizobium* y *Agrobacterium* spp., mediante el tratamiento con turba inoculada con la cepa K84 de la bacteria no patógena *A. radiobacter* (actualmente *Rhizobium rhizogenes*) antes de la plantación; **A.** Tumores formados en plantas no tratadas y cultivadas durante 1 año en suelo infestado con una cepa de *A. tumefaciens* sensible al antibiótico agrocin 84 producido por la cepa K84; **B.** Tumores formados en las plantas cultivadas en el mismo suelo, pero tratadas con dicha cepa inmediatamente antes de ser plantadas; **C.** Tumores formados en las plantas no tratadas y cultivadas en el mismo suelo pero infestado con una cepa de *A. tumefaciens* resistente a agrocin 84; **D.** Tumores formados en las plantas cultivadas en dicho suelo, pero tratadas con la cepa K84 inmediatamente antes de ser plantadas; **E.** Biopelículas formadas por *R. rhizogenes* K84 formadas en la raíz de las plantas 48 h después del tratamiento con dicha bacteria, observadas con microscopía óptica (E) y de barrido (F).



La investigación y aplicación práctica del control biológico de enfermedades han sido impulsadas por la demostración de que ocurre de forma natural, de lo cual son ejemplos: (i) la supresión natural de la podredumbre de raíz del aguacate causada por *Phytophthora cinnamomi* en el sureste de Australia, asociada con la promoción de la actividad microbiana por frecuentes estercolados y enmiendas vegetales que mantenían un 12 % de materia orgánica en el suelo; (ii) el control de los tumores de cuello y raíces de cultivos frutales en Australia, propiciado por la cepa K84 de la bacteria nativa no patógena *Agrobacterium radiobacter*, (ahora *Rhizobium rhizogenes*), que coexistía con poblaciones del patógeno

(*Agrobacterium* y *Rhizobium* spp.) sensibles al antibiótico específico agrocina 84 secretado por la cepa K84; (iii) el control del chancro del castaño en Francia e Italia propiciado por cepas del hongo patógeno *Cryphonectria parasitica* (sinónimo *Endothia parasitica*) infectadas por un virus que les confiere hipovirulencia (esto es, causantes de chancros de escasa gravedad); y especialmente (iv) los suelos que poseen capacidad natural de reducir el desarrollo de enfermedades, que se tratan más adelante.

Aunque el desarrollo del control biológico de enfermedades está relacionado con el de plagas de fitófagos y guarda ciertas similitudes con este, **entre ambas estrategias existen diferencias conceptuales y de efectividad merecedoras de atención.** Así, en el caso de las plagas, ha sido frecuente la importación de enemigos naturales exóticos de una plaga para su control biológico clásico mediante la introducción de ellos en el ámbito geográfico donde ocurre; mientras que, en términos generales, este procedimiento ha sido utilizado comparativamente en menor extensión en el control biológico de enfermedades, salvo en el caso de la citada cepa K84 que se ha usado con éxito (Foto 2) en más de cuarenta países. Dicha estrategia sí se ha empleado para el control de insectos vectores de enfermedades de plantas como el *huan-glongbing* o *greening* de los cítricos, y en muchos productos microbianos comercializados en los que se encuentran organismos de origen exótico. Por el contrario, el control biológico de enfermedades se ha venido basando fundamentalmente en: (i) **la introducción masiva de microorganismos** que forman parte del agroecosistema donde ocurren las enfermedades, que son perjudiciales (**antagonistas**) para los patógenos que las causan; y (ii) **la manipulación del agroecosistema para estimular el crecimiento y/o las actividades de los antagonistas residentes** en este. Estos métodos de aplicación del control biológico de enfermedades se corresponden, respectivamente, con los denominados inundativo y de conservación por los entomólogos agrícolas.

Aunque la idea de control biológico puede ser simple, su conceptualización y definición pueden variar según conciernen a plagas o enfermedades. Así, mientras el control de las plagas se produce por la acción directa de depredadores, parasitoides y entomopatógenos sobre los fitófagos a fin de mantener la población de estos por debajo de niveles que originan perjuicio a los cultivos, **el control de enfermedades resulta no solamente de la reducción de la población del patógeno sino también de su capacidad de causar enfermedad.** Los mecanismos que operan para ello tienen lugar en la planta huésped del patógeno o directamente sobre este en el medio donde reside. Estos escenarios y formas de acción **confieren gran complejidad al control biológico de enfermedades**, que se acentúa por la característica de estas como proceso dinámico en el tiempo, y por la influencia que tienen en dicho proceso los niveles de virulencia del patógeno y de susceptibilidad de la planta, así como los agentes bióticos y factores abióticos del medioambiente en el que tiene lugar.

Un aspecto adicional que suma a la mencionada complejidad concierne a la **diversidad de tipos de enfermedades de los cultivos**, que incluyen a las que afectan únicamente a las partes subterráneas de las plantas y son causadas por patógenos que tienen el suelo como nicho (patógenos de suelo), así como a las que afectan de forma localizada al follaje, frutos y semillas de la copa, o son consecuencia de la infección sistémica del tejido vascular de la planta. Hasta las últimas décadas, **la investigación y aplicación práctica del control biológico de enfermedades se han centrado preferentemente en las causadas por patógenos de suelo**, comparado con las realizadas sobre enfermedades de la parte aérea de la planta. Tal priorización se ha debido a que: (i) el control químico de los patógenos de suelo se ha venido realizando mediante compuestos volátiles de amplio espectro de acción contra la microflora edáfica, que generan contaminación del aire y de aguas subterráneas (ej., bromuro de metilo); y (ii) la estabilidad del ambiente subterráneo facilita la efectividad, estabilidad y evaluación de control biológico, comparada con la dificultad para ello que confieren la variabilidad del ambiente en la parte aérea de la planta y el rápido crecimiento de la copa de esta.

C4.3.1. Supresión natural de enfermedades en suelos cultivados.

La investigación durante las últimas décadas del pasado siglo ha documentado convincentemente que: (i) las enfermedades causadas por patógenos residentes en determinados suelos cultivados se desarrollan con escasa gravedad aunque exista inóculo abundante y virulento del patógeno, la planta sea susceptible a este, y las condiciones ambientales sean favorables para el desarrollo de la patogénesis; y (ii) este fenómeno es mediado por la composición y actividad de la microbiota nativa (Schlatter et al., 2017). Estos suelos, denominados suelos supresores de enfermedades: (i) tienen una amplia distribución geográfica; (ii) operan contra una gran diversidad de agentes fitopatógenos, incluyendo bacterias, hongos, nematodos y oomicetos; y (iii) constituyen posiblemente el mejor ejemplo de protección natural microbiana contra enfermedades, mediante la cual grandes cantidades de materiales orgánicos (rizodepositos) -incluyendo células, exudados, secreciones, etc. del sistema radical- estimulan la proliferación y actividad de poblaciones microbianas en torno a las raíces como primera línea de defensa contra los patógenos de suelo capaces de invadirlas (Weller et al., 2002).

La supresión de enfermedad en los referidos suelos puede ser de tipo general o de tipo específico, pero los dos existen superpuestos en un suelo supresor de manera que su capacidad como tal ("supresividad") resulta de la combinación de ambos. La "supresividad" general es la capacidad de limitar el crecimiento y efectividad de los patógenos por la actividad antagonista del microbioma total del suelo -definido como la microbiota del suelo rizosférico y no rizosférico, que comprende no solo los genomas microbianos sino también sus transcritos, metabolitos y proteínas- (Cook, 2014; Schlatter et al., 2017). Este tipo de "supresividad" es una característica no transferible pre-existente en un suelo y efectiva contra un amplio espectro de patógenos de suelo, que se ha asociado con el consumo microbiano de los rizodepositos indispensables para las actividades de los patógenos en la rizosfera. De esta manera, la efectividad de supresión general es tanto mayor cuanto más rápido es el consumo de nutrientes por la actividad microbiana.

A diferencia de la anterior, la "supresividad" específica superpuesta sobre la general es conferida por poblaciones específicas de uno varios microorganismos antagonistas contra el patógeno, que son estimuladas y mantenidas selectivamente en la rizosfera de las plantas en el curso del tiempo en respuesta al manejo del cultivo, en lo que parece constituir una estrategia de defensa desarrollada por los microorganismos antagonistas contra los patógenos residentes en el suelo (Cook et al., 1995). La "supresividad" específica es efectiva contra bacterias, hongos, nematodos, oomicetos y fanerógamas parásitas en un amplio marco geográfico, y tiene como característica clave respecto de la "supresividad" general el poder ser transferida a un suelo en el que no exista, mediante la adición de una pequeña cantidad de suelo supresor (1 % en volumen). Que la cantidad de microorganismos antagonistas contenidos en este 1 % pueda convertir en supresor el 99 % de suelo que no lo era previamente, es indicador de su capacidad distintiva de multiplicarse extensa y rápidamente en las condiciones que promueven la "supresividad" específica y con ello dominar el consorcio de microorganismos existentes en el suelo no supresor tras alcanzar una densidad de población umbral (Weller et al., 2007).

C4.3.1.1. Tipos de supresión específica de enfermedades en suelos cultivados

La "supresividad" específica es efectiva contra enfermedades concretas y puede: (i) ser pre-existente y duradera en un suelo, i.e., estar asociada a un suelo de forma natural, tener origen no conocido y persistir en ausencia de cultivos; o (ii) ser inducida, i.e., ser iniciada y mantenida por un monocultivo o por el cultivo de determinados cultivares de especies susceptibles a una enfermedad, desaparecer una vez establecida cuando se cultivan plantas no-huésped del agente causal de aquella o se desarrolla otra enfermedad del sistema radical, y resurgir con rapidez cuando se reintroduce el huésped original y se desarrolla el patógeno inductor (Schlatter et al., 2017). La inducción de "supresividad" específica

es compleja desde un punto de vista mecánico, porque requiere interacciones multilaterales entre el patógeno, la planta y el microbioma del suelo. De hecho, la interacción inicial entre patógeno y planta que da lugar a enfermedad severa, puede originar la secreción de metabolitos por el patógeno y por la planta que favorezcan la proliferación y actividad de los microorganismos antagonistas supresores (Raaijmakers y Mazzola, 2016).

Uno de los mejores y más estudiados ejemplos de "supresividad" natural pre-existente y duradera es la que opera en ciertos suelos de la región de Chateaubriant en Francia contra las fusariosis vasculares causadas por las *formae speciales* (ff. spp.) del "complejo de especies" *Fusarium oxysporum*. En dichos suelos, la "supresividad" está asociada con la inhibición de la germinación de las clamidosporas y del crecimiento del micelio de los patógenos, que se ha atribuido principalmente a las elevadas poblaciones de estirpes no-patogénicas de *F. oxysporum* ($\geq 10^5$ propágulos $\times g^{-1}$ de suelo) y a la competición por el carbono (C) y los *loci* de infección que ejercen sobre las estirpes patogénicas (Alabouvette et al., 2009).

Similarmente, uno de los casos de "supresividad" específica inducible más extensamente estudiados concierne la supresión del mal del pie del trigo y la cebada causado por *Gaeumannomyces graminis var. tritici* -referido como Take all decline en la bibliografía inglesa-, que se describe como: **disminución espontánea de la incidencia y gravedad de la enfermedad que tiene lugar tras 5-6 años de monocultivo de cultivares de cebada o trigo susceptibles y el desarrollo de una o más epidemias severas de mal del pie, cuyo efecto es anulado por la interrupción del monocultivo con una planta no huésped del patógeno. La disminución del mal del pie está asociada con el incremento de la población de especies de *Pseudomonas* fluorescentes en el suelo rizosférico y no-rizosférico, hasta alcanzar un umbral de 10⁵ bacterias $\times g^{-1}$ de raíz, y la producción por ellas de compuestos antimicrobianos que inhiben las fases parasítica y saprófita del patógeno sobre el rizoplaneo y en los restos de cultivos afectados, respectivamente (Weller et al., 2002).**

C4.3.2. Agentes y mecanismos del control biológico de enfermedades

En la supresión de enfermedades causadas por patógenos de suelo son efectivas un limitado número de: (i) bacterias ocupantes del nicho rizosférico (rizobacterias) de los géneros *Agrobacterium*, *Rhizobium*, *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Pseudomonas*, y *Streptomyces* y otros; (ii) estirpes no-patogénicas de *Fusarium oxysporum* y de especies fúngicas de los géneros *Penicillium*, *Talaromyces* y *Trichoderma*; e (iii) oomicetos del género *Pythium* (Alabouvette et al., 2009; Lorito et al., 2010; Weller et al., 2002). Además, en el control biológico de otras enfermedades están implicados tipos adicionales de antagonistas, incluyendo algunas bacterias, virus, y hongos, que se refieren a continuación (Köhl et al., 2019).

Como se ha indicado anteriormente, la acción supresora de enfermedades fue atribuida inicialmente a un mecanismo principal de antagonismo que se expresa directamente contra el patógeno en el nicho donde reside, incluyendo: (i) la secreción de variados compuestos antibióticos, generalmente con amplio espectro de actividad; y (ii) la competición por nutrientes y por *loci* de infección. Sin embargo, las interacciones en el sistema tri-trófico 'planta-patógeno-agente de control biológico' se han revelado más complejas e incluyen también: (iii) el hiper-parasitismo; y (iv) la expresión de mecanismos defensivos (resistencia) innatos o inducidos por el agente de control biológico en la planta. Además, algunos hongos y muchas rizobacterias de control biológico (referidas estas últimas por el acrónimo PGPR de *plant growth promoting rhizobacteria*) estimulan el crecimiento de la planta mediante la secreción de compuestos análogos de las fitohormonas reguladoras del crecimiento -así como de determinados compuestos volátiles-, de manera que al efecto de supresión de la enfermedad se une el de incremento de rendimiento de un cultivo en ausencia de aquella. La información sobre los mecanismos de acción de los agentes de control biológico es de interés para optimizar su uso y requerida para el registro de ellos

con fines reguladores y comerciales. Sin embargo, la compleja naturaleza de las interacciones microbianas raramente se ajusta a la categorización pragmática requerida para dichos fines, y la efectividad de un agente dado puede ser mediada por varios mecanismos no siempre claramente separables en términos de eficiencia (Köhl et al., 2019).

La efectividad en el control biológico no es atributo de la especie antagonista sino de cepas determinadas de ella que, en términos generales, despliegan simultánea o secuencialmente varios de los mencionados mecanismos de acción. Por ejemplo, la mayoría de las especies de *Trichoderma* efectivas en el control biológico: (i) son parásitas de hongos fitopatógenos (micoparásitas); (ii) producen compuestos antibióticos del patógeno y proteasas que inhiben a enzimas que este produce; (iii) compiten por nutrientes y/o por *loci* de infección; (vi) invaden limitadamente la raíz de la planta e inducen la expresión de resistencia en esta; y (v) promueven el crecimiento de la planta y de sus raíces. Similarmente, el compuesto 2,4-diacetilfloroglucinol (DAFG) producido por *Pseudomonas* spp. fluorescentes efectivas en la supresión del mal del pie del trigo y la cebada no solo contribuye a inhibir el crecimiento del patógeno (*G. graminis* var. *tritici*), sino también a inducir resistencia contra este en la planta; y la competencia por C y *loci* de infección que median la supresión duradera de las fusariosis vasculares por estirpes no-patogénicas de *F. oxysporum* es complementada por la inducción de resistencia promovida por la colonización del tejido cortical de la raíz (Alabouvette et al., 2009; Köhl et al., 2019; Lorito et al., 2010; O'Brien, 2017).

C4.3.2.1. Antibiosis

Muchas rizobacterias y especies de *Trichoderma* y *Clonostachys* (sinónimo *Gliocladium*) efectivas en el control biológico de enfermedades producen diferentes metabolitos secundarios con amplio espectro de actividad antimicrobiana, mediante distintos mecanismos que se agrupan bajo el nombre de antibiosis y que presumiblemente eliminan la competencia de otras bacterias y hongos del nicho rizosférico. La selección de estos microorganismos para su aplicación práctica se ha venido realizando mediante bioensayos de inhibición de crecimiento *in vitro*, cuyos resultados no son predictores fidedignos de su efectividad en el control en condiciones de campo o invernadero, porque: (i) la cantidad de metabolitos secundarios que se producen en el nicho rizosférico natural es mucho menor que la producida *in vitro*—ya que la producción de dichos metabolitos depende de la composición y concentración de nutrientes en el medio, muy inferiores en la rizosfera y en el suelo frente a los medios artificiales (Köhl et al., 2019); y (ii) la antibiosis demostrada en dichos bioensayos oscurece la detección de otros compuestos que contribuyan al control biológico mediante un mecanismo de acción diferente. De hecho, análisis genómicos recientes indican que en muchos actinomicetos y hongos filamentosos existen numerosas agrupaciones de genes crípticos que codifican la síntesis de antibióticos, sugiriendo la posibilidad de que la mayoría de los antibióticos producidos *in situ* en ambientes naturales es todavía desconocida. Además, los metabolitos que son antibióticos a concentraciones elevadas, cumplen funciones importantes para el microorganismo productor a las concentraciones no-deletéreas que prevalecen en el nicho rizosférico. Estas funciones incluyen: (i) la actuación como moléculas de señalización en las interacciones de la comunidad microbiana; (ii) la regulación de la formación de biopelículas; (iii) la inducción de la expresión de mecanismos defensivos por la planta; y (iv) la interacción sinérgica con otros metabolitos microbianos que potencia el efecto supresor de la enfermedad (Köhl et al., 2019; O'Brien, 2017).

No obstante lo anterior, el papel de algunos antibióticos en el control biológico ha sido elegantemente demostrado en la supresión del mal del pie del trigo y la cebada por *Pseudomonas* spp. fluorescentes que producen los antibióticos DAFG y fenazina, mediante la interrupción -o la intensificación de la expresión- de los genes que codifican su síntesis (Schlatter et al., 2017; Weller, 2002; Weller et al., 2007). Además, dichos estudios han desvelado que: (i) muchos antibióticos son sintetizados solamente cuando las estirpes de rizobacterias antagonistas alcanzan una población umbral que es mediada por el fenómeno de *quorum sensing*; (ii) las poblaciones rizosféricas de dichas rizobacterias pueden albergar una

gran diversidad genotípica ligada a fenotipos clave para la eficiencia del control que propician –ej., la supervivencia, la capacidad de colonización rizosférica, y la interacción con poblaciones naturales de otros microorganismos en la rizosfera-; (iii) algunos genotipos de rizobacterias antagonistas tienen una capacidad especial para colonizar eficientemente la rizosfera de determinadas especies vegetales –comparado con otros genotipos en el microbioma-, de manera que el monocultivo de dichas especies enriquece selectivamente la rizosfera de la planta con la estirpe antagonista más eficiente en el control; y (iv) poblaciones de rizobacterias que difieren en el antibiótico clave para la actividad antagonista pueden variar en su adaptabilidad a condiciones asociadas al manejo del cultivo –por ejemplo regadío vs. secano- (Mavrodi et al., 2012; Weller et al., 2002). Estos conceptos son clave con vistas a la aplicación práctica de agentes de control biológico, ya que: (i) genotipos bacterianos eficientes y con especial afinidad por un cultivo se pueden aplicar a densidades de inóculo muy bajas, sin comprometer el desarrollo y mantenimiento de poblaciones suficientemente elevadas necesarias para asegurar la efectividad en el control de la enfermedad en condiciones de campo; y (ii) el manejo del cultivo puede influir de forma determinante sobre las poblaciones de “rizobacterias” productoras de antibióticos efectivas en la supresión de la enfermedad.

La posibilidad de que los metabolitos antimicrobianos producidos por agentes de control biológico puedan tener efectos negativos sobre los consumidores de productos vegetales o el medioambiente, ha determinado que el registro para autorizar la utilización comercial de dichos agentes sea precedido por una evaluación de riesgo sobre la producción de metabolitos considerados relevantes. La baja concentración con que dichos metabolitos se producen en los micro-nichos con escasa disponibilidad de nutrientes, la limitada vida media de aquellos en el medioambiente, y la producción de metabolitos antimicrobianos por los microorganismos indígenas en dichos nichos, han llevado a considerar que los metabolitos producidos por agentes de uso comercial pueden ser de bajo riesgo toxicológico y ecotoxicológico (Köhl et al., 2019). Sin embargo, los principios de precaución en la salubridad alimentaria y protección medioambiental aconsejan tomar tal consideración con cautela y asegurar la carencia de riesgos mediante bioensayos estandarizados. La European Food Safety Authority (EFSA) evalúa caso por caso los nuevos productos de control biológico que solicitan ser comercializados en la UE y establece limitaciones en cuanto al porcentaje de determinados metabolitos en la formulación comercial.

C4.3.2.2. Competición

Este modo de antagonismo es ejercido por especies de algunos géneros bacterianos (ej., *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp.), hongos filamentosos (ej., estirpes no-patogénicas de *F. oxysporum*, *Trichoderma* spp.) y levaduras (ej., *Pichia* spp., *Sporobolomyces* spp.), y concierne fundamentalmente a patógenos necrotrofos (bacterias, hongos y oomicetos) –esto es, que originan la muerte de células y tejidos del huésped previamente o con posterioridad a su invasión y colonización-. La gran capacidad saprofítica de dichos antagonistas les permite competir ventajosamente con los patógenos necrotrofos y operar en su control biológico mediante: (i) el consumo de nutrientes exógenos que los patógenos necesitan para crecer en el suelo o sobre la superficie del huésped; (ii) la colonización de tejidos necrosados en los que el patógeno desarrolla una fase saprofítica, de manera que se reduce la producción de sus inóculos o se limita que sirvan de base nutritiva desde la que invaden tejidos sanos; y (iii) la ocupación previa por los antagonistas de las zonas de la planta por la que el patógeno ha de llevar a cabo la invasión (esto es, compitiendo por *loci* de infección).

La adecuación de la competición para el control biológico de fitopatógenos necrotrofos se basa en: (i) la dependencia de muchos hongos y oomicetos de nutrientes exógenos (fundamentalmente carbohidratos y aminoácidos) para la germinación de sus esporas, la formación de estructuras de infección y el crecimiento sobre la zona de invasión; y (ii) la necesidad de dichos nutrientes de las bacterias para multiplicarse y alcanzar los niveles de población que les permitan completar la infección en dichas zonas. Esta

dependencia hace a los referidos patógenos particularmente vulnerables al consumo de nutrientes por los antagonistas competidores. Por ello, la aplicación práctica de antagonistas altamente competitivos para el control biológico de enfermedades, requiere **disponer de un buen conocimiento de la ecología de los patógenos y de la epidemiología de las enfermedades**, a fin de identificar las fases en los ciclos de los patógenos en las que la limitación de nutrientes y zonas de infección afectará más negativamente a su desarrollo (Köhl et al., 2019). Ejemplos de ello son: (i) la necesidad de azúcares para la germinación de las clamidosporas de *F. oxysporum* ff. spp. y de aminoácidos para la germinación de los esporangios de *Pythium ultimum* en la rizosfera y espermosfera de sus huéspedes, respectivamente; (ii) la utilización de los nutrientes excretados de las heridas para la infección de frutos o tejidos leñosos; y (iii) el uso de hojas o de tejidos florales senescentes o necróticos desde los que hongos como *Botrytis cinerea* establecen una base nutritiva indispensable para la infección de flores o frutos. La efectividad de la limitación de dichos requisitos en el control biológico requiere que los antagonistas competidores sean capaces de: (i) ocupar eficientemente los nichos referidos; (ii) sobrevivir en ellos; y (iii) consumir con rapidez los nutrientes indispensables para la infección del huésped. Buenos ejemplos de ello conciernen dos estirpes fúngicas comercializadas para el control biológico de enfermedades bien diferentes: (i) *Phlebiopsis gigantea* (sinónimo *Peniophora gigantea*) empleada contra la podredumbre de tronco y raíz de coníferas causada por *Heterobasidion annosum*-; y (ii) la estirpe Fo47 de *F. oxysporum* no-patogénico utilizada contra las fusariosis vasculares. En el primero de los casos, la aplicación de *Ph. gigantea* sobre el tocón del árbol recién cortado propicia la colonización rápida de su superficie por el antagonista utilizando los nutrientes excretados sobre ella, de manera que las esporas del patógeno son virtualmente excluidas de la zona de infección. En el segundo, la gran capacidad saprofítica de la estirpe Fo47 le permite (i) ser consumidor primario de carbohidratos disponibles en el suelo; y (ii) colonizar la superficie radical de las plantas más rápida y extensamente de las estirpes patogénicas de ellas. Ambos efectos contribuyen a reducir la frecuencia de infecciones y al control de las fusariosis vasculares (Alabouvette et al., 2009).

Además de competir por carbohidratos y N, algunos antagonistas también **compiten por micro-elementos a los que los patógenos son sensibles por su escasa disponibilidad en el nicho ecológico**. Por ejemplo, la disponibilidad de hierro en la rizosfera es limitada por la escasa solubilidad de iones hierro (Fe^{3+}), que es la forma predominante de este elemento en suelos bien aireados y oxidados e insoluble en agua a pH 7,4. Ciertas cepas de *Pseudomonas* spp., y *Trichoderma* spp. eficientes en el control biológico **compiten ventajosamente con los patógenos por el Fe^{3+} disponible en la rizosfera o el filoplano de sus huéspedes**, porque retienen dicho ion mediante sideróforos que lo hacen inaccesible por el patógeno. La selección de estirpes microbianas capaces de producir sideróforos en grandes cantidades y alta afinidad por el Fe^{3+} puede ser pues una estrategia válida para el control biológico de patógenos que produzcan menor cantidad de sideróforos con menor afinidad por Fe^{3+} (Köhl et al., 2019; Pal et al., 2006).

C4.3.2.3. Hiper-parasitismo

Este es un mecanismo de acción directo por el que los microorganismos antagonistas obtienen nutrientes de los patógenos, que en su inmensa mayoría son parásitos de plantas –y de ahí el nombre con que se les denomina. Este tipo de interacción se ha **observado fundamentalmente entre hongos y oomicetos antagonistas y patógenos de tejidos aéreos o subterráneos de las plantas (mico-parasitismo)**, y se ha estudiado especialmente en cepas de *Clonostachys* spp. y *Trichoderma* spp., aunque también existen otras especies mico-parásitas de uso comercial (ej., *Ampelomyces quisqualis*, *Conithyrium minitans*, y *Sporidesmium sclerotivorum*), e hiperparásitos que atacan específicamente a nematodos fitopatógenos [ej., la bacteria *Pasteuria penetrans*, y los hongos *Paecilomyces lilacinus*, y *Pochonia chamydosporia* (sinónimo *Verticillium chamydosporium*)] (Köhl et al., 2019; Pal et al., 2006).

Además, durante la última década ha cobrado interés el potencial de virus de hongos (micovirus) que confieren hipo-virulencia al patógeno infectado –derivado del éxito en el control del chancro del casta-

ño en Europa con cepas hipo-virulentas de *C. parasitica* infectadas por un virus-, así como de virus que afectan a bacterias (bacteriófagos) para el control biológico de bacteriosis de los vegetales –auspiciado en este caso por la crítica escasez de otros medios de control de dichas enfermedades- (O'Brien, 2017). Desde el punto de vista de la aplicación práctica en agricultura, los fagos bacterianos tienen las ventajas de: (i) su fácil producción y aplicación mediante pulverización de los cultivos o adición al agua de riego; (ii) su elevada especificidad por la bacteria diana; (iii) su fácil almacenamiento y prolongada vida útil de los formulados y (iv) ser biodegradables en los ambientes naturales. Por ejemplo, se han seleccionado y patentado el uso de fagos específicos de la bacteria *Ralstonia solanacearum*, causante de marchitez en solanáceas y muchos otros cultivos a nivel mundial, que son eficaces para reducir significativamente su población cuando se añaden en el agua de riego y en planta (Álvarez et al., 2019). Por el contrario, la eficiencia de los micovirus puede ser mediada por la necesidad de que se produzca anastomosis entre los micelios de la estirpe hipo-virulenta y la estirpe diana virulenta para que el virus se transmita a esta última –como ocurre con *C. parasitica*-, de manera que el éxito en el control biológico depende de complejas interacciones entre el virus, los hongos vector y diana, la planta, y el ambiente. Por ejemplo, la expectativa de control generalizado del chancro del castaño auspiciada por el éxito de estirpes hipo-virulentas en Europa, se vio frustrada en EE. UU. porque en este país prevalecen estirpes del patógeno vegetativamente incompatibles entre sí y con la estirpe hipo-virulenta.

Aunque se conocen casos de mico-parasitismo obligado, en el que el hiper-parásito solo puede absorber nutrientes del patógeno vivo, los hongos mico-parásitos con mayor potencial como agentes de bio-control son necrotrofos de fácil producción masiva y aplicación práctica. Estos últimos antagonistas: (i) pueden ser parásitos específicos de ciertas especies fúngicas, como *C. minitans* y *S. sclerotivorum* -que destruyen los esclerocios formados por especies de *Sclerotinia* spp. y *Sclerotium* spp-; o (ii) tener un espectro de parasitismo cuya amplitud varía según las cepas. En cualquier caso, los mico-parásitos necrotrofos causan la muerte de las células de sus huéspedes mediante enzimas hidrolíticas y metabolitos secundarios. Estas enzimas no son constitutivas sino inducibles por el reconocimiento específico del huésped y de metabolitos difusibles que secreta, que da lugar a una reprogramación transcripcional en el micoparásito.

C4.3.2.4. Inducción de mecanismos de defensa en la planta huésped

Los microorganismos antagonistas también contribuyen a la supresión de enfermedades mediante un mecanismo de acción indirecto, que consiste en estimular la expresión de la tercera de las líneas de defensa en la planta que se han abordado en extensión en el apartado C3. Esta tercera línea defensiva incluye la resistencia sistémica adquirida-referida como SAR (acrónimo de *Systemic Acquired Resistance*- y la resistencia sistémica inducida -referida como ISR (acrónimo de *Induced Systemic Resistance*)- reguladas, respectivamente, por las rutas de señalización del ácido salicílico (SA) y del etileno/ácido jasmónico (ET/JA). Dicha estimulación es llevada a cabo por una variedad de componentes estructurales de los microorganismos (ej., la proteína flagelina de los flagelos y lipo-polisacáridos de bacterias Gramnegativas) y de compuestos excretados por ellos (ej., antibióticos como el DAFG, compuestos orgánicos volátiles bacteriano como 2R,3R-butanodiol, y sideróforos como la pioverdina, así como por enzimas hidrolíticas y los oligómeros que producen en la desintegración celular de patógenos diana). Estos compuestos -conocidos como "elicitors"- inducen la expresión de los genes de las rutas del SA y del ET/JA, y de los mecanismos defensivos que subyacen en las ISR y SAR, y confieren a la planta un estado de sensibilización -denominada *priming* en la literatura inglesa- que propicia la activación más rápida e intensa de dichos mecanismos tras la invasión por un patógeno (Köhl et al., 2019; O'Brien, 2017).

La actividad "elicitora" de resistencia debida a metabolitos implicados en antibiosis, competición e hiper-parasitismo indica la dificultad de diferenciar entre antagonismo directo e indirecto en el control biológico, así como de asignar este a un solo mecanismo de acción singular. Aunque en principio la

inducción de SAR e ISR se asignó diferencialmente a grupos específicos de antagonistas microbianos (ej., la ISR inducida por las rizobacterias PGPR), investigaciones posteriores mostraron que la inducción de ambos tipos de resistencia sistémica tiene lugar indistintamente por diferentes antagonistas. Por ejemplo, algunas bacterias PGPR inducen resistencia sistémica tipo SAR, en lugar de la ISR, y la resistencia que inducen las estirpes no-patogénicas de *F. oxysporum* en algunas plantas parece ser diferente de las ISR y SAR porque en ella no están implicadas las fitohormonas SA, ET o JA (de Lamo y Takken, 2020). Colectivamente, los datos anteriores sugieren que **las plantas han evolucionado para detectar la composición de las comunidades microbianas asociadas a ellas y responder a los cambios en la naturaleza, abundancia, y localización de la diversidad de señales que emiten.**

Aunque la resistencia inducida por microorganismos antagonistas contribuye al control biológico de las enfermedades en la planta, la magnitud neta de ello está sujeta a algunos **elementos de incertidumbre**. De una parte, puesto que las plantas están expuestas en la naturaleza a una variedad de estímulos de resistencia inducida (ej., estreses abióticos, fitófagos, patógenos, etc.), la aplicación práctica de microorganismos inductores **puede no incrementar adicionalmente el nivel de aquella**. De otra, la estimulación y expresión de respuestas de defensa o de sensibilización en la planta son **dependientes de la estructura genética y estado fisiológico de la planta**, que a su vez están sujetos a la influencia del medioambiente (Köhl et al., 2019)

C4.3.3. Debilidades y fortalezas del control biológico de enfermedades

No obstante las convincentes razones técnicas e interés de productores, consumidores y legisladores en favor del control biológico de las enfermedades de los cultivos y masas forestales, el consenso generalizado es que los **microorganismos antagonistas no han alcanzado todavía un uso masivo a nivel comercial**. Aunque la eficiencia de control alcanzable por microorganismos antagonistas en condiciones experimentales es comparable a la proporcionada por las materias activas químicas disponibles, la aplicación práctica de aquellos en condiciones de campo raramente alcanza dichos niveles de control, que suele **adolecer de inconsistencia y variabilidad cuando los antagonistas se utilizan contra distintas enfermedades y en ambientes diversos**. Un ejemplo de excepción a dicha debilidad es la consistencia en el control de cepas de los géneros *Agrobacterium* y *Rhizobium* causantes de tumores por la cepa K84. De hecho, el descubrimiento de algunos fallos en dicho control llevó a la obtención de una cepa genéticamente mejorada, denominada K1026, que como K84 se comercializó en países de cuatro continentes (Penyalver et al., 2000).

La inconsistencia y variabilidad de los microorganismos antagonistas parecen propiciar que su uso como medida individual de control sea **percibido por los agricultores y la industria con menos confianza que los productos químicos fitosanitarios**, de manera que la mayor parte de la producción y distribución comercial de aquellos aun es llevada a cabo por pequeñas o medianas empresas, cuyas ventas globales apenas alcanzan un dígito porcentual de la correspondiente a PP. FF. (Montesinos y Bonaterra, 2009; O'Brien, 2017). Además, el número de microorganismos de control biológico de enfermedades registrado para uso comercial es relativamente limitado, a pesar del elevado número de ellos que son descubiertos y patentados por investigadores universitarios o de organismos públicos. Así, en el mercado internacional existen cerca de 50 formulados biológicos basados fundamentalmente en cepas individuales de hongos y bacterias o mezclas de aquellas, junto con algunos fagos bacterianos, que proceden mayoritariamente de EE. UU., la UE e Israel (Montesinos y Bonaterra, 2009; O'Brien, 2017). Comparativamente, en España está actualmente autorizada la comercialización de 28 de dichos formulados que se pueden consultar en (<https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sanidad-vegetal/productos-fitosanitarios/registro/menu.asp>.)

Las mencionadas variabilidad e inconsistencia en el control biológico de enfermedades están determinadas por varios factores, incluyendo: (i) la complejidad que subyace en las interacciones entre el patógeno, la planta y el microorganismo antagonista en el tiempo y sobre los cuales gravita la influencia de la variación ambiental; y (ii) la estrategia prevalente de uso de los microorganismos antagonistas mediante su introducción masiva por pulverización de la planta o tratamiento de semillas o material de plantación. Puesto que la extensión de supresión de enfermedad por un microorganismo antagonista es limitada, **la eficiencia del control conferido por ellos disminuye cuando prevalecen condiciones que favorecen el desarrollo de enfermedad severa**, como: (i) densidades de inóculo elevadas; (ii) patotipos y razas de los patógeno muy virulentas; (iii) cultivares del huésped muy susceptibles; y (iv) ambientes muy favorables (Foto 3). Por ejemplo, la dosis de inóculo efectiva de un microorganismo antagonista depende de la densidad y virulencia del patógeno diana, de manera que las relaciones entre ellas se pueden describir mediante modelos que permiten predecir el intervalo de dosis del antagonista necesaria para alcanzar control eficiente de una enfermedad. Además, la validación experimental de algunos de dichos modelos ha constatado que la eficiencia de un antagonista es inversamente proporcional a la dosis de inóculo efectiva mediana del patógeno en el huésped correspondiente, indicando que **cuanto más elevada es la virulencia del patógeno menor es la eficiencia del agente antagonista en su control biológico** (Johnson, 1994; Montesinos y Bonaterra, 1996).

La variabilidad conferida por diferencias en los genotipos del cultivo huésped a la eficiencia de control biológico también fue prontamente percibida y evaluada. Esta variabilidad puede ser atribuida: (i) a diferencias en la susceptibilidad a la enfermedad que determinan el desarrollo de enfermedad severa por encima del umbral de efectividad; y (ii) a genes distintos de lo que regulan dicho atributo, que codifican productos implicados en la expresión de los mecanismos de acción del antagonista (Hervás et al., 1997; O'Brien, 2017; Smith y Goodman, 1999). Finalmente, puesto que las variaciones en los componentes medioambientales pueden incidir diferencialmente sobre los organismos implicados en el control biológico y en sus interacciones, no debe sorprender que dichas variaciones influyan en la eficiencia de este último, como se ha demostrado en estudios concernientes a la temperatura y características físicas y químicas del suelo (Foto 3) (Duffy et al., 1997; Landa et al., 2001).

La disponibilidad comercial de formulados biológicos ha podido contribuir a la visión un tanto simplista de que antagonistas individuales exóticos seleccionados en ambientes diferentes de los de aplicación, compiten necesariamente con éxito con los microorganismos indígenas del medio de introducción para satisfacer la necesidad de colonizar, multiplicarse y sobrevivir en el medio que ocupa habitualmente el patógeno. Este hecho, y la influencia de las variaciones en los componentes del patosistema y del ambiente sobre consistencia del control biológico de enfermedades, ha llevado a concluir que **la eficiencia de microorganismos de control biológico debería ser evaluada mediante análisis de estabilidad de un conjunto de experimentos basado en índices ambientales relacionados con el desarrollo de enfermedad, más que en experimentos individuales; y que su utilización práctica: (i) se conciba como componente de programas de control integrado que incluyan otras medidas de lucha (ej., cultivares resistentes, prácticas culturales, etc.); (ii) incluya diferentes estrategias de aplicación en razón de la duración temporal del control (ej., se realicen aplicaciones ocasionales o repetidas; y (iii) se acomode a las particularidades de cada patosistema de aplicación (Boland, 1997; Cook, 1992; 1993; Landa et al., 2004).** Colectivamente, las consideraciones antes descritas determinan que los formulados para el control biológico de enfermedades deban ser investigados en profundidad en distintas condiciones y años, y que su elección y aplicación sean realizadas por personal técnico cuya formación especializada en Sanidad Vegetal le permita evaluar críticamente los factores y escenarios de aplicación implicados en la eficacia del control para su optimización.

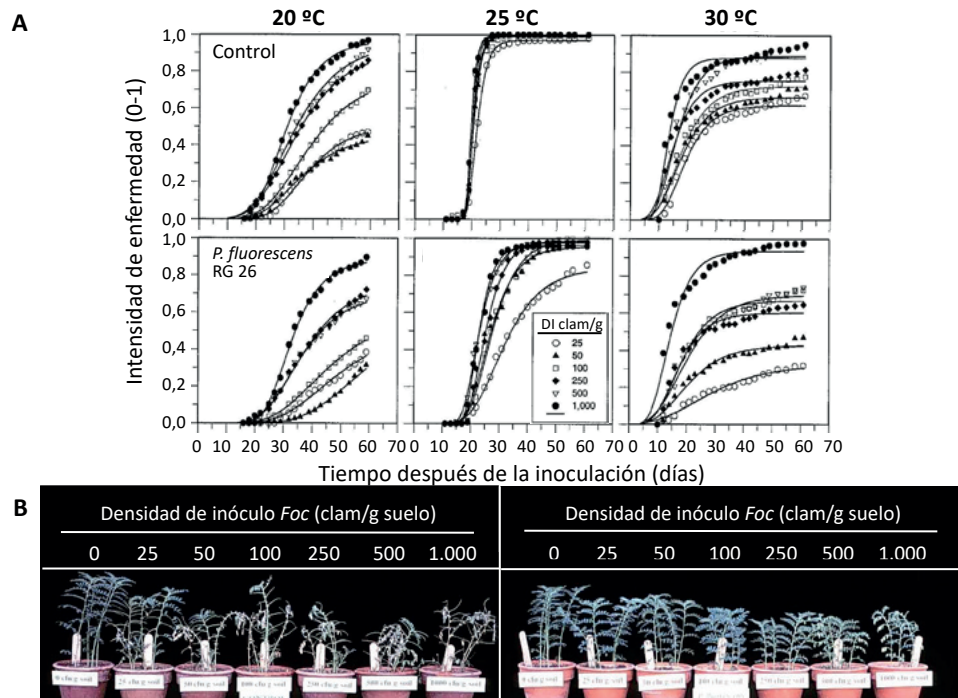


Foto 3. Efecto de la temperatura y la densidad de inóculo de la raza 5 de *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* (Foc), agente causal de la marchitez del garbanzo, sobre la eficiencia del tratamiento de la semilla y el suelo con la bacteria *Pseudomonas fluorescens* RG 26 en el control de la enfermedad. Semillas de garbanzo del cv. 'PV 61' tratadas la bacteria se sembraron en suelo infestado con esta y con diferentes densidades de inóculo (DI) del patógeno, y las plantas tratadas y no tratadas se incubaron a 20, 25, y 30 °C. **A.** Desarrollo de la marchitez en el tiempo de incubación: cada punto representa la intensidad media de enfermedad (0-1, 0 = sin síntomas; 1 = todas las plantas muertas) en 12 plantas, y las líneas representan el ajuste de los datos a la función de Gompertz. Nótese que el tratamiento con *P. fluorescens* RG 26 redujo el desarrollo de la enfermedad a las temperaturas subóptimas de 20 or 30 °C y con ID inferior a 250 clamidiosporas \times g⁻¹ de suelo, pero no a 25 °C, la temperatura óptima a la cual el incremento de ID no influyó sobre el desarrollo de la marchitez. El tratamiento con la cepa RG 26 retrasó el inicio de los síntomas de la enfermedad, redujo la tasa relativa de incremento de la marchitez y redujo la cantidad final de esta; **B.** Ilustración de la severidad de los síntomas desarrollados en plantas inoculadas no tratadas (izda.) y tratadas con la cepa RG 26 (dcha.), e incubadas a 30 °C. (Cortesía de B. B. Landa).

C4.3.4. Perspectivas futuras del control biológico de enfermedades

El control biológico de enfermedades alcanza máxima eficiencia cuando forma parte de estrategias de Gestión Integrada (GIP) y es clave en la producción agrícola ecológica u orgánica –en la que no se autoriza el uso de materias activas de naturaleza química-. Por lo tanto, es plausible esperar que el uso de antagonistas microbianos para dicho control se incremente en las próximas décadas, en razón de la creciente reclamación de la Gestión Integrada (GIP) como estrategia fundamental en la Sanidad Vegetal y el incremento en la importancia de la Agricultura Ecológica. Sin embargo, para satisfacer tal expectativa es necesario eliminar -o reducir- la inconsistencia y variabilidad que han venido interfiriendo con la aplicación práctica del control biológico de enfermedades, cuando este se ha basado en la introducción de cepas seleccionadas de antagonistas individuales. Para alcanzar dicha eliminación/reducción son necesarios renovados esfuerzos en la investigación científico-técnica sobre varios aspectos, incluyendo, entre otros : (i) la identificación de nuevos y más eficientes antagonistas; (ii) mejoras en el conocimiento de las interacciones que tienen lugar entre antagonistas y microbiota residente, y la influencia de los exudados radicales sobre ellas en la rizosfera; (iii) el desarrollo de nuevas estrategias de control; y (iv)

mejor comprensión de los efectos del manejo del agroecosistema sobre la eficiencia de los microorganismos antagonistas; sin desestimar las mejoras en los métodos y tecnologías de aplicación de los microorganismos antagonistas y el protagonismo que deben tener los técnicos especializados en **Sanidad Vegetal** en la aplicación práctica del control biológico. Los avances en el conocimiento sobre dichos aspectos de control biológico referidos, que hasta ahora han venido siendo obstaculizados por limitaciones metodológicas, son ahora posibles con las tecnologías ómicas' basadas en los métodos de secuenciación de alto rendimiento -i.e., meta-genómica, -transcriptómica, -metabólica, etc. Por ejemplo, estudios metagenómicos han revelado la extensión con que las plantas son colonizadas de forma natural y localizada o sistémicamente por bacterias u hongos que no causan síntomas en ellas -i.e. **microorganismos endofitos**-, de manera que constituyen un importante microbioma vegetal y junto con la planta forman un genoma complejo que se ha denominado holobionte (Porrás-Alfaro y Bayman, 2011; Glick y Gamalero, 2021). Las plantas infectadas por microorganismos endofitos constituyen en la actualidad un nicho de diversidad microbiana y de agentes antagonistas potencialmente válidos en el control biológico de enfermedades, porque producen una gran variedad de metabolitos secundarios antimicrobianos, inducen la expresión de mecanismos de defensa en la planta, y si son saprofitos competentes pueden excluir al patógeno de los tejidos necrosados en los que se encuentran establecidos (De Silva et al., 2019; Joo et al., 2021).

Uno de los retos más importantes para avanzar en el control biológico de enfermedades es la **mejor comprensión de la capacidad supresora de algunos suelos de las causadas por patógenos que residen en él**. La declaración de 2015 como "Año del Suelo" promovió y confirió notoriedad al concepto de "salud del suelo", de manera que se ha venido incrementando el uso **comercial de métodos analíticos para evaluar el "estado de salud" de los suelos**, basados en la determinación de C y N orgánicos, la respiración y la actividad biológica, que conjuntamente están relacionados con la actividad microbiana general. Sin embargo, esta información no es necesariamente indicadora de la capacidad supresora del microbioma edáfico, como tampoco lo es la identificación y descripción de sus componentes que es posible en la actualidad mediante secuenciación masiva del ADN total extraído de muestras de suelo y el análisis bio-informático de los resultados de ella (Schlatter et al., 2017). Por el contrario, puesto que **los exudados radicales ejercen una marcada influencia sobre la composición y actividad del microbioma rizosférico**, comprender la naturaleza de la "supresividad" requerirá la combinación de estudios metabólicos, metagenómicos y transcriptómicos de microbiomas y exudados radicales, a fin de determinar los mecanismos moleculares que regulan la influencia de dichos exudados sobre el microbioma rizosférico. Eventualmente, la identificación de metabolitos clave en dicha regulación puede conducir a la de los genes implicados en su síntesis, así como a la **mejora genética de cultivares por su capacidad de promover específicamente la microbiota rizosférica efectiva en la supresión de los patógenos en la rizosfera** (Schlatter et al., 2017; Sun et al., 2021).

Una de las expectativas de mejora en el control biológico insuficientemente exploradas todavía es la utilización de **enmiendas orgánicas del suelo, para promover la composición y actividad de la microbiota nativa efectiva en la supresión de enfermedades**. Esta manipulación de la microbiota residente en el suelo forma parte de la estrategia de manipulación del agroecosistema para el control biológico de enfermedades, y es comparable al método de conservación para el control biológico de plagas. Las enmiendas orgánicas comprenden un amplio marco de substratos, incluyendo estiércoles de animales, enterrado de cultivos en verde, productos con alto contenido en N (ej., harinas de carne, pescado, soja, etc.), carbón vegetal (*biochar*) y compost (materia orgánica estabilizada rica en humus y ácidos húmicos derivada de la transformación bio-oxidativa de residuos de biomasa). Aunque las enmiendas orgánicas se han venido empleando desde hace tiempo para promover el crecimiento y rendimiento de los cultivos, su utilización práctica para promover la supresión de tipo general de las enfermedades, y en particular del compost, es más reciente y es objeto de interés creciente (Mazzola and Freilich, 2017).

Aunque el notable potencial del compost para el control biológico de enfermedades es apreciado de forma generalizada, su utilización en sistemas agrícolas en condiciones de campo es todavía limitada por la variabilidad e inconsistencia de los resultados en la supresión de enfermedades. Ambos aspectos desfavorables se han atribuido a la dificultad de estandarizar la calidad y cualidades en la producción y en la utilización de composts a través de una diversidad de sustratos, suelos y sistemas de producción; así como al desconocimiento de las relaciones entre las características de la microbiota habitante de un compost y la efectividad de la supresión que confiere (De Corato, 2020). Es plausible que la utilización de las tecnologías "ómicas" posibilite desvelar dichas relaciones en favor del uso de composts para la supresión de enfermedades.

Adicionalmente a dichas expectativas, el compost se concibe como un medio adecuado para la introducción de mezclas de microorganismos exógenos –consorcios- seleccionados por emplear mecanismos de acción complementarios y superior eficiencia de supresión. En el control biológico de varias enfermedades bacterianas, se usan ya de forma comercial la mezcla de dos o más cepas para optimizar el control biológico, como en el caso de: (i) el fuego bacteriano (*E. amylovora*) en el que se usan mezclas de cepas *Pseudomonas fluorescens* y *Pantoea* spp.; (ii) *R. solanacearum* en tomate que se trata con mezclas de varias cepas de distintas *Pseudomonas*, o de cepas no virulentas o de varias flavobacterias; o (iii) las podredumbres de la patata causadas por *Pectobacterium* spp. frente a las que se usan, cepas de *Serratia*, *Rahnella* y *Enterobacter*. Eventualmente, estos microorganismos exógenos pueden ser genéticamente mejorados para reunir y/o sobre-expresar mecanismos de acción de eficiencia probada. Tal modificación se ha demostrado técnicamente posible mediante tecnologías de ADN recombinante, y en la actualidad mediante tecnología de edición genética de cepas eficientes disponibles –ej., CRISPR/Cas 9, ver Apartado C3.) (Köhl et al., 2019; O'Brien, 2017). Sería deseable que las restricciones legislativas de la UE sobre el uso de microorganismos de control biológico modificados genéticamente –con resultados tan negativos como la no autorización del registro de la cepa K1026 de *R. rhizogenes*, que sigue siendo uno de los microorganismos más eficientes en el control de tumores en plantas dicotiledóneas 30 años después de su obtención-, no sean de aplicación a la modificación genética mediante técnicas no recombinantes.

C4.4. Control biológico de malas hierbas

De los agentes nocivos propios de la Sanidad Vegetal, las malas hierbas son los que emplean una mayor cantidad de PP. FF. y para algunos ese es el principal motivo por el cual la eficiencia en su control supera la del control de plagas y enfermedades (Oerke, 2006). Un método tradicional de control de malas hierbas que no usa herbicidas químicos es el laboreo. Cualquiera de los dos métodos –herbicidas y laboreo- plantea problemas graves de sostenibilidad, tanto en términos de energía empleada como de emisión de gases con efecto invernadero; además, la contaminación del medio ambiente con herbicidas y el desarrollo de variantes de malas hierbas resistentes a los mismos completan los aspectos negativos de la tecnología imperante para el control de malas hierbas. Una de las soluciones alternativas que se viene investigando desde hace ya unos cuantos años es el control biológico.

El control biológico de malas hierbas se afronta con dos modalidades. La primera de ellas es la que hemos venido llamando control biológico clásico (CBC) en esta sección, es decir, el uso de enemigos naturales exóticos para el control de malas hierbas no nativas. Dado que la mayor parte de malas hierbas no son nativas de los lugares en donde causan problemas, el CBC ha sido el predominante en la historia reciente del control biológico de malas hierbas. En una revisión de las introducciones de agentes exóticos para el control de malas hierbas realizadas hasta 2012, se recogen 468 especies de agentes aplicados para el control de 175 especies de malas hierbas pertenecientes a 49 familias botánicas en 90 países (Schwarzländer et al., 2018). El 80 % de los agentes aplicados en esa modalidad son insectos pertene-

cientes a tres órdenes: coleópteros, lepidópteros y dípteros, mientras que la mayor parte de los demás también son insectos aunque de otros órdenes. Menos del 10 % de los agentes exóticos introducidos contra malas hierbas son microorganismos fitopatógenos, mayoritariamente hongos. Un porcentaje muy escaso de esas sueltas se llevaron a cabo en la UE, que ha sido reacia al desarrollo de esa tecnología y al registro de posibles agentes de control biológico. Por el contrario, un reducido número de países han sido más activos en la aplicación de esta estrategia de control, entre los cuales se encuentran, por orden decreciente de importancia, Australia, EE. UU., Nueva Zelanda y Sudáfrica. En términos generales, la investigación y el desarrollo comercial del CBC de malas hierbas ha decrecido durante los últimos años. Algunos ejemplos de impactos negativos en objetivos no diana, las crecientes exigencias del registro de agentes de control biológico y el recorte de los recursos dedicados a la investigación sobre el tema en varios países pueden explicar ese descenso en el progreso del CBC de malas hierbas.

La segunda modalidad utilizada en el control biológico de malas hierbas se ha basado en la inundación de los campos con una cantidad relativamente grande de agentes de control, fundamentalmente microorganismos fitopatógenos tales como ciertas bacterias, hongos y virus que han recibido el nombre de bio-herbicidas (Harding y Raizada, 2015). Esta modalidad de control biológico tiene una serie de ventajas en comparación con los métodos clásicos referidos más arriba, que incluyen: (i) la reducción del impacto ambiental y una rápida degradación en el medio; (ii) una mayor especificidad y menor coste de desarrollo; (iii) el descubrimiento de nuevos mecanismos de acción herbicida; y (iv) la escasa movilidad de los agentes de control sin la intervención humana. Sin embargo, los bio-herbicidas también presentan inconvenientes que frenan un mayor desarrollo, entre los que son de destacar su sensibilidad a las condiciones ambientales de los lugares de aplicación, particularmente la humedad necesaria para la efectiva actividad del bio-herbicida en el microambiente del lugar de acción. En ocasiones se ha señalado que este tipo de productos para el control biológico inundativo se ha mostrado poco compatible con la utilización coetánea de los PP. FF. de síntesis. Es de resaltar que prácticamente no hay productos bio-herbicidas registrados en la UE. Probablemente, un mejor conocimiento de los modos de acción de los bio-herbicidas facilitaría su mejora y la de sus formulaciones que hiciera menos variable su eficacia en condiciones de campo. Una mayor escala de utilización también ayudaría a abaratar el coste de este tipo de productos. Señalemos, por último, que la utilización de agentes fitopatógenos para el control de malas hierbas puede parecer en ocasiones arriesgado cuando se trata de controlar especies vegetales cercanas a las cultivadas.

C4.5. Debilidades, fortalezas y perspectivas del control biológico de plagas, enfermedades y malas hierbas

A pesar de la aparente sencillez del fenómeno aprovechado por el control biológico, por el cual algunos organismos obtienen nutrientes o usan muy distintas estrategias para reducir o eliminar las poblaciones de los artrópodos fitófagos, los fitopatógenos o las malas hierbas, los mecanismos que permiten esas interacciones son muy variados y en ocasiones tremendamente complejos. Y esa misma complejidad y diversidad constituyen a la vez una de las principales debilidades y fortalezas del control biológico. Las debilidades se derivan de la dificultad de conocer esos mecanismos, conocimiento que es indispensable si queremos utilizarlos con eficacia y predictibilidad suficientes. En contraposición, la variedad de mecanismos en los que se basa el control biológico hace que, una vez conocidos, puedan escogerse aquellos más eficientes y adaptados a cada situación en que se produzca un problema de plaga, enfermedad o mala hierba, una fortaleza particularmente apreciable en un campo tecnológico como es el de la Sanidad Vegetal en el que la durabilidad de los métodos suele ser más bien escasa por diversas circunstancias ya expuestas a lo largo del presente libro.

Como queda dicho repetidamente a lo largo de este capítulo, la comprobación de la existencia de organismos que causan la reducción de la cantidad e incidencia de plagas, enfermedades y malas hierbas llevaron tempranamente a idear técnicas que aprovecharan y potenciaran las diversas formas de control natural, técnicas que condujeron al control biológico. A medida que las especies protagonistas y los mecanismos de acción del control natural se fueron conociendo con más profundidad tanto en los ecosistemas naturales como en los agroecosistemas, **el control biológico se robusteció basando preferentemente su progreso científico en su ecología**, lo que le permitió desarrollar métodos propios, evaluar la eficacia de las técnicas que se iban proponiendo y mejorando la predictibilidad de sus resultados. En paralelo: (i) la carencia creciente de PP. FF.; (ii) la insuficiente efectividad de otros métodos alternativos de control; y (iii) la preocupación social cada vez mayor por la salubridad alimentaria y el aumento de especies invasoras, fueron otorgando al control biológico un mayor protagonismo, que es facilitado, por otra parte, por éxitos notables en la resolución de problemas variados de la Sanidad Vegetal.

Una práctica controvertida en el control biológico ha sido la utilización de especies exóticas y el riesgo de que pudieran desplazar especies nativas o tuvieran consecuencias inesperadas. Ese debate se ha tenido en especial en el control biológico clásico de plagas y malas hierbas, y mucho menos en el control biológico de enfermedades, en el que la utilización de antagonistas procedentes de ámbitos diferentes del de aplicación está relacionada con la comercialización de los productos. Para defender el uso de especies exóticas se ha argüido que es la única posibilidad realista cuando se trata de agentes nocivos exóticos invasores, aunque en ocasiones algunas especies nativas han sido capaces de controlar con eficacia plagas exóticas. La perspectiva de seguir usando especies exóticas en agroecosistemas locales se está haciendo cada vez más difícil ante las exigencias crecientes de estudios que demuestren la carencia o el bajo riesgo, que son necesarios para el registro de nuevos agentes de control biológico. La necesidad de realizar análisis de todos los posibles organismos nocivos que puede contener el agente potencial de biocontrol y de valorar concienzudamente los riesgos de la introducción y suelta de enemigos naturales exóticos y su efecto a corto y medio plazo en el medioambiente local, hacen cada vez más largo y costoso el proceso de registro.

Otro aspecto que está frenando un más rápido desarrollo del control biológico es el de los riesgos para la planta cultivada de los agentes que se utilizan o que se están ensayando. Tanto los enemigos naturales de los artrópodos fitófagos –ej., depredadores omnívoros– como los antagonistas de los patógenos y sobre todo los microorganismos con capacidad herbicida, pueden producir efectos negativos sobre el cultivo. Ello merece una extrema cautela antes del uso comercial de ese tipo de agentes y habitualmente se exigen bastantes datos sobre la bioseguridad de los mismos para su autorización y registro. Aun así, ha habido casos en los que algunos agentes han sido retirados del mercado al comprobarse efectos negativos en dianas no objetivo (Hinz et al., 2019).

En conjunto, las perspectivas del control biológico de plagas, enfermedades y malas hierbas van a mejorar sensiblemente como resultado de los avances científicos y tecnológicos derivados del progreso de la ecología y la biotecnología, que deben permitir comprender mejor los mecanismos que subyacen en la eficacia y los riesgos del control biológico. No hay duda, por otra parte, que hay una demanda social a nivel global para una mayor aplicación del método. Por ejemplo, la tasa con que se han introducido nuevos productos de control biológico durante la última década a nivel global ha superado a la correspondiente de PP. FF. convencionales (<https://croplife.org/wp-content/uploads/2018/11/Phillips-McDougall-Evolution-of-the-Crop-Protection-Industry-since-1960-FINAL.pdf>). Sin embargo, a pesar de este reciente crecimiento del mercado de productos biológicos, sus ventas globales apenas alcanzan el 5 % del total de los productos actualmente comercializados para la protección de los cultivos (Buckwell et al., 2020).

C4.6. Bibliografía

- Alabouvette, C., Olivain, C., Migheli, Q., y Steinberg, C. 2009. Microbiological control of soil-borne phytopathogenic fungi with special emphasis on wilt-inducing *Fusarium oxysporum*. *New Phytol.* 184: 529-544. doi: 10.1111/j.1469-8137.2009.03014.x.
- Álvarez, B., López, M. M., y González-Biosca, E. 2019. Biocontrol of the major plant pathogen *Ralstonia solanacearum* in irrigation water and host plants by novel waterborne lytic bacteriophages. *Frontiers in Microbiol.* 10 :2813-2830.
- Baker, K.F., y Cook, R.J. 1974. *Biological Control of Plant Pathogens*. Freeman, San Francisco, CA.
- Begg, G.S., Cook, S.M., Dye, R., Ferrante, M., et al. 2017. A functional overview of conservation biological control. *Crop Prot.* 97: 145-158.
- Boland, G.J. 1997. Stability analysis for evaluating the influence of environment on chemical and biological control of white mold (*Sclerotinia sclerotiorum*) of bean. *Biol. Control* 9: 7-14.
- Buckwell, A., De Wachter, E., Nadeu, E., y Williams, A. 2020. *Crop Protection & the EU Food System. Where are they going?* RISE Foundation, Bruselas.
- Cook, R.J. 1992. A customized approach to biological control of wheat root diseases. Págs. 211-222, en: E.C. Tjamos, G.C. Papavizas, y R.J. Cook, eds. *Biological Control of Plant Diseases*. Plenum Press. Nueva York.
- Cook, R.J. 1993. Making greater use of introduced microorganisms for biological control of plant pathogens. *Annu. Rev. Phytopathol.* 31: 53-80.
- Cook, R.J., Thomashow, L.S., Weller, D.M., Fujimoto, D., Mazzola, M., Bangera, G., y Kim, D.S. 1995. Molecular mechanisms of defense by rhizobacteria against root disease. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 92: 4197-4201.
- Cook, R.J. 2014. Plant health management: Pathogen suppressive soils. Págs. 441-455, en: N.K. Van Alfen, ed. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, 2nd edition. Elsevier. Amsterdam.
- De Corato, U. 2020. Disease-suppressive compost enhances natural soil suppressiveness against soil-borne plant pathogens: A critical review. *Rhizosphere* 13. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100192>.
- de Lamo, F.J., y Takken, F.L.W. 2020. Biocontrol by *Fusarium oxysporum* using endophyte-mediated resistance. *Front. Plant Sci.* 11: 37. doi: 10.3389/fpls.2020.00037.
- De Silva, N.I., Brooks, S., Lumyong, S., y Hyde, K.D. 2019. Use of endophytes as biocontrol agents. *Fungal Biology Rev.* 33:133-148.
- Duffy, B.K., Ownley, B.H., y Weller, D.M. 1997. Soil chemical and physical properties associated with suppression of take-all of wheat by *Trichoderma koningii*. *Phytopathology* 87: 1118-1124.
- García-Marí, F. 2012. *Plagas de los Cítricos. Gestión Integrada en Países de Clima Mediterráneo*. Editorial Phytoma. Valencia.
- Garita-Cambronero, J., Cubero, J., Montesinos, E., Murillo, J., y López-Solanilla, E. 2018. Mecanismos de patogénesis en bacterias fitopatógenas. Págs. 59-91, en: *Enfermedades de Plantas Causadas por Bacterias*. M.M. López, J. Murillo, E. Montesinos, y A. Palacio-Bielsa, eds. Sociedad Española de Fitopatología y Bubok Publishing S.L. Madrid.
- Gatehouse, A.M.R., y Pennacchio, F. 2022. *Bioinspired Pest Control Technologies: A New Frontier in Biological Control*. A presentation at the University of Lleida, May 4, 2022.
- Glick, B.R., y Gamalero, E. 2021. Recent developments in the study of plant microbiomes. *Microorganisms* 9: 1533. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9071533>.
- Harding, D.P., y Raizada, M.N. 2015. Controlling weeds with fungi, bacteria and viruses: a review. *Front. Plant Sci.* 6: 659. doi: 10.3389/fpls.2015.00659.
- Heimpel, G.E., y Mills, N.J. 2017. *Biological Control: Ecology and Applications*. Cambridge Univ. Press. Cambridge, UK.
- Hervás, A., Landa, B.B., y Jiménez-Díaz, R.M. 1997. Influence of chickpea genotype and *Bacillus* sp. on protection from *Fusarium* wilt by seed treatment with nonpathogenic *Fusarium oxysporum*. *Eur. J. Plant Pathol.* 103: 631-642.
- Hinz, H.L., R.L. Winston, y M. Schwarzländer. 2019. "How safe is weed biological control? A global review of direct nontarget attack." *The Quarterly Review of Biology* 94 (1): 1-27. <https://doi.org/10.1086/702340>.
- Johnson, K.B. 1994. Dose-response relationships and inundative biological control. *Phytopathology* 84: 780-784.
- Joo, H-S., Deyrup, S.T., y Shim, S.H. 2021. Endophyte-produced antimicrobials: a review of potential lead compounds with a focus on quorum-sensing disruptors. *Phytochem. Rev.* 20:543-568. <https://doi.org/10.1007/s11101-020-09711-7>.
- Karp, D.S., Chaplin-Kramer, R., Meehan, T.M., Emily A. Martin, E.M., et al. 2018. Crop pests and predators exhibit inconsistent responses to surrounding landscape composition. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 115: E7863-E7870.
- Köhl, J., Kolnaar, R., y Ravensberg, W.J. 2019. Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases: relevance beyond efficacy. *Front. Plant Sci.* 10:845. doi: 10.3389/fpls.2019.00845.
- Lacey, L.A. 2017. *Entomopathogens used as microbial control agents*. Págs. 3-12, en: *Microbial Control of Insect and Mite Pests*. L.A. Lacey, ed. Elsevier. Amsterdam.
- Landa, B.B., Navas-Cortés, J.A., Hervás, A., y Jiménez-Díaz, R.M. 2001. Influence of temperature and inoculum density of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* on suppression of *Fusarium* wilt of chickpea by rhizosphere bacteria. *Phytopathology* 91: 807-816.
- Landa, B.B., Navas-Cortés, J.A., y Jiménez-Díaz, R.M. 2004. Integrated management of *Fusarium* wilt of chickpea with sowing date, host resistance, and biological control. *Phytopathology* 94: 946-960.

- Lorito, M., Woo, S.L., Harman, G.E., y Monte, E. 2010. Translational research on *Trichoderma*: from 'omics' to the field. *Annu. Rev. Phytopathol.* 48: 395-417. doi: 10.1146/annurev-phyto-073009-114314.
- Mavrodi, O.V., Mavrodi, D.V., Parejko, J.A., Thomashow, L.S., y Weller, D.M. 2012. Irrigation differentially impacts populations of indigenous antibiotic-producing *Pseudomonas* spp. in the rhizosphere of wheat. *Appl. Environ. Microbiol.* 78: 3214-3220.
- Mazzola, M., y Freilich, S. 2017. Prospects for biological soilborne disease control: application of indigenous versus synthetic microbiomes. *Phytopathology* 107: 256-263. doi: 10.1094/PHYTO-09-16-0330-RVW).
- Montesinos, E., y Bonaterra, A. 1996. Dose-response models in biological control of plant pathogens: an empirical verification. *Phytopathology* 86: 464-472.
- Montesinos, E., y Bonaterra, A. 2009. Microbial Pesticides. Págs. 110-120, en: Schaechter, M., Ed., *Encyclopedia of Microbiology*, 3rd Edition, Elsevier, Amsterdam. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-012373944-5.00125-5>
- O'Brien, P.A. 2017. Biological control of plant diseases. *Australasian Plant Pathol.* 46: 293-304. DOI 10.1007/s13313-017-0481-4.
- Oerke, E.C. 2006. Crop losses to pests. *J. Agric. Sci.* 144: 31-43. doi: 10.1017/s0021859605005708.
- Pal, K.K., y McSpadden Gardener, B. 2006. Biological control of plant pathogens. *The Plant Health Instructor* DOI: 10.1094/PHI-A-2006-1117-02.
- Pappas, M.L., Broekgaarden, C., Broufas, G.D., Kant, M.R., Messelink, G.J., Steppuhn, A., Wäckers, F., y van Dam, N.M., 2017. Induced plant defences in biological control of arthropod pests: a double-edged sword. *Pest Manag. Sci.* 73:1780-1788. DOI 10.1002/ps.4587.
- Penyalver, R., Vicedo, B., y López, M. M. 2000. Use of the genetically engineered strain K1026 for the biological control of crown gall. *Eur. J. Plant Pathol.* 106: 801-810.
- Porras-Alfaro, A., y Bayman, P. 2011. Hidden fungi, emergent properties: endophytes and microbiomes. *Annu. Rev. Phytopathol.* 49:291-315.
- Raaijmakers, J.M.; y Mazzola, M. 2016. Soil immune responses: Soil microbiomes may be harassed for plant health. *Science* 352: 1392-1393. doi: 10.1126/science.aaf3252.
- Schlatter, D., Kinkel, D., Thomashow, L., Weller, D., y Paulitz, T. 2017. Disease suppressive soils: new insights from the soil microbiome. *Phytopathology* 107: 1284-1297. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-17-0111-RVW>.
- Schwarzländer, M., Hinz, H.L., Winston, R.L., y Day, M.D. 2018. Biological control of weeds: an analysis of introductions, rates of establishment and estimates of success, worldwide. *BioControl* 63: 319-331.
- Smith, K.P., y Goodman, R.M. 1999. Host variation for interactions with beneficial plant-associated microbes. *Annu. Rev. Phytopathol.* 37: 473-491
- Sun, S., Jiang, S., Jiang, C., Wu, C., Gao, M., y Wang, Q. 2021. A review of root exudates and rhizosphere microbiome for crop production. *Environ. Sci. Pollut. Res.* <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15838-7>.
- van Lenteren, J.C., Alomar, O., Ravensberg, W.R., y Urbaneja, A. 2020. Biological control agents for control of pests in greenhouses. Págs. 409-439, en: L.M. Gullino, R. Albajes, y y P.C. Nicot, eds. *Integrated Pest and Disease Management in Greenhouse Crops*. Gam, Switzerland.
- Weller, D.M., Raaijmakers, J.M., McSpadden-Gardener B.B., y Thomashow, L.S. 2002. Microbial populations responsible for specific soil suppressiveness to plant pathogens. *Annu. Rev. Phytopathol.* 40: 309-348.
- Weller, D. M., Landa, B. B., Mavrodi, O. V., Schroeder, K. L., De La Fuente, L., Blouin Bankhead, S., Allende Molar, R., Bonsall, R. F., Mavrodi, D. V., y Thomashow, L. S. 2007. Role of 2,4-diacetylphloroglucinol-producing fluorescent *Pseudomonas* spp. in the defense of plant roots. *Plant Biol.* 9: 4-20.

C5. Capítulo C5. Epidemiología de las enfermedades y Dinámica de Poblaciones de artrópodos fitófagos¹

C5.1. Epidemiología de las enfermedades de las plantas

La Epidemiología se puede definir como el estudio de las epidemias, entendiendo por epidemia el cambio en la intensidad de enfermedad en una población del huésped en el tiempo y el espacio, y abarca partes de diversas disciplinas, incluyendo Aerobiología, Análisis de sistemas, Ecología, Estadística, Matemáticas, Meteorología, y Producción y Protección Vegetal, entre otras (Madden et al., 2007). En los últimos 50 años ha habido avances considerables en el estudio de las epidemias, con un notable incremento en la complejidad analítica y metodológica con que se han abordado (Madden et al., 2007). La Epidemiología ha hecho contribuciones significativas a la Fitopatología al ayudar a dilucidar los principios generales que subyacen en el desarrollo de las epidemias. Esto ha mejorado notablemente la comprensión teórica y empírica de la dinámica de las epidemias de enfermedades en el tiempo y el espacio, la predicción de brotes de enfermedades, la necesidad de su control en tiempo real, y el diseño de soluciones tácticas y estratégicas a los problemas ocasionados por estas (Ojiambo et al., 2017).

C5.2. Modelización de epidemias

En el contexto de la Sanidad Vegetal, un modelo de una enfermedad es una representación simplificada de las relaciones entre el patógenos, los cultivos y el medioambiente (patosistema), que determinan el desarrollo de las epidemias e implican un amplio número de interacciones a diferentes niveles jerárquicos en el tiempo y el espacio (González-Domínguez et al., 2020). Los modelos epidemiológicos que combinan factores bióticos (i.e., planta y patógeno) y abióticos (i.e., medioambiente) se han desarrollado desde mediados del siglo XIX. Los primeros modelos tuvieron un enfoque puramente empírico y consistían en reglas, gráficos o tablas simples que mostraban las relaciones entre los componentes del ciclo del patógeno y las condiciones climáticas en que se desarrolla (Fedele et al., 2022). Los modelos dinámicos no fueron desarrollados hasta principios de la década de 1960, con la conceptualización del progreso temporal de las enfermedades por Van der Plank (1963) y el desarrollo posterior de esos conceptos por Zadoks (1971). Posteriormente, han sido muchos los modelos de enfermedades de plantas que han sido desarrollados por fitopatólogos, matemáticos y estadísticos (De Wolf e Isard, 2008).

Los modelos epidemiológicos se pueden clasificar de varias formas. Por conveniencia, Kranz y Royle (1978) los clasificaron en tres tipos según que su objetivo principal fuese **descriptivo**, **predictivo** o **conceptual**. Los modelos descriptivos proporcionan hipótesis o generalizan resultados experimentales, pero no suelen revelar los mecanismos subyacentes en los procesos. Los modelos predictivos -que también son descriptivos- permiten predecir la ocurrencia o la severidad de las epidemias y utilizan herramientas matemáticas, como funciones simples o complejas, ecuaciones de regresión y diferenciales, o modelos de decisión simples. Los modelos conceptuales -también conocidos como modelos explicativos o analíticos- permiten la identificación de problemas distinguiendo la causa del efecto y cuantificando los efectos de eventos específicos en el desarrollo de epidemias, se construyen como representaciones

¹ Los seis apartados primeros de este capítulo (C5.1. a C5.6.) han sido escritos por el Dr. Juan Antonio Navas, del Instituto de Agricultura Sostenible (IAS), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Córdoba.

de los procesos biológicos y ecológicos subyacentes, y pueden eventualmente conducir al desarrollo de modelos de simulación complejos.

Cabe señalar que los modelos pueden ser específicos para una enfermedad, pero también pueden ser más generales y aplicarse a distintos sistemas. Un modelo descriptivo a menudo se ocupa de comprender y predecir el desarrollo de enfermedades específicas y, por lo tanto, generalmente se utiliza para ayudar a agricultores y técnicos en la toma de decisiones tácticas para la correcta gestión integrada de la enfermedad. Por ejemplo: (i) una **epidemia policíclica** se caracteriza por el incremento geométrico del inóculo del patógeno y el crecimiento logístico de la cantidad de enfermedad durante el ciclo anual del cultivo, y las **estrategias de gestión de la enfermedad se basan fundamentalmente en acciones para reducir la tasa relativa de dicho crecimiento**; mientras que (ii) una **epidemia monocíclica** es determinada por el inóculo del patógeno disponible o introducido al principio de dicho ciclo del cultivo, y las **estrategias de manejo de la enfermedad se basan en acciones para reducir el inóculo inicial y las condiciones que determinan su efectividad**. Un modelo conceptual a menudo aborda una comprensión teórica de las características genéricas del desarrollo de epidemias y, por lo tanto, puede ser utilizado para la toma de decisiones estratégicas o de política agraria (Van Maanen y Xu, 2003).

Por otro lado, los modelos utilizados en epidemiología se pueden **diferenciar en función del enfoque de modelización (empírico vs. mecanicista)**: mientras que en los modelos empíricos se combina la información sobre la influencia del huésped, el patógeno o el medioambiente en el desarrollo de la enfermedad; en los modelos mecanicistas se considera la información sobre los componentes del ciclo del patógeno que representan (p. ej., De Wolf e Isard, 2008; Krause y Massie, 2003; Rabbinge y de Wit, 1999). Así, los modelos empíricos se desarrollan para describir la observación de un proceso o fenómeno, o la relación entre variables utilizando principios estadísticos ya aceptados (Madden et al., 2007). Estos modelos están por tanto basados en datos, los organizan y estandarizan su relación en términos de representación matemática o estadística, y proporcionan información útil para explorar las relaciones dentro de un patosistema (p. ej., la correlación entre densidad de población del patógeno y la temperatura). En cambio, los modelos mecanicistas, se desarrollan partiendo de una teoría, hipótesis o concepto de cómo ocurre un fenómeno o proceso (p. ej., la dinámica de población del patógeno) (Madden et al., 2007; Rossi et al., 2010). Estos modelos mecanicistas son finalmente validados frente a datos reales, utilizando principios de modelización empírica para determinar su adecuación (Madden et al., 2007). En cualquier caso, los modelos se desarrollan y utilizan para diferentes propósitos, y para objetivos que pueden requerir diferentes estrategias de modelización. **Lo relevante debe ser si el modelo utilizado es razonable para los objetivos que se persiguen, la naturaleza del proceso que se representa y la forma en que se obtienen los datos, y no el tipo de modelo utilizado** (Madden et al., 2007).

C5.3. Nuevas aproximaciones a la modelización de epidemias

La modelización de epidemias de enfermedades de las plantas ha estado **dominada por el cortoplacismo o por cuestiones tácticas**, como son el desarrollo de modelos para el establecimiento de calendarios para la aplicación de Productos Fitosanitarios (PP. FF.) en Sistemas de Apoyo a la Toma de Decisiones (p. ej., Isard et al., 2015; Magarey et al., 2002; Welch et al., 1978). Estos modelos están **basados frecuentemente en patosistemas y ambientes específicos, con observaciones multianuales** que permiten la construcción de relaciones empíricas robustas utilizando variables ambientales y de la fenología del cultivo (Madden et al., 2007). Una aproximación alternativa contempla la **construcción de modelos parametrizados en base a experimentos independientes en condiciones controladas**, dirigidos a identificar las respuestas de los agentes fitopatógenos a un intervalo de variación de factores medioambientales (Donatelli et al., 2017). Entre los modelos de este tipo más populares en epidemiología se encuentran:

(i) el modelo SEIR (*Susceptible-Exposed-Infectious-Removed*) (Gilligan et al., 2007); y (ii) los modelos de infección por fitopatógenos como el propuesto por Magarey et al. (2005) para patógenos fúngicos foliares, basados en la temperatura y la duración del período de humectación.

C5.3.1. Modelización de epidemias en un contexto de Cambio Climático

Las modificaciones medioambientales asociadas al Cambio Climático suponen un **componente adicional de relevancia a considerar en la modelización de las epidemias de enfermedades de las plantas**. En gran medida, los modelos que abordan el impacto del Cambio Climático en las epidemias se han centrado en valorar el efecto de una sola variable ambiental sobre el patógeno, el huésped, o la interacción de ambos en condiciones de ambiente controlado (Coakley et al., 1999), o han estado basados en cambios fijos en la temperatura y la precipitación. No obstante, **los modelos más actuales incorporan variables climáticas generadas por modelos de circulación global (MCGs)** (Garrett et al., 2006), con el desarrollo de modelos que permitan escalar las predicciones de los MCGs a una escala menor en la que se suele abordar el estudio de las epidemias (Seem, 2004), o en el sentido opuesto desde una escala local a escala regional (Lafferty et al., 2003). En este sentido, Bergot et al. (2004) han estimado en Francia la expansión de *Phytophthora cinnamomi* (agente causal de podredumbre de raíz en numerosas plantas herbáceas y leñosas) en algunos centenares de kilómetros al este desde la costa atlántica, mediante la modelización de la temperatura del floema en árboles infectados y estimando la probabilidad de supervivencia del patógeno en invierno basada en un modelo regionalizado derivado de un MCG. Por otro lado, la modificación del clima puede tener como consecuencia una **asincronía entre el agente fitopatógeno, su vector, y el huésped** -provocada por el Cambio Climático (Dixon, 2003)- que puede ser importante en muchos patosistemas, como es el caso de la necrosis de la espiga causada por el hongo *Fusarium graminearum* en la que la infección ocurre solo durante la floración, que está influida por el incremento de temperaturas primaverales.

C5.3.2. Modelización de enfermedades emergentes

La emergencia de enfermedades se ha incrementado de forma dramática en los últimos años, como consecuencia del Cambio Climático, del incremento del comercio transnacional de plantas y productos vegetales, y de la uniformidad de los cultivos, que hace necesario una mejor comprensión de los procesos que las determinan. Ya en 1987, Heesterbeek y Zadoks propusieron una **teoría matemática de las pandemias, con tres fases distintivas: epidemias de orden cero, de primer orden y de segundo orden**. Esta teoría considera dos grupos de procesos para analizar las pandemias: (i) la expansión espacial de la enfermedad; y (ii) la acumulación de ciclos de enfermedades dentro y entre los ciclos de cultivo. Mientras que la epidemia de orden cero está limitada a un campo o parcela y es policíclica (i.e., se desarrollan varios ciclos de infección por el patógeno durante el ciclo anual del cultivo), la epidemia de primer orden es asimismo policíclica y está ligada a un área, y la de segundo orden es tanto continental como poliética (i.e., el patógeno necesita más de 1 año para completar su ciclo y el desarrollo de las epidemias es mediado por el incremento de la población interanual de aquel). Como respuesta al trabajo de Heesterbeek y Zadoks (1987), recientemente, Willocquet et al. (2020) han sintetizado en **tres vías los procesos que pueden estar asociados con la emergencia de enfermedades**. La primera, incluye la **invasión de un nuevo patógeno en un ecosistema**, a través de su introducción, establecimiento y diseminación. La segunda vía considera la **aparición de nuevas enfermedades en respuesta a los cambios medioambientales en un ecosistema**, que conducen a la intensificación de la enfermedad y a su extensión dentro de agrosistemas completos; y la tercera vía contempla la **aparición de nuevas variantes patogénicas de los agentes fitopatógenos a través de procesos evolutivos**. Para el análisis de los procesos que puedan conducir a la emergencia de enfermedades, Willocquet et al. (2020) han propuesto un modelo poliético basado en procesos, que analiza las condiciones para la emergencia. Este modelo simula epidemias po-

liéticas en estaciones de cultivo sucesivas, las pérdidas de cosecha que ocasionan, y la supervivencia del patógeno entre estaciones, en un marco de trabajo que considera un solo evento de introducción de una variante patogénica inmigrante en un sistema en el que ya existe una estirpe establecida. Mediante modelos deterministas y estocásticos de simulación, los autores estiman la probabilidad, umbral de población y tiempo hasta la emergencia de la enfermedad, así como la pérdida de cosecha asociada a esta. Los análisis se centran en dos parámetros: (i) la tasa relativa de reproducción como medida de la velocidad con que se desarrolla la epidemia; y (ii) la tasa relativa de mortalidad del patógeno como una medida del decaimiento de sus poblaciones entre estaciones. Las conclusiones del estudio señalan que la estocasticidad es un elemento crítico en la emergencia de enfermedades, y sugieren que: (i) se requieren una serie de eventos de introducción independientes; (ii) es necesario un incremento explosivo en el tamaño de la población del patógeno exótico precedido de muchas estaciones de crecimiento de presencia críptica tras la introducción; y (iii) la supervivencia del patógeno exótico entre estaciones de cultivos es tan importante como su crecimiento durante una estación.

C5.4. Nuevas tecnologías para la adquisición de datos para estudios en epidemiología

El rápido crecimiento de la Agricultura de Precisión que utiliza información proporcionada por tecnologías ya contrastadas, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de posicionamiento global, los Sistemas de Apoyo a la Toma de Decisiones (SATD), la teledetección y la estadística espacial, permiten mapear las características esenciales de un paisaje y determinar la posible correlación entre esas características y los patrones espaciales de la dinámica de la enfermedad (Plantegenest et al., 2007). A esto hay que añadir la información que puedan proporcionar las nuevas tecnologías de la información, como la visión computarizada y la inteligencia artificial (Patrício y Rieder 2018).

C5.4.1. Uso de las tecnologías SIG en estudios epidemiológicos

Las tecnologías SIG se han utilizado con éxito para el diseño de mapas de riesgo de establecimiento y expansión de agentes fitopatógenos de diversa naturaleza, en su mayoría causantes de enfermedades foliares como los oomicetos *Bremia lactucae* y *Phytophthora ramorum* causantes, respectivamente, del mildiu de la lechuga y de la muerte súbita del roble en California (Meentemeyer et al., 2004; Wu et al., 2005); pero también de nematodos fitoparásitos como *Radopholus similis* en cultivos hortícolas en China (Zhou et al., 2005), y *Rotylenchus reniformis* en algodón en Brasil (Mandal et al., 2013) donde la utilización de mapas de riesgo mediante técnicas de geoestadística permitió reducir en 40 % las pérdidas de cosecha en algodón. Por otro lado, la integración de modelos de predicción con bases de datos climáticos en SIG han permitido estimar el riesgo de infección por la bacteria *Pantoea stewartii* en maíz en Iowa (Nutter et al., 2002), y por *Phytophthora infestans* en patata (Hijmans et al., 2000; Zeuner y Kleinhenz, 2007); así como determinar la importancia y distribución de tipos de compatibilidad sexual de este último patógeno en México (Jaime-García et al., 2001), o explorar cambios en el riesgo global del mildiu causado por *P. infestans* bajo diferentes escenarios de Cambio Climático (Sparks et al., 2014). Entre las investigaciones que han abordado patógenos residentes en el suelo –además de las mencionadas anteriormente relativas a nematodos fitoparásitos– destacan: (i) el diseño de mapas de riesgo en función de características agronómicas como el tipo de suelo, para el chancro de *Acer saccharum* causado por *Fusarium* spp. en Vermont, EE.UU. (Bergdahl et al., 2002); (ii) la influencia de la proximidad de las plantaciones a ríos en la mayor incidencia de verticilosis –causada por el hongo *Verticillium dahliae*– en olivares de la provincia de Granada (Rodríguez et al., 2009); (iii) la influencia de los canales de distribución y de drenaje en cultivos de plátano infectados por la bacteria *Ralstonia solanacearum* en Colombia (Munar-Vivas et al., 2010); y (iv) la simulación del efecto de diversas medidas en el control de la podredumbre de

raíz y tallo causada por *Phytophthora drechsleri* f. sp. *cajani* en guandul o frijol de árbol (*Cajanus cajan*) en India (Pande et al., 2010). No obstante, salvo raras excepciones, el estudio se limita a un solo patosistema en relación al medioambiente.

C5.4.2. Sistemas de apoyo a la toma de decisiones

Los SATD sobre enfermedades de cultivos son herramientas que **recopilan, organizan, e integran la información relacionada con el cultivo y el riesgo de una enfermedad**, para recomendar las acciones más apropiadas para su gestión integrada, una vez que dicha información es analizada e interpretada (Magarey et al., 2002). Los elementos a considerar en un SATD son: (i) variables relativas al patosistema, i.e., las características del patógeno, de las condiciones medioambientales, de la enfermedad y del huésped; (ii) variables relacionadas con la historia previa del lugar de cultivo; y (iii) variables relacionadas con las características de la epidemia, como inóculo primario, inóculo secundario, tasa de infección, período de incubación, etc. Los SATD, no obstante, se han **desarrollado fundamentalmente para el manejo de enfermedades causadas por agentes fitopatógenos que infectan la copa de los cultivos**, en los que combinando la información procedente de sistemas de predicción previamente desarrollados realizan recomendaciones para su control mediante la aplicación de PP. FF. Esta limitación puede ser debida a la mayor complejidad del ecosistema edáfico, que dificulta por una parte la modelización de los procesos asociados a las enfermedades causadas por patógenos residentes en el suelo, y por otra entorpece la obtención de datos experimentales (Roget, 2001). Entre los SATD disponibles para el manejo de patógenos residentes en el suelo destacan: (i) el implementado para la gestión de la muerte temprana de la patata causada por *V. dahliae* en Israel, para la elección del lugar de siembra en función del riesgo de infestación por el patógeno y el tipo de suelo (Goldstein et al., 2009); y (ii) los propuestos para la predicción del mal del pie del trigo causado por el hongo *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*, basados en las prácticas de cultivo, tipo de suelo y condiciones climáticas en Francia (Ennaïfar et al., 2007), o en el medioambiente e historia de cultivos previos en Australia (Roget, 2001). Otros SATD incluyen estreses bióticos y abióticos, como WebGro implementado para el manejo de los daños ocasionados en soja por el pedrisco y por dos importantes patógenos residentes en el suelo, el nematodo del quiste de la soja (*Heterodera glycines*) y el hongo *Rhizoctonia solani* causante de la podredumbre de raíz (Paz et al., 2004). En particular, varios SATD consideran la estimación del perjuicio ocasionado por nematodos, incluyendo: (i) el nematodo dorado de la patata (*Globodera rostochiensis*) basado en la cuantificación del inóculo del mismo en suelo (Evans et al., 2003); (ii) el nematodo barrenador del rizoma del plátano (*Radopholus similis*) que se basa en el uso de clones resistentes y rotación con cultivos no-huésped (Risède et al., 2009); y (iii) el nematodo nodulador del sistema radical (*Meloidogyne incognita*) en algodón, cuyo efecto reductor del crecimiento del cultivo en función de la densidad de inóculo se integra en el modelo de simulación del crecimiento del cultivo CROPGRO-cotton (Ortiz, et al., 2009).

C5.4.3. Detección remota de enfermedades de cultivos

La detección remota o teledetección comprende un conjunto de técnicas capaces de obtener información de un objeto sin que se tenga contacto físico con el mismo (Nilsson et al., 1995). La teledetección se basa en la medida de la energía electromagnética de la radiación solar que, tras alcanzar la superficie terrestre o los objetos que se encuentran sobre ella, es absorbida y reflejada o emitida (Nilsson et al., 1995; West et al., 2003). La cantidad y calidad de la radiación que es reflejada o emitida por un cultivo (reflectancia) es característica para la especie vegetal y las condiciones en que se desarrolla. De esta forma, cualquier alteración sobre la fisiología del cultivo respecto a su estado sano, ya sea de naturaleza biótica o abiótica, puede ser detectada potencialmente mediante cambios en su emisión electromagnética característica, también conocida como "firma o signatura espectral".

En general, las plantas sanas presentan valores de reflectancia en la región verde del espectro (~550 nm) ya que esta longitud de onda es reflejada más eficientemente comparada con las bandas azul, amarillo o rojo, que son absorbidas por los pigmentos fotoactivos. Las plantas enfermas, que en muchos casos presentan lesiones necróticas o cloróticas discretas en las hojas, suelen presentar valores elevados de reflectancia en la región del espectro visible (~400-700 nm), especialmente en las bandas de absorción de clorofila. Por el contrario, la reducción de biomasa unida a la senescencia prematura, reducción del crecimiento o defoliación, resulta en una reducción de la reflectancia en la región del infrarrojo cercano (~700-1.200 nm). La región térmica (~8.000-12.000 nm) es particularmente útil para el estudio de enfermedades, ya que permite estimar la temperatura superficial de la vegetación, y es bien conocido que cualquier estrés que perjudique la capacidad de transpiración del cultivo puede resultar en un incremento relativo de temperatura en la superficie de las hojas (Nilsson, 1995; West et al., 2003).

Además de estas alteraciones básicas, en la firma espectral de una planta o cultivo pueden ocurrir otros cambios debido a la infección por agentes fitopatógenos específicos (Nilsson, 1995; West et al., 2003) y ser, por tanto, potencialmente utilizados con carácter diagnóstico y de monitorización de la enfermedad. En este sentido se están desarrollando investigaciones que permitan la identificación diferencial de distintos tipos de estreses, ya sean de naturaleza biótica o abiótica. Esto hace posible la diferenciación entre las carencias de nitrógeno y las infecciones fúngicas por la roya o el oídio en trigo (Tartachnyk et al., 2006), o de esta misma carencia nutricional en la remolacha azucarera frente a la infección por el virus de la rizomanía (BNYVV) (Steddom et al., 2003).

Hasta fechas recientes, gran parte de las investigaciones realizadas en este campo se han centrado en la utilización de sensores terrestres multispectrales o hiperespectrales de diferente naturaleza. Estas investigaciones han permitido identificar regiones espectrales características de distintas enfermedades causadas por una gran variedad de agentes fitopatógenos en diferentes cultivos, que es información esencial para la posterior aplicación de esta tecnología a mayor escala espacial. En este sentido, la utilización de sensores aerotransportados se ha mostrado efectiva para la detección de diversas enfermedades incluyendo, a modo de ejemplo, el mildiu del tomate (*P. infestans*) en el Valle de Salinas (California) utilizando el sensor AVIRIS (*Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer*) (Zhang et al., 2003), o la necrosis de la vaina del arroz (causada por *R. solani*) en Arkansas con el sensor ADAR (*Airborne Data Acquisition and Registration*) (Qin y Zhang, 2005). Diversos estudios se centran no solo en la detección o discriminación de plantas afectadas por enfermedades, sino también en la estimación de la severidad de los ataques y mapeado de su distribución en la parcela o a nivel regional (Franke and Menz, 2007; Huang et al., 2007; Mahlein et al., 2013; Zhang et al., 2019) con clara aplicación práctica en el control (Huang et al., 2007; Yang et al., 2010), el fenotipado masivo (Furbank y Tester, 2011; Shakoore et al., 2017) o la estimación de pérdidas debidas a las enfermedades (Zhang et al., 2019).

Los nuevos métodos de teledetección basados en imágenes hiperespectrales y térmicas de alta resolución han demostrado tener un gran potencial para: (i) la detección del estrés hídrico y la estimación del funcionamiento fotosintético a través de la detección de fluorescencia clorofílica emitida por la vegetación (Zarco-Tejada et al., 2012); (ii) la estimación de pigmentos fotosintéticamente activos, como las xantofilas (Suárez et al., 2009), carotenos y antocianinas a través de índices espectrales (PRI entre otros); (iii) la estimación del contenido clorofílico mediante índices espectrales de banda estrecha; y (iv) la estimación de la temperatura de la superficie vegetal como indicador de la transpiración de la vegetación (Berni et al., 2009a; 2009b; Zarco-Tejada et al., 2012). Esta tecnología se ha demostrado efectiva para la detección de la infección temprana del olivo por *V. dahliae*, y hace posible discriminar entre niveles de severidad de la verticilosis en las plantaciones mediante la utilización de imágenes térmicas, multispectrales e hiperespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados a escala de parcela (Calderón et al., 2013), o tripulados a escala de comarca (Calderón et al., 2015). La temperatura de la copa,

así como los índices CWSI, B, BG1, BR1 y FLD3 se identifican como buenos indicadores para detectar la verticilosis del olivo en las etapas iniciales de su desarrollo, mientras que los NDVI, PRI515, R/G, HI e índices de estimación de clorofila y carotenos demuestran ser buenos indicadores para la cuantificación de daño moderado o severo causada por dicha enfermedad; y ambos grupos de índices pueden ser de utilidad para el diseño de estrategias de gestión integrada de la verticilosis del olivo a escala de parcela y de comarca.

El uso de imágenes hiperespectrales y térmicas también se ha utilizado con éxito para la detección y monitorización de forma independiente de los síntomas causados en olivo por la verticilosis y por el decaimiento rápido inducido por la bacteria *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca*, es decir, cuando solo una de las dos enfermedades está presente en olivares afectados en España e Italia, respectivamente. Los rasgos de las plantas se derivaron de la imagen hiperespectral y térmica, e incluyeron índices fisiológicos e inversión de modelos de transferencia radiativa, emisión de fluorescencia inducida por el sol, índice de estrés hídrico, y una selección de índices hiperespectrales de banda estrecha. Estos índices permitieron discriminar entre las infecciones por *V. dahliae* y *X. fastidiosa*, con una tasa de falsos positivos del 9 % y precisión global del 98 % para *V. dahliae*, y una tasa de falsos positivos del 4 % y precisión global del 92 % para *X. fastidiosa* (Poblete et al., 2021). En esta misma línea, utilizando asimismo imágenes hiperespectrales y térmicas de alta resolución en diferentes especies huésped (olivar y almendro) de distintos patógenos (*V. dahliae* y *X. fastidiosa*) y bajo niveles de estrés hídrico, se han identificado vías espectrales divergentes específicas del patógeno y de la especie huésped que permiten discernir entre los síntomas de naturaleza biótica causados por aquellos. Además, Zarco-Tejada et al. (2021) han demostrado cómo desacoplar la dinámica espectral biótica-abiótica permite reducir la incertidumbre por debajo del 6% para diferentes plantas huésped infectadas por *X. fastidiosa*. Adicionalmente, este abordaje permitió discriminar entre las infecciones por *V. dahliae* y *X. fastidiosa* que se desarrollan con síntomas similares en olivo, con una precisión global del 92 %.

Por otro lado, Camino et al. (2021) han demostrado cómo los cambios espectrales revelados por diferentes conjuntos de rasgos de vegetación en parcelas de almendro afectadas por la quemadura de las hojas causada por *X. fastidiosa* en Alicante (i.e., pigmentos, contenido estructural o de proteínas en hoja), pueden ayudar a conocer la dinámica espacial de diseminación de la bacteria. Para ello acoplaron un modelo epidemiológico de diseminación espacial con la probabilidad de infección por *X. fastidiosa* estimada por un modelo basado en algoritmos de aprendizaje automático (*Support vector machine*) basado en indicadores fisiológicos. El trabajo demuestra cómo la combinación de modelos de diseminación espacial y la teledetección puede conducir a predicciones precisas de la distribución espacial de árboles afectados por enfermedades causadas por *X. fastidiosa*.

C5.5. Aplicaciones prácticas de los estudios epidemiológicos para el control de enfermedades

C5.5.1. Manejo de enfermedades causadas por patógenos emergentes basado en modelos de riesgo

La erradicación de patógenos emergentes en un territorio se suele abordar mediante la eliminación de las plantas huésped en un círculo de radio constante desde la planta infectada, con objeto de asegurar la eliminación de posibles plantas infectadas, pero aún asintomáticas (Cunniffe et al., 2015). Como alternativa, Hyatt-Twynam et al. (2017) han propuesto un método con base epidemiológica para el control de la cancrrosis de los cítricos causada por la bacteria *Xanthomonas citri* subsp. *citri* en Florida (EE.UU.). Este

procedimiento de control, basado en el riesgo, elimina preferentemente aquellas plantas para las que se estima una mayor capacidad de transmisión del patógeno al resto de la población, determinada por un modelo epidemiológico basado en los patrones de diseminación del patógeno y la población de plantas eliminadas, que por su complejidad podría no ser suficientemente comprensible para las partes interesadas afectadas. Esto motivó el desarrollo de una estrategia de erradicación que se aproxima a la anterior de eliminación de plantas huésped en un círculo, pero basada en radios de eliminación del huésped que varían según la ubicación y que se fijan con antelación de cualquier epidemia. No obstante, el control basado en el riesgo supera al control de radio variable, que a su vez supera al de la eliminación de radio constante normalmente aplicado. Este resultado es además robusto ante los cambios en los parámetros de diseminación y los patrones iniciales de distribución de las plantas susceptibles. Sin embargo, la eficiencia se reduce si los parámetros epidemiológicos se caracterizan incorrectamente.

C5.5.2. Modelos epidemiológicos para cuantificar la diseminación de patógenos transmitidos por vectores

En la actualidad, no suele estar disponible en muchos patosistemas la cuantificación de parámetros epidemiológicos importantes y de utilidad para la evaluación y manejo del riesgo, en particular en aquellos que requieren la transmisión de los patógenos por vectores, como son la tasa de transmisión, el período asintomático y el tiempo hasta la muerte del huésped en condiciones de campo. White et al. (2020) han desarrollado un método bayesiano para inferir el valor de parámetros epidemiológicos, ajustando y comparando modelos epidemiológicos compartimentales con evaluaciones frecuentes de la progresión de la enfermedad, en múltiples parcelas de olivar afectadas por el decaimiento rápido causado por *X. fastidiosa* subsp. *pauca* que es transmitida principalmente por el cicadélido *Philaenus spumarius* en el sur de Italia.

Los modelos utilizados permiten obtener estimaciones de parámetros epidemiológicos clave, como la tasa de transmisión en diferentes estados de desarrollo de la enfermedad, la duración del período de infección asintomática, y el tiempo hasta la desecación completa o muerte del árbol (Fig. 1). Los resultados obtenidos con dichos modelos indican que son de aplicación directa en las políticas de erradicación y contención de la bacteria impulsadas por la Unión Europea para el control de dicha enfermedad (Decisión EU 2020/1201).

Los modelos estimaron que cada árbol infectado y sintomático propicia la infección de alrededor de 19 árboles por año (intervalo creíble del 95 % de confianza, 14-26). Por el contrario, en la fase asintomática

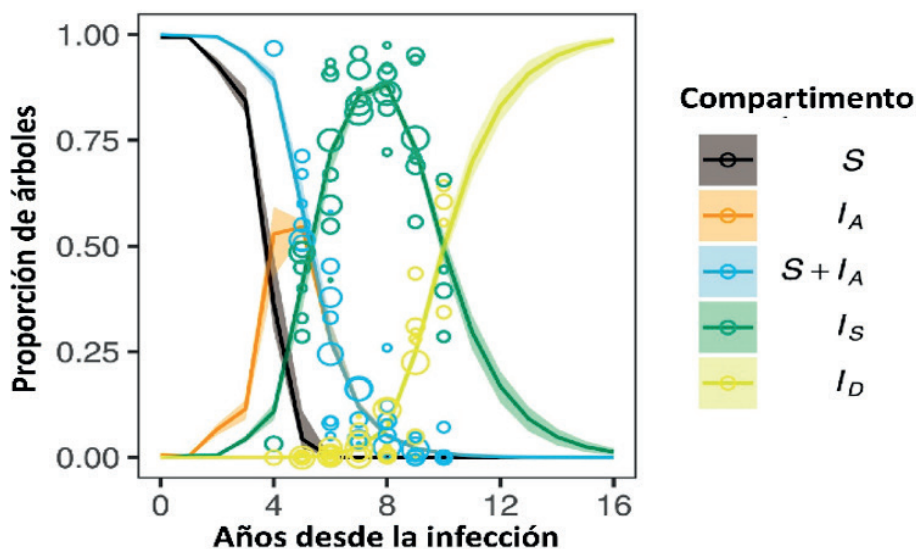


Figura 1. Modelos de progresión de enfermedad estimados en olivos afectados por el síndrome de decaimiento rápido causado por *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca* en condiciones naturales en Apulia (Italia), para un modelo compartimental tipo SEI (Susceptible (S)-Expuesto (E)-Infectado (I)). Las líneas muestran la frecuencia media estimada para cada uno de los compartimentos para 10.000 muestras, las líneas horizontales el intervalo del 95 % de credibilidad. Los puntos corresponden al porcentaje de árboles asintomáticos ($S+I_A$), de árboles con síntomas (I_S), y de árboles con desecación extensa (I_D) en 17 parcelas de olivar. El tamaño de los puntos indica el número de árboles en cada parcela (Adaptado de White et al., 2020). 'S': árboles sensibles no infectados. 'IA': árboles infectados. .

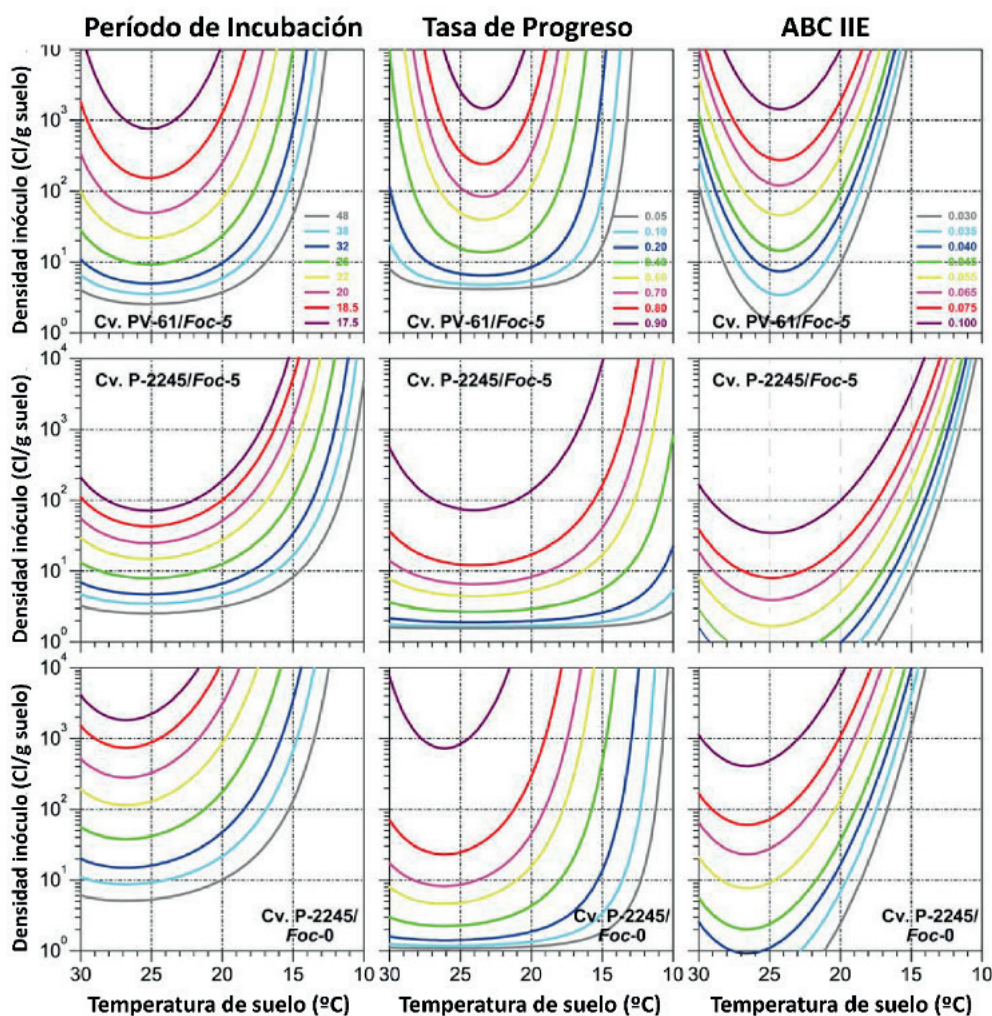
de la infección, que tiene una duración media de 1,2 años, la transmisibilidad desde los árboles infectados es baja o insignificante (intervalo creíble del 95 % de confianza, 1,0-1,3 años). Por otro lado, se estimó que la desecación completa o muerte del árbol se produce aproximadamente a los 4,3 años después de la aparición de los síntomas (intervalo creíble del 95 % de confianza, 4,0-4,6 años).

C5.5.3. Modelos epidemiológicos para el manejo de patógenos vasculares residentes en el suelo

C5.5.3.1. Modelización de la fusariosis vascular del garbanzo

El desarrollo de la fusariosis vascular del garbanzo causada por el hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* está influido por la virulencia de la raza del patógeno, la densidad de inóculo de la misma existente en el suelo, las condiciones ambientales (p. ej., temperatura del aire y del suelo, pH, humedad del suelo, etc.), y la susceptibilidad del cultivar (Landa et al., 2001; 2004; Navas-Cortés et al., 2007). Navas-Cortés et al. (2007) desarrollaron modelos para cuantificar el efecto sobre dicha enfermedad de la temperatura, la densidad de inóculo del patógeno -medida por el número de unidades formadoras de colonias (ufc)-, la susceptibilidad del cultivar, y sus interacciones, utilizando las razas 0 y 5 de *F. oxysporum* f. sp. *ciceris* que difieren en virulencia sobre los cvs. P-2245 y PV-61 de garbanzo. En dicho estudio se modelizó el desarrollo temporal de las epidemias, expresando: (i) el período de incubación (PI) y la tasa relativa de progreso de la enfermedad como funciones Weibull de la temperatura de incubación; y (ii) el área bajo

Figura 2. Gráficos de predicciones de riesgo de fusariosis vascular del garbanzo para diversos parámetros epidemiológicos de la curva de progreso de la enfermedad [recíproco del período de incubación, tasa intrínseca de progreso de enfermedad estimada por el modelo, y área estandarizada bajo la curva de progreso del índice de intensidad de la enfermedad (ABCIE)] en los cultivares de garbanzo 'P-2245' y 'PV-61' crecidos en suelo infestado con las razas 0 (Foc-0) o 5 de *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris*, en función de la densidad del inóculo y la temperatura del suelo (adaptado de Navas-Cortés et al., 2007).

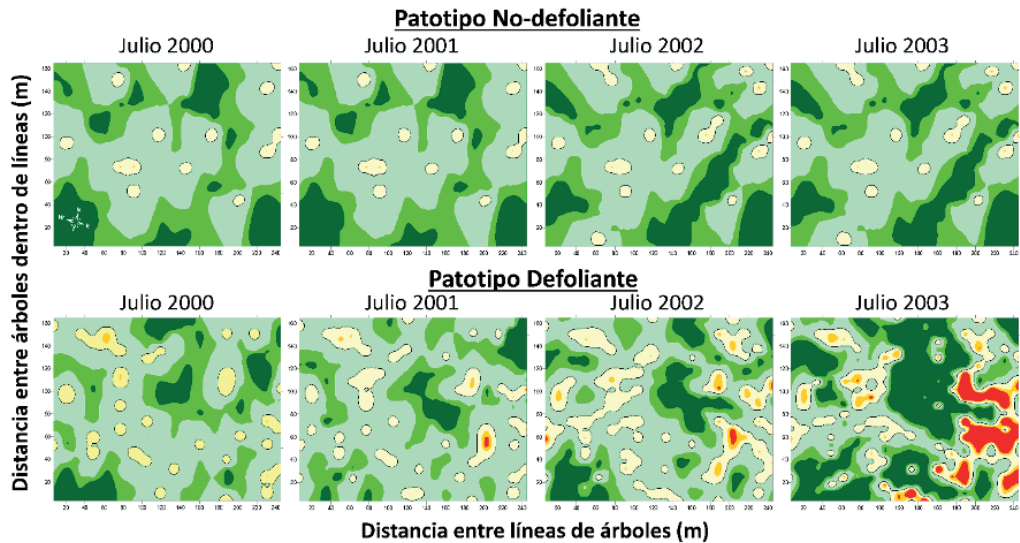


la curva de progreso de enfermedad estandarizada (ABCPEE) como función Beta de aquella. Ello permitió ajustar superficies de respuesta y modelos de riesgo para cada combinación raza de *F. oxysporum* f. sp. *ciceris*-cultivar de garbanzo, que relacionan funcionalmente la variación del PI, de la tasa de progreso de enfermedad, y del ABCPEE, en función de la densidad de inóculo del patógeno y de la temperatura del suelo (Fig. 2). Los modelos desarrollados indican que los valores umbrales de densidad de inóculo de *F. oxysporum* f. sp. *ciceris* y de temperatura del suelo necesarios para el desarrollo de epidemias severas de la fusariosis vascular, dependen de la virulencia de la raza del patógeno y en segundo término de la susceptibilidad del cultivar de garbanzo a dicha raza. Así, para las razas 5 y 0, en los cvs. 'PV-61' y 'P-2245' se alcanzaron valores intermedios de las variables dependientes citadas a 24 y 26 °C, respectivamente. Por otra parte, los valores umbrales de densidad de inóculo para la raza 5, más virulenta, fueron de 1 a 5 ufc/g suelo en 'P-2245' y 10 a 100 ufc/g suelo en 'PV-61'. En cambio, para la combinación raza 0 y cv. P-2245 dichos umbrales fueron de 5 a 20 ufc/g suelo. Asimismo, se demostró que estos factores interactúan de forma compleja entre sí, de manera que niveles subóptimos o restrictivos de uno de ellos (p. ej., la temperatura) pueden ser compensados por niveles óptimos de otros (p. ej., la densidad de inóculo o la raza del patógeno), o viceversa. La utilización de los modelos de riesgo desarrollados puede ser de ayuda para la gestión integrada de la fusariosis vascular del garbanzo, mediante la elección del lugar de siembra en función de la raza del patógeno presente en el suelo, su densidad de inóculo, la resistencia del cultivar de garbanzo y las condiciones ambientales, minimizando así el riesgo de epidemias severas.

C5.5.3.2. Modelización espacio-temporal de la verticilosis del olivo

La extensión de la verticilosis en olivar se ha venido atribuyendo preferentemente al establecimiento de nuevas plantaciones en suelos infestados por el patógeno y/o al uso de material de plantación infectado por este (Thanassoulopoulos, 1993). Sin embargo, mediante la modelización de la dinámica temporal y espacio-temporal de epidemias de verticilosis, Navas-Cortés et al. (2008) demostraron que infecciones iniciales e incipientes de un escaso número de olivos por el patotipo defoliante de *V. dahliae*, pueden originar epidemias severas de verticilosis en olivares jóvenes de regadío y alta densidad en un corto periodo de tiempo. En dicho estudio, los autores encontraron que la incidencia de verticilosis (porcentaje de plantas enfermas) progresó en el tiempo siguiendo un **modelo logístico de sigmoide múltiple** (epidemia poliética), en el que se pudieron distinguir una sucesión de ciclos de incremento de la incidencia de la enfermedad en cada una de las campañas, cuya tasa de infección aparente fue máxima entre final de invierno-principio de primavera y mínima durante el periodo verano-otoño. Hay que destacar que este **progreso sigmoide es inusual en epidemias causadas por inóculo residente en el suelo**, como es el caso de la verticilosis, que resultan de un sólo ciclo de infección y se suelen ajustar a un modelo monomolecular. Por otro lado, los modelos de distribución espacial indicaron que los nuevos árboles afectados por la verticilosis fueron apareciendo adyacentes a los ya enfermos, dando lugar a rodales de árboles afectados cuyo número y extensión aumentó con el tiempo de acuerdo con un **patrón de agregación contagiosa** que se demostró mediante análisis temporal de índices de distancias (SADIE). Estos resultados sugieren que **la infección de un árbol por el patotipo defoliante de *V. dahliae* influyó sobre la infección de árboles inmediatos adyacentes, y dicha influencia fue más intensa entre los árboles que se encontraban más cercanos entre sí, en una hilera, que entre árboles más alejados que se encontraban en hileras adyacentes**, hecho que no ocurre en árboles infectados por el patotipo no defoliante (Fig. 3) (Navas-Cortés et al., 2008). Además, fue plausible inferir que **el mencionado proceso contagioso es mediado por la diseminación por el viento de hojas infectadas, que caen al suelo en gran número desde los árboles sintomáticos**, porque el estudio se realizó en una plantación nivelada, regada por goteo y manejada por prácticas de no laboreo. Estos resultados señalan a **las hojas caídas de árboles infectados como diana ineludible para las acciones de gestión integrada de la verticilosis del olivo causada por el patotipo defoliante de *V. dahliae***.

Figura 3. Mapas de distribución espacial de agrupamientos en base a los índices de agrupamiento estimados por el análisis espacial de índices de distancia (SADIE), para el número de olivos del cv. 'Arbequina' infectados por el patotipo no defoliante (Paneles superiores) o defoliante (Paneles inferiores) de *Verticillium dahliae* en la primavera de los años 2000 a 2003. Los ejes indican la distancia en metros de cuadrantes de 2×2 árboles con el eje y en la dirección de las filas. Las áreas con índices de agrupación $vi > 1.5$ (muy por encima de lo esperado) y $1.5 > vi > 1$ (ligeramente por encima de lo esperado) se representan en rojo y naranja, respectivamente. Del mismo modo, las áreas con índices de agrupamiento $vj > 1.5$ (muy por encima de lo esperado) y $1.5 > vj > 1$ (ligeramente por encima de lo esperado) están representados por verde oscuro y claro, respectivamente (Adaptado de Navas-Cortés et al., 2008).



C5.6. Consideraciones finales: Retos para la modelización de enfermedades de las plantas

Cunniffe et al. (2015a) han identificado 13 retos principales a los que ha de enfrentarse la modelización de enfermedades de las plantas, agrupados en función de que el objeto de la modelización sea el huésped (4), el patógeno (5) o el control (4), que son los siguientes: (i) la necesidad de conectar los modelos epidemiológicos con la producción de los cultivos agrícolas y los servicios ecosistémicos de masas forestales; (ii) los cambios temporales en la disponibilidad del huésped, desde los órganos a las poblaciones; (iii) la captura del patógeno de la estructura espacial del huésped; (iv) considerar no sólo especies huésped individuales, sino múltiples especies de huéspedes cultivados o alternativos; (v) modelos de diseminación del patógeno que incluyan tanto los factores meteorológicos como los antropomórficos; (vi) el desarrollo de modelos de redes para modelos de diseminación mediada por humanos; (vii) considerar la variación temporal en la infectividad del patógeno; (viii) tener en cuenta el efecto de la preferencia del vector en la transmisión; (ix) incluir no solo especies de patógenos individuales, sino sus posibles variantes patogénicas, múltiples patógenos y su evolución; (x) la utilización de modelos que optimicen la detención del patógeno; (xi) la optimización del control de enfermedades en sistemas heterogéneos; (xii) en relación a los aspectos económicos, aplicar la teoría de control también a los paisajes; y (xiii) la utilización de los modelos por los gestores políticos y partes interesadas (Cunniffe et al., 2015b).

En este mismo sentido, Garrett et al. (2022), en una revisión reciente, indican que los nuevos enfoques de modelización en Fitopatología requieren: (i) que los modelos incorporen los cambios sustanciales en la futura distribución de las plantas huésped, vectores y enemigos naturales (p. ej., Bebbler, 2015); (ii) avances en la modelización para considerar el papel de los cambios rápidos en los factores climáticos en la aparición, resurgimiento, diseminación y propagación de los patógenos (p. ej., Lipkin, 2013); y (iii) incorporar en los modelos de riesgo la conectividad de las zonas de cultivo (Xin et al., 2020), la favorabilidad del clima, la conectividad aérea (p. ej., Meyer et al., 2017), el comercio, el transporte, y la gestión (p. ej., Baker et al., 2021), para con ello proporcionar información sobre enfoques proactivos a fin de prevenir las invasiones de patógenos y el incremento local de sus poblaciones.

Los modelos epidemiológicos basados en inferencia Bayesiana son particularmente útiles para entender la dinámica espacial y temporal de las epidemias en las que existan largos períodos de infec-

ción asintomática y el desarrollo de síntomas transcurre con lentitud, y en las que con frecuencia únicamente se dispone de datos de campo, ya que la estimación de este tipo de parámetros es difícil y requiere largos períodos de tiempo cuando ha de llevarse a cabo experimentalmente en condiciones controladas.

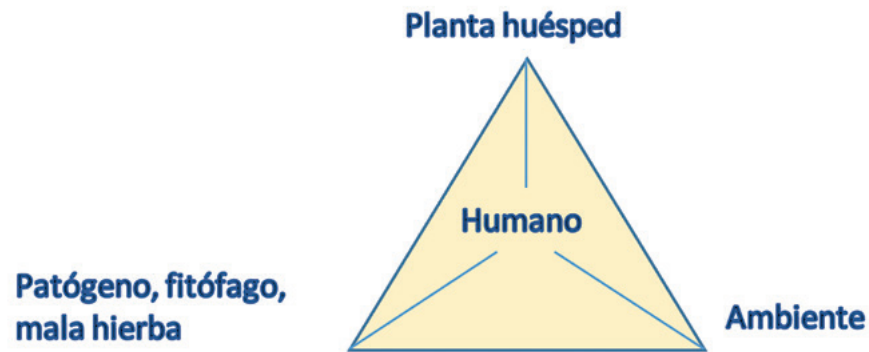
Finalmente cabe destacar que, tal y como se ha indicado en los apartados precedentes, los modelos disponibles: (i) son frecuentemente sistemas **específicos para un solo patosistema**; (ii) suelen ser **dependientes de la localidad** (Donatelli et al., 2017); y (iii) **raramente se actualizan una vez desarrollados**. Esto enfatiza la necesidad de contar con un buen conocimiento de las epidemias que permita evaluar la transferibilidad del modelo entre ubicaciones, así como del uso de estrategias de gestión adaptativa dinámicas en el tiempo (Hyatt-Twynam et al., 2017). En este sentido, **debemos considerar que los ciclos de vida de los agentes fitopatógenos están siendo alterados por los cambios medioambientales asociados al Cambio Climático**. Así, el calentamiento global está provocando, entre otros efectos, cambios fisiológicos en los patógenos y alteraciones de la sincronía de estos con el huésped y con sus vectores, lo cual conduce a **discrepancias entre las predicciones de los modelos y la situación real de la enfermedad y/o cultivo**. Por ello, estos modelos deberán ser re-parametrizados para poder tener en cuenta esos efectos. En este sentido, los mencionados cambios podrán promover la introducción y diseminación de especies exóticas invasoras en nuevos territorios (Bebber et al., 2013), que requerirá el desarrollo rápido de SATD para poder hacerles frente (cf., Apartado C5.4.2.).

C5.7. Dinámica de Poblaciones de artrópodos fitófagos

Como es el caso de las enfermedades de cultivos, el control de sus plagas -término considerado en este capítulo *sensu stricto* (*s. str.*)- se basa en la gestión de las poblaciones del agente nocivo, para lo cual es **clave el conocimiento de la dinámica de ellas en el tiempo y en el espacio**. Sin embargo, la naturaleza específica de cada uno de los dos fenómenos, plaga y enfermedad, determina que las estrategias para alcanzar dicho conocimiento sean diferentes. Así, como se indica en el Apartado C5.1., la dinámica espacio-temporal de las poblaciones de los patógenos se **determina indirectamente, estimando generalmente la cantidad de los síntomas que se desarrollan en el cultivo huésped** -asumiendo que guarda una relación directa con la cantidad del patógeno que los causan-, mientras que la dinámica poblacional de artrópodos fitófagos estudia **los cambios en el número de individuos de la población**. No obstante, tal como se ha expuesto anteriormente para los agentes fitopatógenos y las enfermedades de las plantas, también la abundancia de los artrópodos fitófagos es el resultado de las interacciones bióticas y abióticas del tetraedro mostrado debajo (Fig. 4).

En consecuencia, **mucho de lo explicado al inicio del capítulo sobre la epidemiología de las enfermedades de las plantas, se puede aplicar al estudio de la dinámica de poblaciones de los artrópodos fitófagos o de las malas hierbas que causan daños y pérdidas en los cultivos y masas forestales**. Sin embargo, es en las diferencias de las relaciones entre la planta huésped y los agentes fitopatógenos o los artrópodos fitófagos donde reside posiblemente el origen de las disparidades entre la epidemiología de las enfermedades y la dinámica de poblaciones de los fitófagos. Ello nos obliga a dar a estas un tratamiento diferenciado en este capítulo, a pesar de que **en la raíz de ambas disciplinas reside el mismo principio ecológico de relaciones entre las poblaciones de un parásito y su huésped**, moduladas por el medioambiente que comparten, y el objetivo común de que a través de su comprensión es posible optimizar la gestión de los problemas que origina el mantenimiento de la sanidad de los cultivos y masas forestales. Ocasionalmente, sin embargo, las estrategias operacionales de entomólogos y patólogos agroforestales pueden coincidir, como son los casos del estudio en los cambios temporales de la concentración en el aire de esporas de un hongo fitopatógeno capturadas por una trampa volumétrica (se sigue

Figura 4. Tetraedro de relaciones que se dan entre los agentes nocivos (sean fitopatógenos, fitófagos, o malas hierbas), la planta huésped susceptible, el ambiente al que están sometidos todos ellos y la actividad humana en la agricultura o la silvicultura.



el número de orgánulos de determinado estado vital de la población del patógeno) o el seguimiento en plantaciones de maíz del porcentaje de cada hoja con amarilleo en el caso de ácaros fitófagos (se sigue el efecto en la planta causado por el organismo nocivo).

Otro aspecto que distingue a los cambios en el espacio y el tiempo debidos a la acción de los agentes fitopatógenos de los causados por los artrópodos fitófagos, respectivamente, se refiere a la **relación entre la cantidad de daño causado por una población de fitófagos en una planta y el número de individuos en ella** –o integral de insectos \times día–. Esa relación suele ser lineal en el caso de los fitófagos, excepto en las ocasiones en las que el número de individuos es bajo y la planta posee una cierta capacidad de compensación de los daños infringidos por esos pocos individuos. Ello permite en ocasiones hacer el seguimiento de la población de fitófagos midiendo la cantidad de daño –p. ej., el porcentaje de hojas comidas–. En el caso de las enfermedades, la relación entre la cantidad del agente fitopatógeno y la incidencia (proporción de plantas afectadas) o intensidad (cantidad de tejido afectado) de enfermedad raramente es lineal, sino mucho más compleja por la propia complejidad de la relación entre cada planta huésped y el patógeno.

En definitiva, esta parte del capítulo está dedicada a la dinámica de poblaciones de artrópodos fitófagos –que en buena medida se puede aplicar a la dinámica de malas hierbas–, y en ella se **pretende describir, modelizar y predecir los cambios en el tiempo y en el espacio en el número de individuos de la población de aquellos**. Ello debe permitir: (i) mejorar sensiblemente la gestión de sus poblaciones al poder cuantificar la influencia de los diversos factores bióticos y abióticos sobre la abundancia de fitófagos; (ii) valorar la eficacia de diversas posibilidades disponibles para su gestión integrada (GI); y (iii) predecir los valores esperables de esa abundancia a lo largo del cultivo o desarrollo de la masa forestal. Las decisiones de GI serían óptimas si la modelización de los cambios poblacionales de fitófagos se acompañara con la de la fenología de la planta cultivada, dado que el daño, y por tanto la pérdida de valor del cultivo o masa forestal, es diferente según el estado fenológico de la planta huésped a igualdad de población de fitófagos.

C5.8. Componentes del crecimiento de una población de artrópodos fitófagos

El crecimiento de una población de artrópodos, al igual que el de cualquier organismo vivo, no se produce a una tasa constante sino variable en función de las características de sus individuos y del medioambiente biótico y abiótico en el que viven. Esa tasa es el resultado de la respuesta de las diferentes fases del ciclo de vida del artrópodo a los valores de los factores del medio.

El ciclo de vida de los artrópodos fitófagos se puede empezar a describir cuando la hembra adulta se disemina y encuentra una planta huésped apta, en la que realiza la puesta en el caso de artrópodos ovíparos, o produce juveniles en el caso de los vivíparos. Es corriente que la descendencia se alimente en la misma planta o en las plantas adyacentes, y no es hasta alcanzar el estado adulto cuando los individuos de la población se diseminan para encontrar plantas idóneas para que los nuevos descendientes inicien su desarrollo y empiecen un nuevo ciclo dando lugar a una segunda generación. Así pues, **los cambios en el número de individuos de una generación a la siguiente referidos a unidades de tiempo y superficie dependen:** (i) de la natalidad (fecundidad y fertilidad); (ii) de la **velocidad de desarrollo**; (iii) de la mortalidad a lo largo del desarrollo; y (iv) de la diseminación fuera del área considerada al estudiar la **dinámica de la población**.

Los diversos componentes de la tasa de crecimiento de cada artrópodo vienen influidos por los diversos factores bióticos y abióticos del medioambiente. Entre los primeros son particularmente decisivos la planta huésped (cf., Capítulo C3.), la competencia de otros herbívoros, y los enemigos naturales (cf., Capítulo C4.). Entre los factores abióticos, los climáticos son los más importantes y entre ellos los más relevantes son la temperatura, la humedad relativa, la luz (tanto su cantidad y calidad como su periodicidad), y el viento. Téngase en cuenta que esos factores abióticos influyen directamente en el crecimiento poblacional de los artrópodos fitófagos, pero también de manera indirecta a través de los factores bióticos, básicamente la planta huésped y los enemigos naturales de la especie plaga.

C5.9. Modelos de dinámica de poblaciones

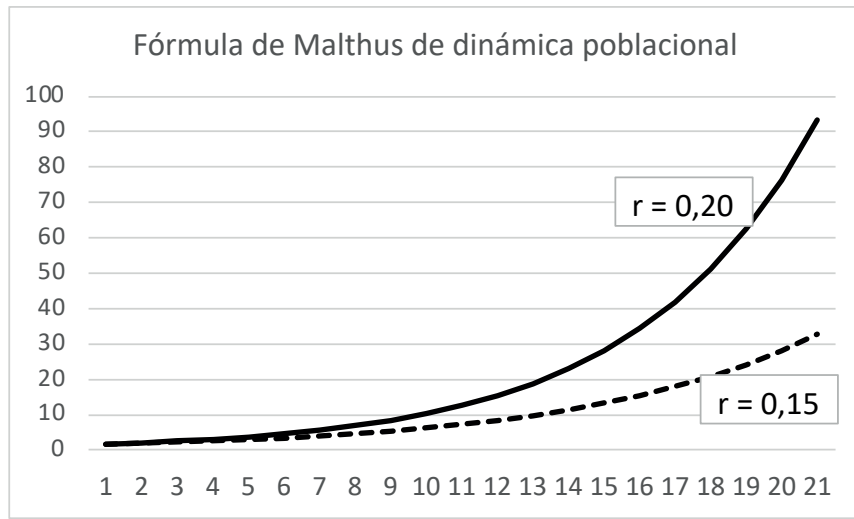
La observación del fenómeno "plaga" conduce a preguntarse acerca de por qué y cómo cambia la abundancia de individuos en las poblaciones de artrópodos fitófagos. Las conclusiones de las investigaciones sobre estos temas han llevado a que el estudio de las plagas haya hecho una gran contribución a la demografía de poblaciones animales, y más aún desde que la estrategia de la moderna GI de plagas (GIP) se basa en conocer y prever la cantidad de artrópodos fitófagos en un cultivo, masa forestal o paisaje agrícola y forestal. Desde el clásico texto de Andrewartha y Birch (1954), la pregunta que se ha hecho el estudioso de las poblaciones ha sido: **¿por qué la gran mayoría de poblaciones naturales están en equilibrio más o menos estable, aunque sea a través de fluctuaciones más o menos pronunciadas?, y ¿qué factores subyacen en esa compleja regulación?** En las líneas que siguen nos referiremos a los aspectos más significativos de la dinámica de poblaciones de artrópodos fitófagos que han permitido progresar en la GI de plagas (*s. str.*). Existen numerosos textos que exponen los aspectos más relevantes de la dinámica de poblaciones de artrópodos; señalemos, por ejemplo, el de Price et al. (2011).

Es clásico iniciar la exposición de los modelos de crecimiento con el modelo de Malthus, un demógrafo de las poblaciones humanas que en el siglo XVIII describió su crecimiento con la fórmula

$$N_t = N_0 e^{rt}$$

que es la versión integrada de la forma derivada que expresa el incremento relativo infinitesimal en el tiempo, $dN_t/dt = N_0 e^{rt}$, -también válido para las poblaciones de agentes fitopatógenos-. En dicha función, N_t es el número de individuos de la población en un momento 't'; ' N_0 ' indica el número de individuos en el momento inicial; 'e' es la base de los logaritmos neperianos; 'r' es la llamada tasa intrínseca de crecimiento de esa población y 't' el tiempo transcurrido desde el momento inicial hasta el momento 't'. Puede apreciarse fácilmente que con esa fórmula malthusiana, el crecimiento de la población es exponencial (Fig. 5) si mantenemos 'r' constante a lo largo del tiempo 't'.

Figura 5. Ejemplo de crecimiento poblacional según la ecuación de Malthus de crecimiento exponencial a lo largo de 21 generaciones. En la línea superior se ha utilizado una tasa intrínseca de crecimiento de 'r' = 0,20. En la inferior, se ha reducido la 'r' en un 25 % y después de 21 generaciones se ha reducido el tamaño de la población a un 35 %.

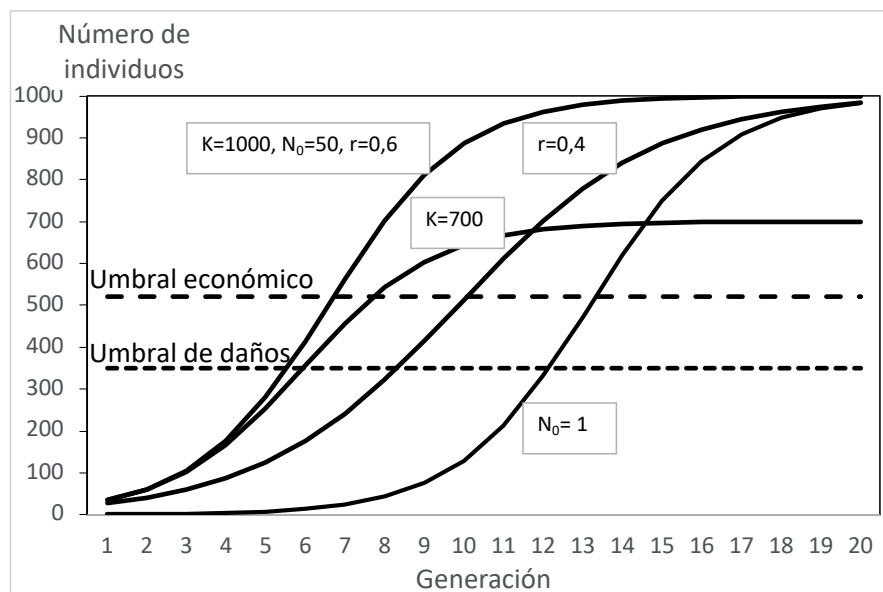


Ningún medio es constantemente favorable en el espacio y en el tiempo para la multiplicación y desarrollo de los individuos de una población, y por tanto de vez en cuando N_t va a verse reducido después de lo cual se reiniciará el crecimiento exponencial. Sin embargo, aun cuando las condiciones medioambientales se mantengan continuamente favorables para la población, esta no puede crecer indefinidamente ya que los recursos disponibles para cada individuo se van a ver progresivamente limitados a medida que aumenta su número. Por ese motivo, todos los hábitats tendrán una capacidad máxima de sostener una población y, a medida que la población se acerque a ese máximo, el crecimiento va a ser más lento. Precisamente ese es el fundamento de la fórmula siguiente debida a Verhulst y también llamada logística -aplicable también a las epidemias de plantas causadas por patógenos policíclicos, cf., Apartado C5.2.-:

$$N_t = K / [1 + ((K - N_0) / N_0) e^{-rt}]$$

donde los componentes son los mismos que en la fórmula de Malthus, aunque se ha añadido el valor 'K' de la capacidad máxima del hábitat, es decir, el número máximo de individuos de la población que ese hábitat puede sostener. En la Figura 6. se representa la dinámica de crecimiento de poblaciones cuando se varía la población inicial 'N₀', la capacidad máxima 'K' y la tasa intrínseca de crecimiento 'r' tal como se indica en la propia figura.

Figura 6. Formas que adopta el crecimiento de una población según la ecuación logística de Verhulst indicada más arriba del texto. En la curva superior K = 1.000; N₀ = 50; r = 0,6. En las otras curvas se ha modificado uno de esos parámetros según lo que se indica en la figura. Obsérvese en qué generación el número de individuos de la población alcanza el umbral de daños y por tanto deben tomarse medidas para que no se alcance el umbral económico.



Al comprobar cómo varía la generación en la que se alcanzaría el umbral de daños cuando variamos alguno de los parámetros de la ecuación de Verhulst, podemos valorar la efectividad de distintos métodos de control. Si suponemos que el umbral económico no varía cuando cambiamos la medida de control (siendo el coste de todos ellos el mismo o muy similar), el método más efectivo en nuestro ejemplo es disminuir la población inicial, por ejemplo utilizando semillas o plantas madre libres de artrópodos nocivos o con muy bajo nivel de infestación; a continuación situaríamos la estrategia de reducir la tasa intrínseca de crecimiento, por ejemplo utilizando un cultivar menos susceptible al fitófago o introduciendo un enemigo natural; y por fin disminuyendo la capacidad máxima del hábitat, como por ejemplo aumentando la biodiversidad de fitófagos.

C5.10. Distribución de individuos de una población de artrópodos fitófagos en el espacio, diseminación y metapoblaciones

En general, el hábitat donde viven y se reproducen los artrópodos fitófagos no es homogéneo en recursos y condiciones, sino que aquellos que se precisan para su desarrollo y reproducción se concentran en cantidad y calidad en determinados fragmentos del mismo. Ya vimos en un capítulo anterior (cf., Capítulo C3., Apartado C3.3.) que, para una especie de insecto fitófago, ser capaz de localizar una planta apta y poder desplazarse hasta ella es clave para su supervivencia y crecimiento poblacional. **Cuanto más específico de huésped sea un fitófago para alimentarse, más se va a concentrar en él y va a dejar vacíos los espacios o hábitats sin la planta buscada.** Otros factores, tanto bióticos como abióticos, aparte del alimenticio, van a determinar también la distribución de un artrópodo fitófago en el espacio. Para aquellos fitófagos que se alimentan esencialmente de las plantas cultivadas y de las malas hierbas asociadas a ellas, su agregación en algunas de las parcelas del paisaje vendrá condicionada por la presencia del cultivo huésped y la fenología de este preferida por el fitófago.

En situaciones de fuerte agregación del artrópodo en determinadas localizaciones, su dinámica poblacional estará condicionada por la capacidad de diseminación de los individuos entre agregados. Cuando esa diseminación es superior a la distancia entre agregados, la población crece como un todo ya que todos los individuos se pueden reproducir con el resto de individuos. Por el contrario, cuando la capacidad de diseminación de los individuos no permite superar la distancia entre los fragmentos de hábitat ocupados por cada agregado, la subpoblación de cada agregado crece de forma independiente de otras subpoblaciones y solo en circunstancias particulares habrá intercambio de individuos entre subpoblaciones. **Al conjunto de las subpoblaciones que habitan en fragmentos de hábitats y que solo ocasionalmente intercambian individuos entre ellos se le llama metapoblación.** El carácter más o menos aislado de cada subpoblación con respecto a las vecinas depende de la capacidad y hábitos de diseminación de los individuos de la subpoblación y de algunas características del medioambiente.

El comportamiento de diseminación en especies de fitófagos puede estar influido por sus características innatas, pero también por la disponibilidad de recursos en el fragmento ocupado por la subpoblación, de forma que cuando estos empiezan a ser escasos los individuos tienden a diseminarse. Un caso típico entre los artrópodos fitófagos es el de los pulgones: habitualmente, estos tienen todos sus estados de desarrollo ápteros, pero cuando los juveniles empiezan a percibir la escasez de recursos o la calidad decreciente de los mismos en el fragmento de hábitat, se desarrollan a adultos alados que se diseminan a otros fragmentos (p. ej., otra planta o incluso otra parcela de cultivo) sin ocupar. En la medida que el hábitat que ocupa la metapoblación entra dentro del radio de diseminación habitual de los alados de cada subpoblación, esa metapoblación se comportará como una población única.

Varias características del medio y de la especie de fitófago gobernarán la dinámica de las metapoblaciones de esa especie. Así, cuanto mayor sea la polifagia del fitófago, mayor será la diseminación entre subpoblaciones al ser más probable que un individuo de esa subpoblación encuentre cerca una planta huésped. Otras características que influyen sobre la dinámica de la metapoblación son el tamaño de las parcelas de cultivo o de los hábitats forestales, así como lo separados que estos estén en el paisaje agrícola o forestal. Cuando la preferencia del fitófago no sea solamente por una planta huésped, sino que también lo sea por determinados estados fenológicos de la planta huésped, la coexistencia de estados fenológicos del cultivo en un mismo paisaje va a facilitar que el fitófago se desplace entre parcelas con distintos estados fenológicos según su preferencia, y la metapoblación perdurará más en el paisaje que en el caso que haya homogeneidad fenológica de cultivos huésped.

C5.11. Monitorización de la dinámica poblacional de artrópodos fitófagos y muestreo en un cultivo o masa forestal

Queda recogida en líneas anteriores de este capítulo, y en capítulos anteriores, la habitual exigencia de conocer la densidad de población del artrópodo fitófago –e idealmente también de sus enemigos naturales- para tomar decisiones fundamentadas en la GIP. Ello exige que podamos monitorizar la dinámica poblacional de la plaga en el tiempo. Para ello necesitamos disponer de técnicas de muestreo del cultivo o masa forestal que sean fiables en cuanto a la precisión con que estimen dicha densidad, y también económicamente aplicables. No vamos a presentar aquí todas las variadas técnicas de muestreo que se están utilizando actualmente; más bien nos referiremos a los fundamentos del muestreo de artrópodos fitófagos. Al lector interesado en profundizar en esos aspectos de la ecología de artrópodos le recomendamos un texto clásico, Southwood (1978), otro más reciente Krebs (2014), y un artículo que sitúa específicamente el muestreo en relación con la GIP (Binns y Nyrop, 1992).

Una primera consideración que debemos hacer a la hora de estimar una densidad de población es la de distinguir entre densidad absoluta y densidad relativa. La primera de estas nos permite estimar el número de individuos de una población por unidad de superficie o volumen. Así, cuando utilizamos una sonda que extrae un cilindro de suelo y contamos en la muestra extraída el número de larvas de elatéridos (los llamados gusanos de alambre, plaga que habita en el suelo), podremos estimar el número de elatéridos por volumen o superficie de suelo. En cambio, si utilizamos trampas enterradas en el suelo que atraen los gusanos de alambre y en las que estos quedan atrapados, el recuento de larvas atrapadas no nos permitirá conocer cuántas larvas existen por unidad de superficie o volumen de suelo, y el número medio de larvas encontradas en las trampas lo referiremos a gusanos por trampa; decimos entonces que tenemos una estimación de densidad relativa. En ese ejemplo, la densidad relativa puede ser expresada como densidad absoluta si conocemos el radio de atracción de gusanos de alambre de las trampas, y referimos el número medio por trampa al volumen con ese radio de atracción. De forma similar, podremos pasar de una estimación de densidad relativa (número de individuos por unidad de hábitat) si conocemos el número de unidades por superficie o su volumen por hábitat. Por ejemplo, la densidad relativa expresada por el número de individuos por planta se puede traducir a densidad absoluta, si sabemos la densidad de plantas por unidad de superficie en la parcela de muestreo.

Hay muchos casos de GIP en los que los valores de umbrales de acción se dan en valores de densidad relativa; por ejemplo, en el seguimiento de las poblaciones de mosca de la aceituna, *Bactrocera oleae*, la monitorización se hace contando las capturas semanales en trampas de feromona, y cuando el valor medio de ellas sobrepasa un umbral, se toma la decisión de aplicar la confusión sexual con feromonas, o si se sobrepasa otro umbral se realiza un tratamiento insecticida (Miranda et al., 2019). La densidad relativa también es útil cuando queremos comparar las densidades de una población en lugares o

momentos distintos. Este es el caso habitual cuando se evalúa la eficacia de un método de control de plagas; se pueden comparar las densidades relativas de la plaga en lugares tratados y sin tratar, para concluir acerca de la efectividad de una técnica de control para reducir la cantidad de plaga en los lugares tratados respecto a los lugares testigo sin tratar, sin necesidad de conocer las densidades absolutas en cada lugar, una estimación que suele ser más costosa.

A menudo, el muestreo de una plantación o masa forestal necesario para monitorizar la dinámica poblacional de un fitófago, o para tomar una decisión para su control, es de alto coste. Ello es debido a que quien o quienes toman las muestras y hacen el recuento de individuos en cada muestra, han de ser técnicos con la formación necesaria para ello y capaces de identificar con seguridad y rapidez los individuos de la/s especie/s cuya densidad queremos conocer. Resulta por tanto imprescindible tener un plan de muestreo y recuento de individuos bien fundamentado: (i) con la unidad y técnica de muestreo contrastadas; (ii) el tamaño de la muestra acorde con la precisión requerida; y (iii) en la medida de lo posible, con los datos digitalizados para poderlos procesar estadísticamente, introducirlos en un modelo o comunicarlos rápidamente a quien tenga que tomar las decisiones adecuadas al resultado del muestreo. La bibliografía especializada, y los manuales solventes sobre la GIP en los principales cultivos, suelen aportar el conocimiento suficiente para que los técnicos lo puedan aplicar y adaptar a sus condiciones particulares (véase después de este párrafo la dirección electrónica para consultas en el MAPA). Para las plagas y cultivos más conocidos puede recurrirse a la bibliografía más especializada para obtener información más detallada.

La dirección de las guías de GIP del MAPA es:

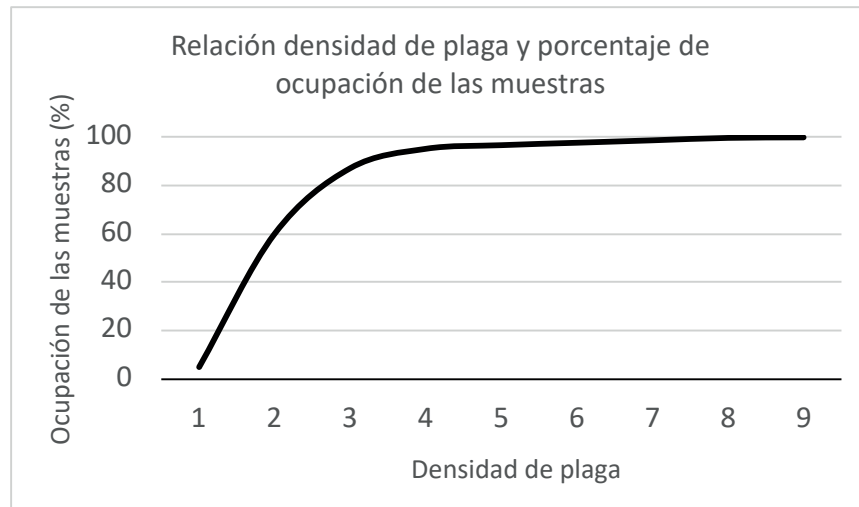
<https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sanidad-vegetal/productos-fitosanitarios/guias-gestion-plagas/>

Dijimos anteriormente que la monitorización de una población de artrópodos fitófagos y el muestreo de un cultivo o masa forestal, actividades imprescindibles en los modernos programas de GIP, suelen ser laboriosos y costosos. No es sorprendente, por tanto, que se haya invertido bastante esfuerzo de investigación en simplificar esas actividades sin que los programas resultantes pierdan efectividad y precisión. A título de ejemplos podemos citar: (i) los programas de **muestreo por presencia vs. ausencia**; (ii) los de **categorización de la abundancia en clases**; y (iii) los **muestreos secuenciales**. El ahorro que supone el uso de alguno de esos tipos de muestreo se puede pagar con una reducción de la precisión al medir el tamaño de la población, pero ese inconveniente se puede paliar, al menos en parte, aumentando el número de muestras a tomar y procesar.

En el primero de los métodos simplificadores del muestreo citados, de **presencia vs. ausencia**, se toman muestras y se clasifican en dos grupos: las que no contienen ningún individuo diana y las que contienen al menos un individuo, ya sean pocos o muchos. Si previamente se ha hecho un trabajo minucioso acerca de la relación existente entre la proporción de muestras vacías y la media de individuos por muestra, podremos deducir la densidad poblacional a partir de la proporción encontrada de muestras con presencia (ocupadas) y con ausencia (vacías), siempre que el tamaño de la unidad de muestreo sea la misma con la que se obtuvo la mencionada relación. Este método se suele aplicar en poblaciones no muy agregadas, y antes que lleguen a ser muy abundantes y ocupen la gran mayoría de unidades de muestreo. Estas condiciones para la aplicabilidad de un sistema de presencia/ ausencia en la estimación de densidad de población se pueden observar en la Figura 7.

En el segundo tipo de muestreo definimos *a priori* en qué clases de abundancia vamos a categorizar el número de individuos por unidad de muestreo; las clases de abundancia se suelen definir con escalas geométricas del número de individuos, p. ej., 0, 1-3, 4-9, 10-27, 28-81. Los intervalos de abundancia en la escala suelen ser crecientes con razones logarítmicas, por la sensibilidad visual humana a la hora de

Figura 7. Relación entre la densidad de plaga y el porcentaje de ocupación de las muestras que se necesita conocer para aplicar un programa de muestreo de presencia/ausencia.

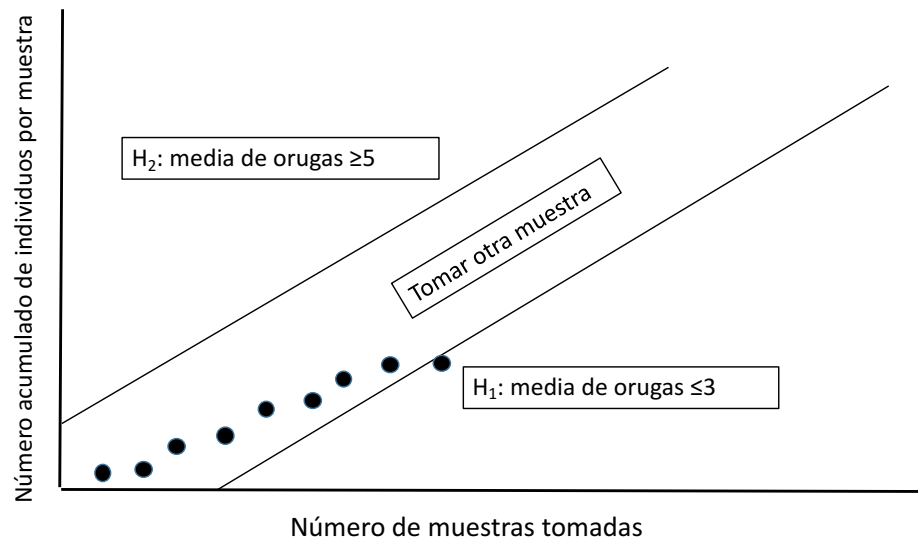


distinguir agregados de diferente tamaño al contar objetos crecientemente abundantes. Este es un tipo de muestreo muy utilizado para especies de artrópodos fitófagos con una gran capacidad de agregación y de aumentar sus poblaciones rápidamente, como suele ser el caso de muchos pulgones y ácaros.

En el muestreo secuencial no se fija antes de comenzar el número de muestras a tomar, como se hacía en los tipos anteriores, sino que se hace con el número acumulado de individuos después de haber tomado y hecho el recuento de un determinado número de muestras. Ello obliga a hacer el recuento de cada muestra después de haberla tomado y antes de tomar la siguiente. Este tipo de muestreo es muy utilizado cuando se va a tomar una decisión una vez estimada la densidad de población con una precisión determinada; por ejemplo, si se ha alcanzado la densidad de umbral de daños que justifique la suelta de un enemigo natural, p. ej., 3 orugas/hoja. Para disponer de un muestreo secuencial se establecen primero dos hipótesis (H_1 y H_2) acerca de la densidad existente en un momento determinado en un cultivo; p. ej., que $H_1 \leq 3$ o $H_2 \geq 5$ orugas/hoja, unos valores justificados por conocimiento previo. A continuación, se fija la probabilidad de que se cometan dos errores, ' α ' y ' β ', siendo ' α ' la probabilidad de rechazar la hipótesis H_1 (y por tanto aceptar la H_2) cuando la realidad es la H_1 , y la probabilidad ' β ' de que se rechace H_2 (y por tanto aceptar H_1) cuando la realidad es H_2 . Los valores de las probabilidades ' α ' y ' β ' se fijan en función de las consecuencias posibles de equivocarse en alguna de esas dos alternativas.

Figura 8. Ejemplo de muestreo secuencial con umbral de daños situado a 3 orugas/hoja, en el que se han definido dos hipótesis de medias (μ): $\mu_1 \leq 3$ o $\mu_2 \geq 5$. Los puntos representan el número de individuos acumulados encontrados en nueve muestras sucesivas, hasta que el valor acumulado cae en la zona de H_1 y se detiene el muestreo aceptándose H_1 , o cae en H_2 y se detiene el muestreo aceptándose H_2 . Las fórmulas que dan las dos rectas paralelas que definen las tres zonas se pueden encontrar en Krebs (2014), y son función de las medias de H_1 y H_2 , las probabilidades fijadas para los errores y ' α ' y ' β ', así como de la desviación típica obtenida en estudios previos de la distribución del organismo en el hábitat en el que se va a trabajar.

Fijados estos valores se dibuja el diagrama que se muestra a continuación (Fig. 8)



C5.12. Consideraciones finales: la dinámica de poblaciones en la Gestión Integrada de Plagas

El lector que haya tenido la constancia y el interés de llegar hasta aquí en la lectura de este Libro, habrá podido comprobar las numerosas veces que nos hemos referido a la complejidad de los fenómenos que transcurren en los agroecosistemas agrícolas o forestales que conducen al fenómeno de plaga, y que dificultan la comprensión de sus causas y su resolución. Y, sin embargo, ello contrasta con la simplicidad de la base sobre la que asienta la GIP: impedir que la densidad de una plaga alcance un determinado valor. Posiblemente, esa aparente simplicidad es uno de los motivos que han llevado a menospreciar el esfuerzo de investigación, desarrollo, transferencia tecnológica al usuario y la formación técnica necesarios para resolver los problemas de plagas en el contexto global de la agricultura y la silvicultura, y en el de la sociedad entera y el medioambiente.

Que la densidad y localización de las plagas cambian en el tiempo y el espacio es, por lo menos, fácil de percibir incluso por un observador escaso de preparación y curiosidad, máxime porque el fenómeno es compartido por todas las poblaciones animales y vegetales que nos rodean. Y no es raro que esa percepción sea seguida por la pregunta del por qué y si los cambios son constantes o variables y, en cualquiera de los casos, si son previsibles. De la inmediatez de la pregunta a la elaboración de la respuesta ha sido necesario el desarrollo de los estudios de la dinámica de poblaciones que nos permite describir aquellos cambios; estudios en un principio dirigidos a la población humana y con el tiempo adaptados incluso a los insectos fitófagos y agentes fitopatógenos. Aunque la formulación de modelos descriptivos y predictivos de la dinámica poblacional fuera en un principio muy sencilla, ya permitió desde entonces plantear hipótesis de las causas de esos cambios en el tiempo y en el espacio, y por tanto ayudaron a elaborar técnicas que impidieran el aumento del número de individuos en lugares y momentos apropiados. Aunque esas aportaciones de los modelos de dinámica de poblaciones de insectos fitófagos se han ido mejorando, es imprescindible que progresen sensiblemente más para que puedan dar cuenta de fenómenos actuales, y predecir situaciones futuras ante los cambios tecnológicos y sociales que repercuten en el sistema agroalimentario global. Ahí hemos señalado en capítulos anteriores, por ejemplo, la importancia de la modelización de la dinámica poblacional de plagas en predecir y paliar los efectos en ellas del cambio climático y la invasión constante de especies fitófagas exóticas.

Por otra parte, y volviendo a la aparente sencillez de la base de las decisiones en la GIP, impedir que las poblaciones de plagas alcancen una determinada densidad, pongamos ahora el foco de la atención en otro aspecto no tan sencillo: **conocer en todo momento y lugar cuál es la densidad de plagas que nuestro cultivo o masa forestal tiene, y además que la conozcamos con la exactitud y precisión requeridas.** Ello suele ser un proceso lento y costoso para los técnicos, que precisan de una preparación exigente. Hemos puesto varios ejemplos de procedimientos para muestrear el cultivo o masa forestal, pero ello no es suficiente para sectores agrícolas o forestales con rendimientos bajos que no pueden permitirse disponer de mano de obra suficiente. Sin duda, es necesaria la automatización de la toma de datos en el campo, como hemos indicado para las enfermedades de plantas más arriba en este mismo capítulo. En el Capítulo C2., Agricultura de Precisión, hemos señalado la emergencia de técnicas de inteligencia artificial y reconocimiento de imágenes, que nos pueden ayudar a estimar en tiempo real la densidad de población de insectos fitófagos con un buen ahorro de esfuerzo, coste y errores. Es probable que el mayor éxito en la aplicación de la GIP pase por esos caminos. También la Estadística, y en particular la Geoestadística, deben hacer sus aportaciones en el estudio de la distribución de las poblaciones de insectos. Digamos, por fin, que buena parte de lo dicho en este capítulo para los artrópodos fitófagos puede aplicarse también a sus enemigos naturales, un aspecto a tener muy en cuenta para la practicidad y eficiencia del control biológico, tal como se señala en el Capítulo C4.

C5.13. Bibliografía

- Andrewartha, H.G., y Birch, L.C. 1954. The Distribution and Abundance of Animals. Univ. Chicago Press, Chicago, U.S.A.
- Baker, R.E., Mahmud, A.S., Miller, I.F., Rajeev, M., Rasambainarivo, F., et al. 2021. Infectious disease in an era of global change. *Nat. Rev. Microbiol.* 20: 193-205.
- Bebber, D.P. 2015. Range-expanding pests and pathogens in a warming world. *Annu. Rev. Phytopathol.* 53: 335-356.
- Bebber, D.P., Ramotowski, M.A.T., y Gurr, S.J. 2013. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nat. Clim. Change* 3(11): 985-988. <https://doi.org/10.1038/nclimate1990>.
- Bergdahl, D.R., Sendak, P.E., Tobi, D.R., Bove, J.R., y Tritton, L.M. 2002. Incidence of annual canker of sugar maple studied with the aid of a geographic information system. *North. J. Appl. For.* 19: 73-79.
- Bergot, M., Cloppet, E., P'ernaud, V., D'equ'e, M., Marc ais, B, y Desprez-Loustau, M-L. 2004. Simulation of potential range expansion of oak disease caused by *Phytophthora cinnamomi* under climate change. *Glob. Change Biol.* 10:1539-5216.
- Berni, J.A.J., Zarco-Tejada, P.J., Sepulcre-Cantó, G., Fereres, E., y Villalobos, F.J. 2009a. Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. *Remote Sens. Environ.* 113: 2380-2388.
- Berni, J.A.J., Zarco-Tejada, P.J., Suárez, L., y Fereres, E. 2009b. Thermal and narrow-band multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE T. Geosci. Remote.* 47: 722-738.
- Binns, M.R., y Nyrop, J.P. 1992. Sampling insect populations for the purpose of IPM decision making. *Annu. Rev. Entomol.* 37: 427-53.
- Calderón, R., Navas-Cortés, J.A., Lucena, C., y Zarco-Tejada, P.J. 2013. High-resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for early detection of *Verticillium* wilt of olive using fluorescence, temperature and narrow-band spectral indices. *Remote Sens. Environ.* 139: 231-245.
- Calderón, R., Navas-Cortés, J.A., y Zarco-Tejada, P.J. 2015. Early detection and quantification of *Verticillium* wilt in olive using hyperspectral and thermal imagery acquired by manned platforms at large scale. *Remote Sens.* 7: 5584-5610.
- Camino, C., Calderón, R., Parnell, S., Dierkes, H., Chemin, Y., Román-Écija, M., Montes-Borrego, M., Landa, B.B., Navas-Cortés, J.A., Zarco-Tejada, P.J., y Beck, P.S.A. 2021. Detection of *Xylella fastidiosa* in almond orchards by synergic use of an epidemic spread model and remotely sensed plant traits. *Remote Sens. Environ.* 260, 112420. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2021.112420>.
- Coakley, S.M., Scherm, H., y Chakraborty, S. 1999. Climate change and plant disease management. *Annu. Rev. Phytopathol.* 37: 399-426. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.PHYTO.37.1.399>.
- Cunniffe, N.J., Koskella, B., E. Metcalf, C.J., Parnell, S., Gottwald, T.R., y Gilligan, C.A. 2015a. Thirteen challenges in modelling plant diseases. *Epidemics* 10: 6-10. <https://doi.org/10.1016/j.epidem.2014.06.002>.
- Cunniffe, N.J., Stutt, R.O.J.H., DeSimone, R.E., Gottwald, T.R., y Gilligan, C.A. 2015b. Optimising and communicating options for the control of invasive plant disease when there is epidemiological uncertainty. *PLoS Comp. Biol.* 11(4): e1004211. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PCBI.1004211>.
- De Wolf, E.D., e Isard, S.A. 2008. Disease cycle approach to plant disease prediction. *Annu. Rev. Phytopathol.* 45: 203-220.
- Dixon, A.F.G. 2003. Climate change and phenological asynchrony. *Ecol. Entomol.* 28:380-81.
- Donatelli, M., Magarey, R.D., Bregaglio, S., Willocquet, L., Whish, J.P.M., y Savary, S. 2017. Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems. *Agric. Syst.* 155: 213-224. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.019>.
- Ennaïfar, S., Makowski, D., Meynard, J.M., y Lucas, P. 2007. Evaluation of models to predict take-all incidence in winter wheat as a function of cropping practices, soil, and climate. *Eur. J. Plant Pathol.* 118: 127-143.
- Evans, K., Webster, R., Barker, A., Halford, P., Russell, M., Stafford, J., y Griffin, S. 2003. Mapping infestations of potato cyst nematodes and the potential for spatially varying application of nematicides. *Precis. Agric.* 4: 149-162.
- Fedele, G., Brischetto, C., Rossi, V., y Gonzalez-Dominguez, E. 2022. A systematic map of the research on disease modelling for agricultural crops worldwide. *Plants* 11: 724. <https://doi.org/10.3390/PLANTS11060724>.
- Franke, J., y Menz, G. 2007. Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral remote sensing. *Precis. Agric.* 8: 161-172. <https://doi.org/10.1007/S11119-007-9036-Y>.
- Furbank, R.T., y Tester, M. 2011. Phenomics – technologies to relieve the phenotyping bottleneck. *Trends Plant Sci.* 16: 635-644. <https://doi.org/10.1016/J.TPLANTS.2011.09.005>.
- Garrett, K.A., Dendy, S.P., Frank, E.E., Rouse, M.N., y Travers, S.E. 2006. Climate change effects on plant disease: genomes to ecosystems. *Annu. Rev. Phytopathol.* 44: 489-509. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.44.070505.143420>.
- Garrett, K.A., Bebbber, D.P., Etherton, B.A., Gold, K.M., Sulá, A.I.P., y Selvaraj, M.G. 2022. Climate Change effects on pathogen emergence: artificial intelligence to translate big data for mitigation. *Annu. Rev. Phytopathol.* 60: 357-378. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-PHYTO-021021-042636>.
- Gilligan, C.A. 2007 Sustainable agriculture and plant diseases: an epidemiological perspective. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363, 741-759. (doi:10.1098/rstb.2007.2181).
- Goldstein, E., Hetzroni, A., Cohen, Y., Tsror, L., Zig, U., y Lensky, I. 2009. A decision support system to predict plot infestation with soil-borne pathogens in potato production systems. Págs. 365-372, en: Bregt, A., Wolfert, S., Wien, J.E., Lokhorst, C., eds. EFITA conference '09. Proceedings of the 7th EFITA Conference, Wageningen, The Netherlands, 6-8 July 2009, Wageningen Academic Publishers, Wageningen.

- González-Domínguez, E., Fedele, G., Salinari, F., y Rossi, V. 2020. A general model for the effect of crop management on plant disease epidemics at different scales of complexity. *Agronomy* 10: 462. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10040462>.
- Heesterbeek, J.A.P., y Zadoks, J.C. 1987. Modelling pandemics of quarantine pests and diseases: problems and perspectives. *Crop Prot.* 6: 211-221. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(87\)90041-X](https://doi.org/10.1016/0261-2194(87)90041-X).
- Hijmans, R.J., Forbes, G.A., y Walker, T.S. 2000. Estimating the global severity of potato late blight with GIS-linked disease forecast models. *Plant Pathol.* 49: 697-705.
- Huang, W., Lamb, D.W., Niu, Z., Zhang, Y., Liu, L., y Wang, J. 2007. Identification of yellow rust in wheat using in-situ spectral reflectance measurements and airborne hyperspectral imaging. *Precis. Agric.* 8: 187-197. <https://doi.org/10.1007/S11119-007-9038-9>.
- Hyatt-Twynam, S.R., Parnell, S., Stutt, R.O.J.H., Gottwald, T.R., Gilligan, C.A., y Cunniffe, N.J. 2017. Risk-based management of invading plant disease. *New Phytol.* 214: 1317-1329. <https://doi.org/10.1111/NPH.14488>.
- Isard, S.A., Russo, J.M., Magarey, R.D., Golod, J., y VanKirk, J.R. 2015. Integrated pest information platform for extension and education (iPIPE): Progress through sharing. *J. Integr. Pest Manag.* 6: 15. <https://doi.org/10.1093/JIPM/PMV013>.
- Jaime-García, R., Orum, T.V., Felix-Gastelum, R., Trinidad-Correa, R., VanEtten, H.D., y Nelson, M.R. 2001. Spatial analysis of *Phytophthora infestans* genotypes and late blight severity on tomato and potato in the Del Fuerte Valley using geostatistics and geographic information systems. *Phytopathology* 91: 1156-1165.
- Kranz, J., y Royle, D.J. 1978. Perspectives in mathematical modelling of plant disease epidemics. Págs. 11-20, en: P.R. Sean y A. Bainbridge, eds. *Plant Disease Epidemiology*. Ed. Blackwell Scientific Publications. London.
- Krause, R.A., y Massie, L.B. 2003. Predictive systems: modern approaches to disease control. *Annu. Rev. Phytopathol.* 13: 31-47. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.PY.13.090175.000335>.
- Krebs, C.J. 2014. *Ecological Methodology*, 3rd ed.
- Lafferty, K.D., y Holt, R.D. 2003. How should environmental stress affect the population dynamics of disease? *Ecol. Lett.* 6: 654-664.
- Landa, B.B., Navas-Cortés, J.A., Hervás, A., y Jiménez-Díaz, R.M. 2001. Influence of temperature and inoculum density of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* on suppression of Fusarium wilt of chickpea by rhizosphere bacteria. *Phytopathology* 91: 807-816. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2001.91.8.807>.
- Landa, B.B., Navas-Cortés, J.A., y Jiménez-Díaz, R.M. 2004. Influence of temperature on plant-rhizobacteria interactions related to biocontrol potential for suppression of Fusarium wilt of chickpea. *Plant Pathol.* 53: 341-352. <https://doi.org/10.1111/j.0032-0862.2004.01008.x>.
- Lipkin, W.I. 2013. The changing face of pathogen discovery and surveillance. *Nat. Rev. Microbiol.* 11: 133-141.
- Madden, L.V., Hughes, G., y van den Bosch, F. 2007. *The Study of Plant Disease Epidemics*. APS Press, The American Phytopathological Society. St. Paul. MN.
- Magarey, R.D., Sutton, T.B., y Thayer, C.L. 2005. A simple generic infection model for foliar fungal plant pathogens. *Phytopathology* 95: 92-100. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-95-0092>.
- Magarey, R.D., Travis, J.W., Russo, J.M., Seem, R.C., y Magarey, P.A. 2002. Decision support systems: quenching the thirst. *Plant Dis.* 86: 4-14.
- Mahlein, A.K., Rumpf, T., Welke, P., Dehne, H.W., Plümer, L., Steiner, U., y Oerke, E.C. 2013. Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. *Remote Sens. Environ.* 128: 21-30. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2012.09.019>.
- Mandal, D., Ghosh, P.P., y Dasgupta, M.K. 2013. Appropriate precision agriculture with site-specific cropping system management for marginal and small farmers. Págs., 121-136, en: D. Hemming, ed. *Plant Sciences Reviews 2012 (CAB Reviews)*. CAB international. Oxford.
- Meentemeyer, R., Rizzo, D., Mark, W., y Lotz, E. 2004. Mapping the risk of establishment and spread of sudden oak death in California. *For. Ecol. Manag.* 200: 195-214.
- Meyer, M., Cox, J.A., Hitchings, M.D.T., Burgin, L., Hort, M.C., Dopson, D.P., y Gilligan, C.A. 2017. Quantifying airborne dispersal routes of pathogens over continents to safeguard global wheat supply. *Nat. Plants* 3: 780-786.
- Miranda, M.A., Barcelo, C., Valdes, F., Feliu, J.F., Nestel, D., Papadopoulos, N., et al. 2019. Developing and implementation of decision support system (DSS) for the control of olive fruit fly, *Bactrocera oleae*, in Mediterranean olive orchards. *Agronomy-Basel* 9(10): 620.
- Munar-Vivas, O., Morales-Osorio, J.G., y Castañeda-Sánchez, D. A. 2010. Use of field-integrated information in GIS-based maps to evaluate Moko disease (*Ralstonia solanacearum*) in banana growing farms in Colombia. *Crop Prot.* 29: 936-941.
- Navas-Cortés, J.A., Landa, B.B., Méndez-Rodríguez, M.A., y Jiménez-Díaz, R.M. 2007. Quantitative modeling of the effects of temperature and inoculum density of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* races 0 and 5 on development of Fusarium wilt in chickpea cultivars. *Phytopathology* 97: 564-573. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-97-5-0564>.
- Navas-Cortés, J.A., Landa, B.B., Mercado-Blanco, J., Trape-ro-Casas, J.L., Rodríguez-Jurado, D., y Jiménez-Díaz, R.M. 2008. Spatiotemporal analysis of spread of infections by *Verticillium dahliae* pathotypes within a high tree density olive orchard in southern Spain. *Phytopathology* 98: 167-180. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-98-2-0167>.
- Nilsson, H.E. 1995. Remote sensing and image analysis in plant pathology. *Annu. Rev. Phytopathol.* 15: 489-527.
- Nutter, F.W.Jr., Rubsam, R.R., Taylor, S.E., Harri, J.A., y Esker, P.D. 2002. Use of geospatially-referenced disease and weather data to improve site-specific forecasts for Stewart's

- disease of corn in the US corn belt. *Comput. Electron. Agric.* 37:7-14.
- Ojiambo, P.S., Yuen, J., Van Den Bosch, F., y Madden, L.V. 2017. Epidemiology: past, present, and future impacts on understanding disease dynamics and improving plant disease management—A summary of focus issue articles. *Phytopathology* 107: 1092-1094. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-17-0248-FI>.
- Ortiz, B.V., Hoogenboom, G., Vellidis, G., Boote, K., Davis, R.F., y Perry, C. 2009. Adapting the CROPGRO-cotton model to simulate cotton biomass and yield under southern root-knot nematode parasitism. *Trans. ASABE* 52: 2129-2140.
- Pande, S., Desai, S., y Sharma, M. 2010. Impact of climate change on rainfed crop diseases: current status and future research needs. Págs 55-59, en: National Symposium on Climate Change and Rainfed Agriculture, February 18-20, 2010. Indian Society of Dryland Agriculture, Central Research Institute for Dryland Agriculture, Hyderabad, India.
- Patrício, D.I., y Rieder, R. 2018. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. *Comput. Electron. Agric.* 153: 69-81. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2018.08.001>.
- Paz, J.O., Batchelor, W.D., y Pedersen, P. 2004. WebGro: A web-based soybean management decision support system. *Agron. J.* 96: 1771-1779.
- Plantegenest, M., Le May, C., y Fabre, F. 2007. Landscape epidemiology of plant diseases. *J. R. Soc. Interface* 4: 963-972
- Poblete, T., Navas-Cortes, J.A., Camino, C., Calderon, R., Hornero, A., Gonzalez-Dugo, V., Landa, B.B., y Zarco-Tejada, P.J. 2021. Discriminating *Xylella fastidiosa* from *Verticillium dahliae* infections in olive trees using thermal- and hyperspectral-based plant traits. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 179: 133-144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjsprs.2021.07.014>.
- Price, P., Denno, R., Eubanks, M., Finke, D., y Kaplan, I. 2011. Population dynamics. Págs. 404-440, en: *Insect Ecology: Behaviour, Populations and Communities*. Cambridge University Press. Cambridge. doi:10.1017/CBO9780511975387.016.
- Qin, Z., y Zhang, M. 2005. Detection of rice sheath blight for in-season disease management using multispectral remote sensing. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 7: 115-128.
- Rabbinge, R., y de Wit, C.T. 1999. Systems, model and simulation. *Tetrahedron Lett.* 23: 4461-4464.
- Rossi, V.; Giosuè, S.; y Caffi, T. 2010. Modelling plant diseases for decision making in crop protection. Págs. 241-258, en: Oerke, E.C., Gerhards, R., Menz, G., y Sikora, R., eds. *Precision Crop Protection—The Challenge and Use of Heterogeneity*. Springer. Dordrecht.
- Risède, J.M., Chabrier, C., Dorel, M., Rhino, B., Lakhia, K., Jenny, C., y Quénéhervé, P. 2009. Recent and up-coming strategies to counter plant-parasitic nematodes in banana cropping systems of the French West Indies. *Acta Horticult.* 828: 117-128.
- Rodríguez, E., García-Garrido, J.M., García, P.A., y Campos, M. 2009. Large-scale epidemiological study and spatial patterns of *Verticillium* wilt in olive orchards in southern Spain. *Crop Prot.* 28: 46-52.
- Roget, D.K. 2001. Prediction modelling of soilborne plant diseases. *Australas. Plant Pathol.* 30: 85-89.
- Rossi, V., Sperandio, G., Caffi, T., Simonetto, A., y Gilioli, G. 2019. Critical success factors for the adoption of decision tools in IPM. *Agronomy* 9: 710. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY9110710>.
- Seem, R.C. 2004. Forecasting plant disease in a changing climate: a question of scale. *Can. J. Plant Pathol.* 26: 274-83.
- Shakoor, N., Lee, S., y Mockler, T.C. 2017. High throughput phenotyping to accelerate crop breeding and monitoring of diseases in the field. *Curr. Opin. Plant Biol.* 38: 184-192. <https://doi.org/10.1016/J.PBI.2017.05.006>.
- Southwood, T.R.E. 1978. *Ecological Methods*. Chapman and Hall. Londres.
- Sparks, A.H., Forbes, G.A., Hijmans, R.J., y Garrett, K.A. 2014. Climate change may have little effect on global risk of potato late blight. *Glob. Change Biol.* 20: 3621-3631.
- Steddom, K., Heidel, G., Jones, D., y Rush, C. M. 2003. Remote detection of *Rhizomania* in sugar beets. *Phytopathology* 93: 720-726.
- Suárez, L., Zarco-Tejada, P.J., Berni, J.A.J., González-Dugo, V., y Fereres, E. 2009. Modelling PRI for water stress detection using radiative transfer models. *Remote Sens. Environ.* 113: 730-740.
- Tartachnyk, I., Rademacher, I., y Kühbauch, W. 2006. Distinguishing nitrogen deficiency and fungal infection of winter wheat by laser-induced fluorescence. *Precis. Agric.* 7: 281-293.
- Thanassouloupoulos, C.C. 1993. Spread of *Verticillium* wilt by nursery plants in olive groves in the Chalkidiki area (Greece). *Bull. OEPP/EPPO Bull.* 23: 517-520.
- Van der Plank, J.E. 1963. *Plant Diseases: Epidemics and Control*. Academic Press. Nueva York, NY.
- Van Maanen, A., y Xu, X.M. 2003. Modelling plant disease epidemics. *Eur. J. Plant Pathol.* 109: 669-682. <https://doi.org/10.1023/A:1026018005613>
- Welch, S.M., Croft, B.A., Brunner, J.F., y Michels, M.F. 1978. Pete: an extension phenology modelling system for management of multi-species pest complex. *Environ. Entomol.* 7: 487-494. <https://doi.org/10.1093/EE/7.4.487>
- West, J.S., Bravo, C., Oberti, R., Lemaire, D., Moshou, D., y McCartney, H.A. 2003. The potential of optical canopy measurement for targeted control of field crop diseases. *Annu. Rev. Phytopathol.* 41: 593-614.
- White, S.M., Navas-Cortés, J.A., Bullock, J.M., Boscia, D., y Chapman, D.S. 2020. Estimating the epidemiology of emerging *Xylella fastidiosa* outbreaks in olives. *Plant Pathol.* 69: 1403-1413. <https://doi.org/10.1111/PPA.13238>
- Willocquet, L., Savary, S., McDonald, B.A., y Mikaberidze, A. 2020. A polyetic modelling framework for plant disease emergence. *Plant Pathol.* 69: 1630-1643. <https://doi.org/10.1111/PPA.13249>

- Wu, B. M., Subbarao, K.V., y Van Bruggen, A.H.C. 2005. Analyses of the relationships between lettuce downy mildew and weather variables using geographic information system techniques. *Plant Dis.* 89: 90-96.
- Yang, C., Everitt, J.H., y Fernandez, C.J. 2010. Comparison of airborne multispectral and hyperspectral imagery for mapping cotton root rot. *Biosyst. Eng.* 107: 131-139. <https://doi.org/10.1016/J.Biosystemseng.2010.07.011>.
- Zadoks, J.C. 1971. Systems analysis and the dynamics of epidemics. *Phytopathology* 61: 600-610.
- Zarco-Tejada, P.J., González-Dugo, V., y Berni, J.A.J. 2012. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV for water stress detection using a hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sens. Environ.* 117: 322-337.
- Zarco-Tejada, P.J., Poblete, T., Camino, C., Gonzalez-Dugo, V., Calderon, R., Hornero, A., Hernandez-Clemente, R., Román-Écija, M., Velasco-Amo, M.P., Landa, B.B., Beck, P.S.A., Saponari, M., Boscía, D., y Navas-Cortés, J.A. 2021. Divergent abiotic spectral pathways unravel pathogen stress signals across species. *Nat. Commun.* 12(1): 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26335-3>.
- Zeuner, T., y Kleinhenz, B. 2007. Use of geographic information systems in warning services for late blight. *Bull. OEPP/EPPO Bull.* 37: 327-334.
- Zhang, M., Qin, Z., Liu, X., y Ustin, S.L. 2003. Detection of stress in tomatoes induced by late blight disease in California, USA, using hyperspectral remote sensing. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 4: 295-310. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(03\)00008-4](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(03)00008-4).
- Zhang, J., Huang, Y., Pu, R., Gonzalez-Moreno, P., Yuan, L., Wu, K., y Huang, W. 2019. Monitoring plant diseases and pests through remote sensing technology: A review. *Comput. Electron. Agric.* 165, 104943. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2019.104943>.
- Zhou, L., Xie, B., Shen, W., Yang, Y., y Li, D. 2005. Prediction of suitable establishment areas of dangerous horticultural crop nematode, *Radopholus similis* in China using GIS. *Nongye Gongcheng Xuebao/ Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.* 21(SUPPL. 2):28-31.

C6. Capítulo C6. La integración de medidas y medios de control, y del manejo del agroecosistema, como estrategia clave de la Sanidad Vegetal

C6.1. Una visión holística para la integración de métodos en el manejo del agroecosistema

A lo largo de los apartados anteriores del presente libro, hemos intentado llevar a la atención del lector los retos que la Sanidad Vegetal está afrontando en el siglo XXI y las respuestas que se vislumbran a partir de la investigación científico-técnica que pretende responder a esos retos. En primer lugar, en la **parte A**, hemos situado la Sanidad Vegetal en el marco global de la actividad agroforestal poniendo de manifiesto cómo sus objetivos de reducir las pérdidas de cosecha debidas a plagas, enfermedades y malas hierbas sirven a aquella, teniendo en cuenta la **visión holística del agroecosistema** y sin olvidar los **criterios económicos, sociales y ambientales que hagan compatible el aumento de la productividad con la sostenibilidad en la actividad agroforestal**. Las conclusiones alcanzadas en el recientemente publicado Libro Blanco de la Sanidad Vegetal (Jiménez Díaz y López González, 2019) son una buena referencia para enmarcar las reflexiones contenidas en la presente obra. También en la parte A, hemos tratado de mostrar la complejidad de los componentes de los agroecosistemas, sus relaciones y los factores que influyen en todos ellos.

La parte B comprende cuatro retos que hemos seleccionado entre los que consideramos más acuciantes para la moderna Sanidad Vegetal. Los problemas causados por: (i) el cambio climático; (ii) el aumento incesante del transporte transnacional de alimentos y otros productos vegetales promovido por el comercio internacional, así como de personas, lo que ha llevado a un **aumento creciente del número de artrópodos fitófagos, fitopatógenos y malas hierbas** que traspasan nuestras fronteras y en algunos casos se establecen en nuestros cultivos y masas forestales; (iii) la concienciación social de los riesgos para la salud humana y medioambiental causados por determinadas prácticas de la Sanidad Vegetal y su consecuente legislación; y (iv) la creciente demanda de alimentos obtenidos sin esas prácticas.

Finalmente, en la **parte C**, hemos pretendido señalar las principales direcciones en las que se mueven las innovaciones en algunos campos de la Sanidad Vegetal de cara a la presente década. La mejor comprensión de la complejidad de componentes y relaciones multitróficas existentes en el agroecosistema descrita en la parte A del libro, ha sido aprovechada para: (i) desarrollar cultivares de plantas resistentes a los agentes fitopatógenos e insectos fitófagos; (ii) favorecer el crecimiento y actividad de las poblaciones de los enemigos naturales de los insectos fitófagos y malas hierbas, así como de los antagonistas de los agentes fitopatógenos; (iii) favorecer la presencia de vegetación que ofrezca servicios positivos para la agricultura y la silvicultura, tales como la polinización, el control biológico o el enmascaramiento de la planta cultivada para sus fitófagos o algunos agentes patógenos y sus vectores; y (iv) modificar las prácticas culturales para exponer los agentes nocivos de los cultivos a condiciones abióticas perjudiciales para ellos, pero no para el cultivo o para los enemigos naturales y antagonistas de aquellos (Foto 1).

En el presente Capítulo C6 intentamos presentar: (i) cómo se puede combinar la aplicación secuencial o simultánea de todos los medios y métodos de control de los agentes nocivos en programas de la llamada Gestión (o Manejo) Integrada de Plagas, Enfermedades y Malas hierbas (o Gestión Integrada

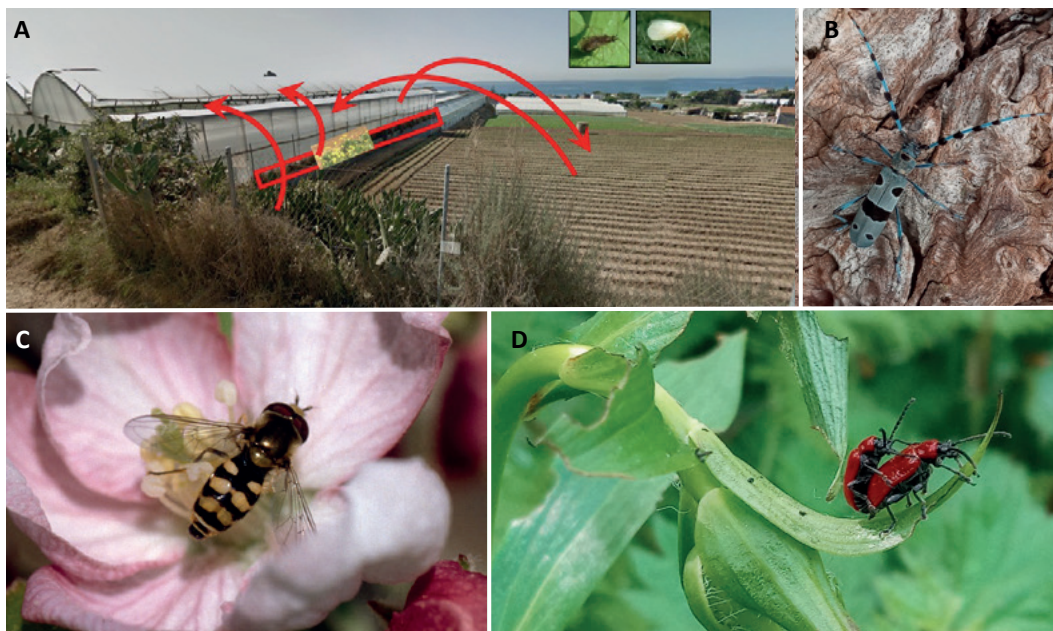


Foto 1. Potenciación del control biológico mediante la consideración y manejo del paisaje para favorecer la gestión integrada de plagas. **A.** Interacciones del cultivo en invernadero con el paisaje circundante: cultivos del exterior del invernadero, la vegetación en los márgenes de las parcelas y otros ecosistemas vecinos. Evitar sellar las ventanas del invernadero y permitir de manera estudiada el intercambio de poblaciones de artrópodos -tanto fitófagos como enemigos naturales (véanse arriba los recuadros de mosca blanca y mirído depredador)-, entre el interior y exterior de los invernaderos, ha permitido potenciar el control biológico de conservación en muchas zonas del Mediterráneo y está permitiendo disminuir sobremanera el uso de PP. FF.; **B.** *Rosalia alpina*, especie de la familia de los cerambícidos protegida en Europa por su papel relevante en el ciclo de los hayedos al contribuir a la descomposición de la madera del haya, que es su huésped principal; **C.** Mosca sírífida que, además de ser depredadora de plagas, es un polinizador eficiente (Cortesía de J. Avilla); **D.** Apareamiento de adultos de la familia de escarabajos crisomélidos que mantienen la diversidad de especies en pastizales. (Fotos B y D: Cortesía de M. Eizaguirre).

de Plagas en sentido más amplio, GIP); y (ii) cómo para ello precisamos de conocimientos científicos y tecnologías que permitan el análisis holístico de los ecosistemas agroforestales, para diseñar medidas de Sanidad Vegetal que sean compatibles con los objetivos generales de la agricultura y la silvicultura modernas, en la dirección mencionada de mejorar la productividad y sostenibilidad de ambas. La GIP es un concepto flexible en el que diferentes medidas de control se integran a niveles bajos o altos, dependiendo de los cultivos y situaciones (Kogan, 1998), que constituye uno de los paradigmas fundamentales que se han establecido en la Sanidad Vegetal en los últimos 60 años (cf., Apartado C6.2.1.) y sigue en vigor en la actualidad en la mayoría de los países desarrollados. La significación de la GIP se ha consolidado en la Unión Europea (UE) al adoptarla -junto con el uso preferente de medios no químicos- como estrategia fundamental para el control de plagas, enfermedades y malas hierbas, a través de la Directiva 2009/128/CE/ del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de octubre de 2009 para el uso sostenible de los productos fitosanitarios (PP. FF.).

La aproximación sistémica a ese análisis nos permitirá aprovechar las sinergias entre los métodos de gestión favorables a la productividad y sostenibilidad, y evitar al máximo los antagonismos entre los mismos. No en vano es creciente el número de publicaciones que abogan por la aplicación de programas GIP dentro del marco del agroecosistema y el paisaje. Ese intento integrador en la innovación en materia de Sanidad Vegetal puede parecer contradictorio con la tendencia actual de especializar más y más la investigación científica y la formación universitaria y no universitaria en las disciplinas nucleares de aquella (cf., Capítulo A1.). Esta creciente especialización dificulta tanto el análisis completo como las intervenciones holísticas en el agroecosistema y la propuesta de soluciones realmente integradas, aunque ello no ha impedido que las diversas aproximaciones unilaterales a la GIP expuestas en capítulos anteriores hayan generado avances considerables en esa dirección.

C6.2. La Gestión Integrada de Plagas en sentido amplio: concepto, aplicabilidad y limitaciones

Con la finalidad de dar al lector la posibilidad de repasar la bibliografía especializada científica y de divulgación, digamos que lo que hemos llamado GIP se menciona en la bibliografía en español con

diferentes términos, tales como Manejo Integrado o Control Integrado de Plagas, mientras que la bibliografía especializada en inglés suele referirse a ello de modo muy generalizado con el término *Integrated Pest Management* (IPM), aunque en ocasiones se prefiere utilizar el acrónimo IPDM (*Integrated Pest and Disease Management*). Esta terminología es también común en la legislación internacional y de cada país, incluyendo la de la UE.

C6.2.1. Concepto de Gestión Integrada de Plagas

El concepto de la GIP deriva del Concepto de Control Integrado (*The Integrated Control Concept*, ICC) establecido por Stern et al. (1959), en un artículo histórico en el que se describía que el problema de la resistencia de los pulgones de la alfalfa a los insecticidas órgano-fosforados se había **resuelto mediante la reducción de la dosis de estos, que permitía la supervivencia de los enemigos naturales de los pulgones**. Aunque el ICC se estableciera originalmente contra plagas de fitófagos y basado en la combinación del control biológico y el uso de PP. FF., creó un nuevo marco para una reflexión profunda sobre la protección de los cultivos contra sus agentes nocivos, y proporcionó los cimientos para el desarrollo de la GIP. De hecho, una de las mayores contribuciones de la GIP a la agricultura y la silvicultura ha sido **demostrar la necesidad de que todas las fases de los sistemas de producción se deben basar en sólidos principios ecológicos**, teniendo como meta final el desarrollo de agroecosistemas ecológica y económicamente sostenibles (Kogan, 1999) (cf., Apartado C6.3.1.).

Advirtamos que lo que aquí llamamos gestión integrada en muchos países concierne solo a los PP. FF., es decir a su uso racional y discriminado frente al indiscriminado que prevalece en la agricultura convencional. Este tipo de GIP, aunque incompleto, no deja de ser positivo porque la mera toma de decisiones sobre el uso de los plaguicidas basada en el conocimiento debe ser valorada.

Aunque intuitivamente simple, el concepto de GIP contiene un notable nivel de complejidad que se plasma en la versatilidad con que es definido en la bibliografía especializada, en la que se puede encontrar más de 70 definiciones de la GIP (Jacobsen, 1997; Zadoks, 2001). No obstante, todas ellas incluyen principios básicos comunes que preferimos explicitar más que dar una definición formal. Esos principios básicos en el concepto de GIP, que subyacen en las definiciones dadas en la bibliografía, son los siguientes:

- a) Alcanzar un nivel suficiente de control de la plaga, enfermedad o mala hierba, aunque no necesariamente total
- b) Cuantificar periódicamente, con bases científicas, la población del agente nocivo con las técnicas más apropiadas en cada caso, para aplicar las estrategias, medios y métodos de control solo cuando sean necesarios
- c) Considerar todos los medios y métodos posibles para prevenir que las poblaciones de organismos nocivos alcancen densidades conocidas como perjudiciales
- d) De todos esos medios y métodos posibles, utilizar aquellos que, una vez integrados en el marco del agroecosistema de la manera más compatible y con las mayores sinergias posibles, resulten en una mayor efectividad en las condiciones locales, para aumentar la productividad agrícola o forestal de manera económica y socialmente justificadas
- e) Considerar la repercusión medioambiental de la aplicación de los medios y métodos de control

- f) Utilizar preferiblemente aquellos medios y métodos que manejan factores propios del agroecosistema de manera sostenible, de forma que se eviten al máximo los efectos perjudiciales para la salud humana y se consiga la preservación del medioambiente
- g) Recurrir a los PP. FF. de menor impacto negativo como última barrera defensiva, pero no necesariamente eliminarlos *a priori* de forma total
- h) Considerar los efectos de las prácticas de GIP sobre todas las plagas, enfermedades y malas hierbas del cultivo y no solamente sobre aquella que es objeto específico de la acción de control
- i) De entre los factores propios del agroecosistema, incluir también aquellos que de manera principal se manejan con finalidades distintas a las de la Sanidad Vegetal, pero que inciden en esta
- j) Conocer la efectividad de las decisiones tomadas y evaluar sus valores por si fuera necesario corregirlas. Es deseable que la evaluación se pueda efectuar paralelamente a la aplicación de un programa GIP, de modo que su corrección pueda tener lugar en el propio cultivo para mejorar su efectividad.

C6.2.2. La complejidad de la Gestión Integrada de Plagas: una llamada de cautela sobre la aplicabilidad

La GIP constituye un **abordaje complejo, pero no una panacea**, para el control conjunto de los artrópodos fitófagos, agentes fitopatógenos, vectores de estos últimos y malas hierbas que inciden sobre un cultivo, con el objetivo de minimizar los perjuicios que aquellos le causan, mediante la aplicación de acciones de control. Estas acciones están sujetas a las influencias de una diversidad de factores bióticos y abióticos que modifican el desarrollo de las plagas, enfermedades y malas hierbas -incluyendo las características de los ambientes de producción-, y cuyos efectos pueden ser interdependientes (Kendrick, 1988). Por ello, y a falta de una concepción holística (cf., Apartado C6.3.), la aplicabilidad de los programas de GIP no deber ser concebida como simple sino sujeta, por el momento, a la falta de unicidad que subyace en el estudio independiente de los fenómenos parasitarios y de competición a través de las disciplinas nucleares de la Sanidad Vegetal (cf., Capítulo A1.).

En la complejidad que encierra la aplicabilidad de los programas GIP también subyacen las diferencias inherentes a la naturaleza de las plagas, las enfermedades, los vectores de agentes fitopatógenos, y las malas hierbas a las que ya nos referimos en el Capítulo A1. de esta obra (cf., Apartado A1.5.2.). De hecho, hasta ahora, los programas de GIP se han aplicado con más éxito para el control de plagas de artrópodos fitófagos que para el control de enfermedades y de los vectores de sus agentes causales, y ello se ha atribuido: (i) a la mayor complejidad inherente a las interacciones planta-patógeno y mayor influencia sobre ellas de ambientes variables, a diferencia de las relaciones planta- artrópodo fitófago tal como ya se expuso en el Capítulo C3.; (ii) a la naturaleza preventiva de la mayoría de las medidas de control contra las enfermedades (i.e., exclusión, erradicación, escape, protección y resistencia), ya que solo la terapia tiene carácter curativo. Estas cinco medidas, efectivamente, se basan en evaluaciones de riesgo anteriores a la manifestación de los ataques y en la prevención, que no en la cura, de las afecciones; mientras que en el caso de plagas de fitófagos las acciones son de intervención y las decisiones sobre su aplicación se toman *a posteriori*, una vez aquellas han alcanzado ciertas densidades; y (iii) a dificultades adicionales para la toma de decisiones en las eventuales acciones de intervención (ej., tratamientos fungicidas). Esto último es debido a que: a) los umbrales de pérdidas son incómodos de manejar porque cuantificar la cantidad de enfermedad en un cultivo es difícil y complejo; b) cuando se alcanza el umbral de intervención ya se ha producido parte del perjuicio en el cultivo; c) las enfermedades que se caracterizan por epidemias explosivas (ej., bacteriosis foliares, y micosis como antracnosis,

mildius y oídios) no permiten esperar a la manifestación de los síntomas para la toma de decisiones; y d) en otros casos, el periodo de incubación de la enfermedad puede ser demasiado prolongado para esperar a que los síntomas se manifiesten (Zadoks, 2001).

Foto 2. Medidas de control para la gestión integrada de enfermedades. **A, B.** Cultivo alomado para reducir las infecciones de raíces por *Phytophthora* spp. favorecidas por el exceso de agua en la zona radical de la planta (Cortesía de H.D. Thurston); **C, D.** Retirada de hojas con una barredora del suelo de una plantación de peral para la gestión integrada de la mancha marrón causada por el hongo *Stemphylium vesicarium*, junto con el tratamiento de los restos con *Trichoderma* spp. y de la copa del árbol con un fungicida (Cortesía de E. Montesinos); **E-G.** Control de la rabia -causada por el hongo *Ascochyta rabiei*- en el cv. 'Blanco lechoso' de garbanzo altamente susceptible sembrado en invierno -que propicia ambiente favorable para la enfermedad-, mediante tratamientos con los fungicidas bitertanol (E) y clortalonil (F), comparado con el control de la enfermedad mediante el cv. 'ILC 72' resistente (dcha.). Nótese el desarrollo de la rabia en el cv. 'Blanco lechoso' (izda.) y las líneas de trigo que actuaban de barrera entre parcelas de garbanzo adyacentes (G).



Mientras que los programas de GIP de plagas de artrópodos comprenden en gran parte la armonización del uso de agentes de control biológico con modificaciones en las prácticas de cultivo o la aplicación de PP. FF., los de GIP de enfermedades se asientan en la utilización eficiente de cultivares resistentes al

patógeno, independientemente de su nivel de resistencia y, adicionalmente, pueden incluir, dependiendo de la naturaleza de la enfermedad: (i) la **elección del lugar de siembra o plantación**; (ii) la **utilización de material vegetal certificado libre de patógenos**; (iii) el tratamiento de dicho material, del suelo, sustrato, agua de riego, etc. con **agentes de biocontrol** para su protección contra la infección subsiguiente a la siembra o plantación; (iv) la **modificación de las prácticas de cultivo** para evitar condiciones demasiado favorables para las enfermedades (Foto 2A-D), los agentes patógenos o los vectores de estos (cf., Fotos 1 y 4, Capítulo C3.); y (v) la **utilización de PP. FF.** para suplementar niveles de control insuficiente alcanzados con las otras medidas de control (Foto 2 E-G) (cf., Foto 2C, Capítulo C3.) (Jiménez Díaz, 2009). Al igual que en el caso de plagas, la GI de enfermedades implica la elección entre determinadas opciones para cada una de las referidas acciones de control, que han de estar basadas en el conocimiento previo sobre las características del patosistema (ej., el estatus de infestación del suelo en el caso de patógenos que residen en él, las razas del patógeno que son prevalentes y su virulencia sobre cultivares disponibles, etc.), así como de la eficiencia de los agentes de control biológico y de las medidas culturales en los ambientes de aplicación, junto con la disponibilidad de certificación sanitaria eficiente del material vegetal (cf., Capítulos C3. y C4.) (Jiménez Díaz et al., 2000). Dichos conocimientos y/o las tecnologías necesarias para adquirirlos pueden no estar disponibles, o su aplicación ser dificultosa.

Dado que para el control de enfermedades causadas por virus y viroides (referidas en lo que sigue como virosis) no son de aplicación los PP. FF., la **GIP de ellas presenta singularidades relevantes en comparación con las causadas por otros agentes nocivos** y por ello se estudian a continuación en mayor extensión. La GIP de las virosis -que algunos autores han denominado como manejo integrado de enfermedades virales (MIV) (Moriones, 2016)-, como el de enfermedades causadas por otros agentes, **implica el uso combinado de todas las medidas de control disponibles orientadas a evitar o, al menos, reducir su impacto económico, aplicadas ya sea de forma secuencial o simultánea, antes o después de la siembra o trasplante de un cultivo.** Sin embargo, la relevancia de la transmisión de los virus y viroides en el material de siembra o plantación determina que **la garantía de la sanidad de este** -normalmente tras un proceso de certificación como libre de infección y de autenticidad varietal-, sea **un elemento clave en la GIP de las virosis.** A este respecto, es significativo el impacto que ha tenido en la citricultura española el modélico programa de certificación de cultivares seleccionados de cítricos (Navarro, 1986). Este programa se estableció en España ante la necesidad urgente de realizar un cambio generalizado en la citricultura española, y de sustituir el mayoritario patrón naranjo amargo -que confiere susceptibilidad a la tristeza- por patrones tolerantes a dicha enfermedad injertados con cultivares de cítricos seleccionados y libres de virus y otros patógenos transmisibles por injerto (Cambra et al., 2000). Asimismo, **la introducción de nuevos cultivares de cítricos de interés se realiza a través de una Estación Nacional de Cuarentena** basada en el microinjerto de ápices caulinares *in vitro*, de modo que únicamente se produce la entrada de material sano -tras verificar su correcto estado sanitario mediante pruebas sensibles de invernadero y laboratorio o mediante secuenciación masiva-, aunque originalmente estuviera infectado. Este programa, junto con los de vid, frutales de hueso y pepita, fresa, pistacho y castaño, es de los **escasísimos programas de certificación sanitaria que se mantienen en nuestro país**, según aparece en la web del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA).

Como se ha indicado anteriormente, para el control de las virosis vegetales no se dispone de PP. FF. convencionales que puedan ser utilizados para su control directo, a diferencia de otros patógenos de plantas, como bacterias, hongos, oomicetos y nematodos, y de las malas hierbas. No obstante, se han desarrollado métodos y estrategias, como la **protección cruzada o pre-inmunización, que pudieran considerarse compatibles, aún con ciertas reservas y precauciones, con la GIP de las virosis.** La protección cruzada consiste en el proceso por el cual un huésped susceptible infectado con un patógeno (experimentado con virus), o con una cepa del mismo de escasa virulencia, se vuelve resistente o tolerante a la infección posterior por otro patógeno, o por una cepa relacionada más virulenta. Se trata de infectar una planta con

una cepa o aislado atenuado de un virus que la proteja o excluya de la posterior infección, en condiciones naturales, con una cepa o aislado virulento del mismo virus. En el uso de esta estrategia es **clave que el patógeno del que se desee proteger posea un gran parentesco y sea una cepa, aislado o tipo muy próxima del que se emplee como protectora**. Además, la protección solo tiene lugar entre aislados de un mismo virus, pero no contra los de virus distintos, y el aislado protector debe invadir sistémicamente la planta que se desee proteger y lograr en ella un alto título o carga viral.

El método de la protección cruzada se ha descrito y utilizado históricamente para virus de ARN como el de las manchas anulares del tabaco (Tobacco ringspot virus, TRSV), el virus del mosaico del tabaco (Tobacco mosaic virus, TMV) y virus X de la patata o papa (Potato virus X, PVX), pero posteriormente se ha aplicado a muy diversos virus, como los del mosaico del tomate (Tomato mosaic virus, ToMV), la mancha anular de la papaya (Papaya ringspot virus, PRSV), y el mosaico amarillo del calabacín (Zucchini yellow mosaic virus, ZYMV), así como virus de ADN como el del mosaico de la coliflor (Cauliflower mosaic virus, CMV), entre otros. El método se emplea comercialmente a gran escala en viveros de cítricos en Brasil y Sudáfrica, y en algunos viveros en Australia y Perú, entre otros países, para proteger a cítricos (naranja dulce, pomelo y algunos patrones) de daños directos de acanaladuras en la madera que causan aislados virulentos del virus de la tristeza de los cítricos (Citrus tristeza virus, CTV) presentes en los mismos. La búsqueda y selección de aislados protectores debe realizarse localmente en la población autóctona de virus y huéspedes del país, y su uso supone una última opción sin la que no sería posible el cultivo. **La protección cruzada también presenta algunas desventajas y riesgos generales**, incluyendo: (i) que genera entre un 5-10 % de reducción del rendimiento; (ii) solo es posible si se dispone de un adecuado método de producción de inóculo y de inoculación; (iii) supone aceptar el riesgo de la liberación de virus a gran escala en el ambiente; y (iv) que las plantas pre-inoculadas se convierten en reservorios del virus atenuado, que podría mutar e incrementar su virulencia, recombinarse, o interferir con otros virus. En Brasil, la práctica totalidad de cítricos son pre-inmunizados en vivero, para asegurar que una vez plantados en campo serán capaces de tolerar o excluir a aislados virulentos de CTV. Por causas todavía no bien determinadas, sucede con cierta frecuencia que la intensidad de la protección en algunos árboles pre-inmunizados disminuye o desaparece en el cultivo en campo. Se ha considerado que la protección cruzada era debida al silenciamiento del ARN genómico del CTV, inducido por la protección de la cepa protectora o atenuada, pero el fenómeno debe de ser probablemente más complejo y la exclusión total de una cepa virulenta solo tiene lugar por cepas no virulentas de la misma cepa (Folinova, 2013). Tanto es así que **se ha propuesto la denominación de protección cercana en vez de protección cruzada**.

Además de la comentada pre-inmunización, se han desarrollado estrategias biotecnológicas basadas en el **silenciamiento génico de virus, como método en el control de las virosis de cultivos**. El silenciamiento génico mediado por ARN constituye un mecanismo natural de defensa antiviral, que es activado por la presencia de ARN de doble cadena (dsARN) como forma replicativa del virus dando lugar a la degradación del ARN viral que infectó la planta, en un proceso dependiente de homología de secuencia entre el dsARN inductor y el ARN viral diana (Tenllado et al., 2008) (cf., Capítulo C3., Apartado C3.2.2.3.4.3.). Esta prometedora tecnología podría resultar útil si la utilización en campo o invernadero de preparados de dsARN en plantas produce los resultados esperados de control o reducción de la infección viral.

Actualmente, la **transformación estable de plantas con secuencias que dirijan la formación de estructuras dsARN constituye el método más efectivo para conferir resistencia frente a infecciones virales en plantas**. Cabe pensar que las reticencias de los consumidores hacia las plantas transgénicas, se moderen o desaparezcan ante las nuevas tecnologías de edición genómica para obtener resistencia frente a virus de plantas y otros patógenos, pues esta tecnología no implica transgénesis y hace posible la mejora de cultivares de plantas sin la introducción de elementos foráneos (cf., Capítulo C3., Apartado C3.4.). No obstante, en 2011 tuvo lugar la desregularización del cultivo de ciruelos europeos transgénicos (cv.

HoneySweet) resistentes al virus de la sharka (PPV) en EE. UU., y en la actualidad está siendo tramitada en la UE donde ha sido evaluado con éxito (Scorza et al., 2013). Esta evaluación ha demostrado que el cultivo en campo de ciruelos europeos transgénicos en condiciones mediterráneas no supone ningún riesgo medioambiental, más allá del ocasionado por el cultivo de ciruelos convencionales, en términos de los parámetros estudiados; así: (i) no se detectaron diferencias entre la variabilidad de las poblaciones del virus PPV presentes en ciruelos transgénicos y no transgénicos; (ii) el número y especies de pulgones y otros artrópodos que visitaron ciruelos transgénicos fue similar al de ciruelos convencionales; y (iii) tampoco se detectaron virus recombinantes viables en las plantas transgénicas después de 8 años de exposición de las mismas a la infección natural por PPV en ensayos confinados de campo autorizados (Capote et al., 2008). El uso de ciruelos transgénicos como planta pantalla o trampa (véase posteriormente), o para la normal producción de ciruelas europeas en zonas donde el virus es endémico, ofrece una atractiva posibilidad para la GIP de la sharka.

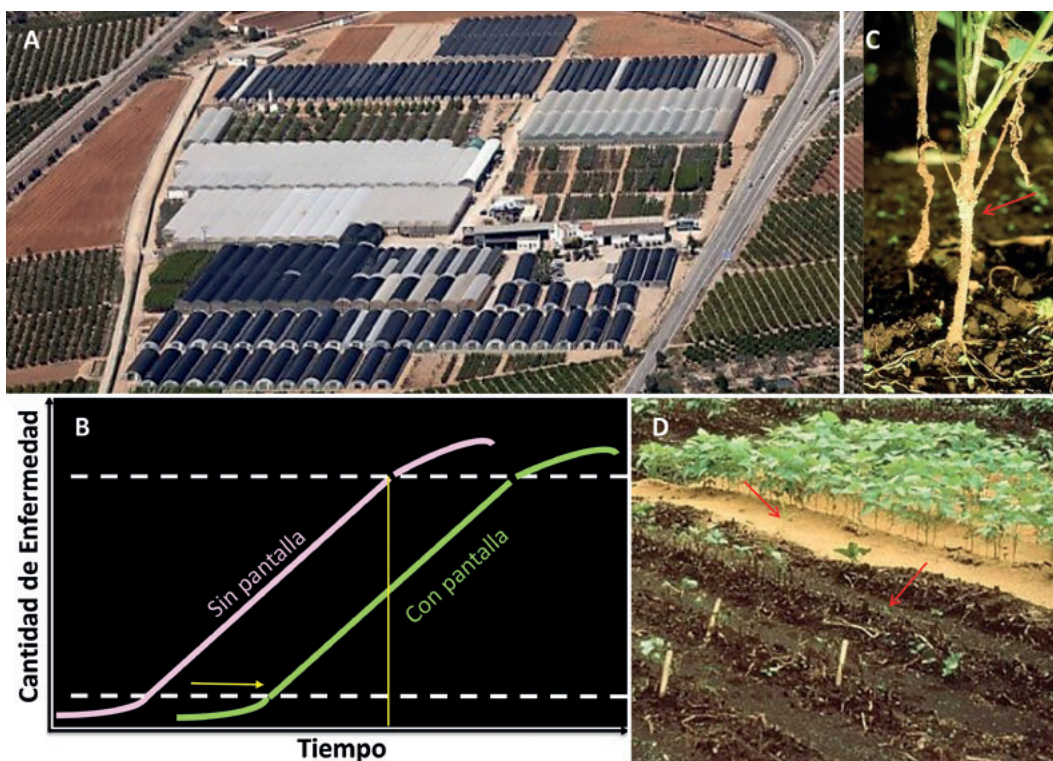


Foto 3. Uso de barreras físicas para reducir el riesgo de infección por agentes fitopatógenos en cultivos agrícolas. **A.** Viveros bajo cubierta para el cultivo protegido de plantas madre; **B.** Esquema que ilustra el efecto de pantallas reflectantes dispuestas sobre el suelo en el desarrollo de una epidemia policíclica de virosis transmitidas de forma no persistente por pulgones, en el que la reflexión luminosa reduce la eficiencia de la transmisión que se traduce en menor inóculo efectivo y retraso de la epidemia. La flecha indica la magnitud del retraso de la epidemia de virosis en el cultivo con pantalla, y la línea vertical de color amarillo la reducción de la cantidad total de enfermedad desarrollada en este cuando la epidemia ha alcanzado su cénit en el cultivo sin pantalla; **C.** Podredumbre del tallo de la judía (flecha) ocasionada por las salpicaduras de inóculo del hongo *Rhizoctonia solani* residente en el suelo propiciadas por la lluvia; **D.** Control de la podredumbre del tallo de la judía mediante cubierta del suelo infestado por *R. solani* con cascarilla de arroz que impide la diseminación del inóculo por la lluvia (flecha). Nótese la destrucción total del cultivo en el suelo no cubierto (flecha) (Cortesía de H.D. Thurston).

El gran reto en la GIP de las virosis vegetales está en lograr reducir o anular la diseminación secundaria de los virus que en la naturaleza son transmitidos por vectores de forma no persistente, semipersistente o persistente (circulativa o no). La gran mayoría de virus fitopatógenos son transmitidos por vectores, y un 70% de los virus conocidos lo son por insectos homópteros. El uso de pantallas físicas para evitar o reducir drásticamente la infección natural juega un importante papel, especialmente en viveros. Así, el uso de recintos de malla anti-vector o invernaderos o túneles para cultivo protegido de plantas madre,

e incluso el cultivo de los plantones de cultivares más susceptibles al CTV –que es transmitido de forma semipersistente por pulgones- se ha generalizado, aunque no deja de tener algunas contraindicaciones en el contexto de la GIP (Foto 3).

Posiblemente la única posibilidad de cultivar plantas susceptibles a la infección natural por virus o por bacterias fitopatógenas transmitidas por vectores en zonas en las que ambos son endémicos, sea el cultivo intensivo o superintensivo bajo protección anti-vectores con **tratamiento con aceites** (véase más abajo) y tratamientos puntuales contra los vectores en el momento de máximo vuelo de los mismos. La **protección individual de árboles con mallas de plástico anti-vector** sería una estrategia menos costosa y sencilla de ser implementada, al menos tras la plantación, cuando la posibilidad de infección natural suele ser mayor por poseer más brotes suculentos y vigorosos. Esta estrategia se está utilizando en Florida para el control de la bacteriosis del huanglongbing de los cítricos en los primeros años tras la plantación.

Otras barreras físicas contra la transmisión de los virus se utilizan en campo y en viveros, como los **tratamientos con aceites de uso hortícola**, que son muy efectivos para disminuir la infección natural de virus de transmisión no persistente, como los potyvirus Y de la patata (Potato virus Y, PVY) y PPV en condiciones de campo en muy diversas zonas agroecológicas (Vidal et al., 2013). La eficacia preventiva de los aceites minerales de uso hortícola ha extendido primero su experimentación y después su aplicación a **aceites vegetales e incluso de pescado, para el tratamiento lo más respetuoso posible con el medioambiente.**

El uso de cortavientos, **plantas pantalla apetecibles para los pulgones** que al visitarlas y probar descargan el estilete de virus transmitidos de forma no persistente, es una eficaz estrategia para reducir la transmisión de ellos en condiciones naturales. Los individuos visitantes ya no serán capaces de transmitir si no adquieren de nuevo el virus. Por ello, el uso de plantas resistentes a la infección colocadas a modo de barrera en la dirección del viento dominante, evitan o reducen la infección de virus transmitidos de forma no persistente (virus de estilete). La siembra de plantas de flor entre hileras de cultivo de árboles frutales, no solo favorece la polinización al atraer a las abejas sino que también logra aumentar las poblaciones de enemigos naturales de pulgones y de otros insectos vectores, al incrementar la biodiversidad en los agroecosistemas. Todas esas técnicas, sin embargo, han de ser contrastadas en las condiciones particulares en las que se vayan a aplicar, para valorar su eficacia en el contexto holístico de los programas GIP que se estén aplicando o se vayan a aplicar.

En relación con los nematodos fitopatógenos, también existen diversas técnicas culturales que pueden integrarse en la GIP. Las plantas introducidas entre el cultivo pueden actuar como plantas trampa disminuyendo las poblaciones de nematodos. Así, las solanáceas *Solanum sisymbriifolium* y *S. scabrum* actúan de trampas del nematodo *Globodera pallida* causante de quistes en patata o papa. Si un cultivo trampa se cosecha o destruye antes de que finalice su ciclo, -cuando los juveniles y las hembras del nematodo todavía están en el interior de las raíces de la planta trampa-, la operación contribuye a reducir significativamente las poblaciones del patógeno. Para el control de nematodos fitoparásitos y vectores de virus, también se recomiendan cultivos de cobertura con efecto biofumigante o la incorporación en el suelo de cultivos de cobertura no huésped, huéspedes pobres o resistentes de los nematodos a controlar y que, además, produzcan compuestos tóxicos en el proceso de su desintegración, como son las brasicáceas, las compuestas y algunas gramíneas (Foto 4A, B) (Sorribas y Ornat, 2011).

Como también ocurre con las plagas de artrópodos y se ilustra a continuación, **la aplicación de una de las acciones para la GIP de una enfermedad puede influir sobre el desarrollo o control de otras concurrentes en un cultivo.** En Andalucía, los cultivos de garbanzo se siembran al principio de la primavera y son afectados conjuntamente y de forma grave por dos micosis, la marchitez vascular y la rabia, que son causadas, respectivamente, por *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* y *Didymella rabiei* (anamorfo: *As-*

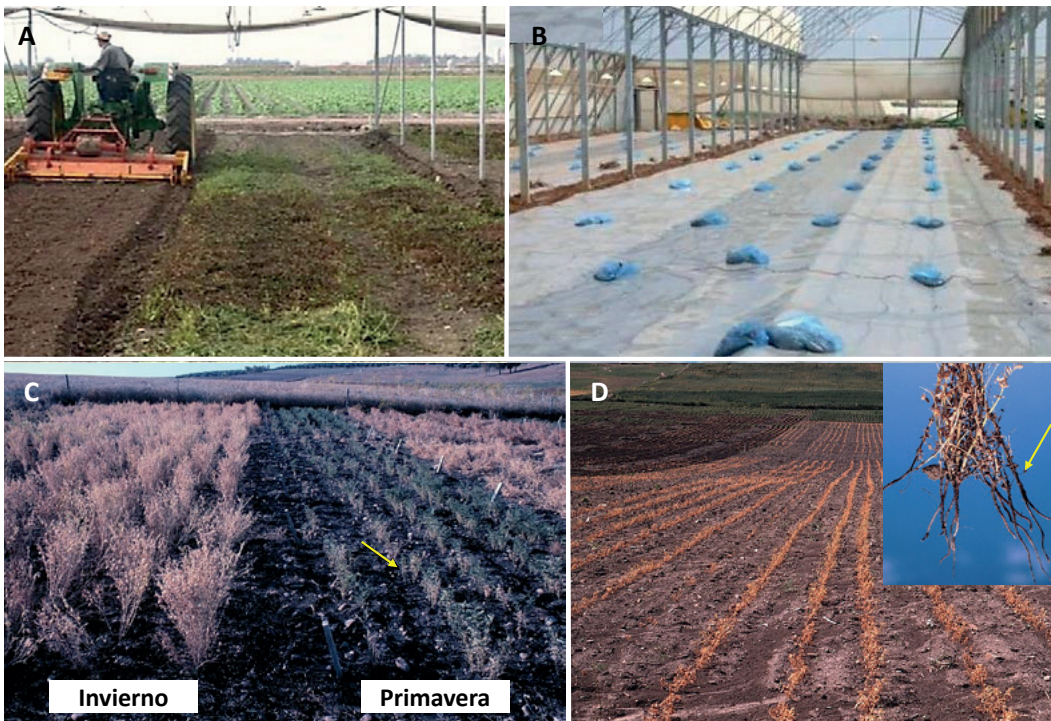


Foto 4. Modificación de las prácticas culturales que se pueden integrar con otras medidas control para la gestión integrada de enfermedades. **A, B.** Enterrado de un cultivo en verde de la crucifera *Diplotaxis tenuifolia* (A) y cubrición del suelo con una lámina de plástico transparente a la radiación luminosa incidente y opaco a la reflejada (B) -que conjuntamente se denomina biosolarización- para el control de la fusariosis vascular de la albahaca causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *basilici* (Adaptado de Klein, E., Katan, J., y Gamliel, A. 2011. Soil suppressiveness to Fusarium disease following organic amendments and solarization. Plant Dis. 95: 1116-1123. doi: 10.1094/PDIS-01-11-0065); **C.** Control de la fusariosis vascular del garbanzo en el cv. 'ILC 72' -resistente a la rabia (*Didymella rabiei*)- en un suelo infestado por *F. oxysporum* f. sp. *ciceris* en Santaella (Córdoba), mediante la siembra del cultivo en el mes de diciembre (invierno), comparado con el desarrollo severo de la enfermedad (flecha) en el cultivo de siembra primaveral (final de marzo). La fotografía se realizó 1 mes después de la siembra en primavera; nótese las vainas desarrolladas en el cultivo sembrado en invierno y la elevada incidencia de la enfermedad en el cultivo sembrado en primavera; **D.** Cultivo de garbanzo sembrado en invierno en Castro del Río (Córdoba) completamente destruido por la podredumbre de la raíz (flecha) causada por *Phytophthora megasperma*, un oomiceto habitante de suelo cuya patogénesis es favorecida por el exceso de agua en el suelo.

cochyta rabiei). Mientras que *F. oxysporum* f. sp. *ciceris* puede sobrevivir durante años mediante esporas especiales libres en el suelo (clamidosporas), infecta con prontitud la semilla germinada, y se establece en el xilema de la planta; *D. rabiei* solo puede sobrevivir limitadamente en restos de plantas afectadas que permanecen sobre el suelo, y ocasiona la muerte de los tejidos aéreos de la planta a los que infecta mediante esporas que son diseminadas por el viento y la lluvia. Asimismo, mientras que la marchitez vascular es favorecida por ambientes secos y temperaturas entre 22 y 28 °C que son frecuentes en las siembras de primavera, a mediados de marzo, en climas mediterráneos, la rabia lo es por ambientes lluviosos y temperaturas entre 15 y 25 °C (Navas-Cortés et al., 2007; Trapero-Casas y Kaiser, 1992).

La favorabilidad de los ambientes prevalentes en los cultivos de primavera para la marchitez vascular llevó a demostrar experimentalmente que el adelanto de la siembra a principios de invierno -favoreciendo el desarrollo vegetativo del cultivo durante periodos más fríos-, propicia el control de la marchitez vascular porque retrasa su inicio, ralentiza su desarrollo, y reduce la cantidad total de enfermedad y la pérdida de cosecha, comparado con las epidemias que se desarrollan en los cultivos de siembra habitual, a principio de primavera (Foto 4C) (Navas-Cortés et al., 1998; 2000). Sin embargo, la aplicabilidad de esta sencilla práctica agronómica no es simple, porque el beneficio neto del adelanto de la siembra en el control de la enfermedad es determinado por la virulencia de la raza del patógeno

existente en el suelo y la susceptibilidad del cultivar utilizado, y sus interacciones, de manera que para cultivares susceptibles solo es operativo si dicha raza es moderadamente virulenta y la GI de los ataques por una raza más virulenta solo es posible con cultivares moderadamente resistentes (Navas-Cortés et al., 1998). El nivel de control de los ataques por razas muy virulentas se puede incrementar, **combinando el adelanto de la fecha de siembra y el uso de cultivares parcialmente resistentes con el tratamiento de la semilla con estirpes seleccionadas de bacterias beneficiosas de los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas*.** Sin embargo, el efecto neto de estos agentes de control biológico fue menor en la fecha de siembra más efectiva por sí sola, a principio de enero, que en cultivos sembrados un mes más tarde, en los que el adelanto de la siembra respecto de la fecha habitual es de menor efecto por sí solo (Landa et al., 2004). En consecuencia, la utilización eficiente del adelanto de la fecha de siembra para la GI de la marchitez vascular del garbanzo requiere el conocimiento *a priori* de las razas del patógeno prevalentes en los lugares de aplicación y su virulencia, así como disponer de cultivares del huésped parcialmente resistentes al patógeno.

Por otra parte, la GI de una enfermedad mediante la combinación de diversas medidas de control no resulta de su mera yuxtaposición, porque el efecto neto de dicha combinación está sujeto a interacciones entre ellas e incluso puede influir sobre otras enfermedades del cultivo a proteger (Zadoks, 2001). En el caso de la marchitez del garbanzo, el mencionado adelanto de la siembra sitúa al cultivo ante condiciones ambientales excepcionalmente favorables para la rabia -cuya incidencia es escasa en los ambientes cálidos y secos de los cultivos de primavera-, y hace necesario que la utilización de esta práctica de cultivo para la GI de la marchitez vascular haya de ser llevada a cabo con cultivares de garbanzo altamente resistentes a *D. rabiei*, o con cultivares parcialmente resistentes y un programa de tratamientos fungicidas. Además, la aplicación práctica de las siembras de invierno en campos comerciales infestados por *F. oxysporum* f. sp. *ciceris* propició ataques severos de una podredumbre de raíces causada por el oomiceto *Phytophthora megasperma* -hasta entonces desconocida-, que es favorecida por el exceso de agua en el suelo que se produce en periodos lluviosos de las siembras invernales (Foto 4D).

Los ejemplos que hemos descrito ilustran claramente el nivel de complejidad que subyace en la GI de una enfermedad en un cultivo, y cómo dicha complejidad se incrementa notablemente cuando la sanidad de aquel requiere considerar conjuntamente la GI de otras enfermedades que pueden afectarlo durante su desarrollo, y más aún si a estas se suman la GI de las plagas y malas hierbas y de los tratamientos postcosecha. Todo ello implica que en la puesta en práctica de las estrategias de GI de enfermedades, plagas y malas hierbas subyace la necesidad de un amplio conocimiento específico sobre ellas, y justifica que, no obstante el esfuerzo de innovación que se ha hecho para fomentar la GIP por parte de la investigación científico-técnica y la transferencia de tecnología, la realidad es que la disponibilidad de auténticos programas de GIP para el manejo de las plagas, enfermedades y malas hierbas de los distintos cultivos en la actualidad es más bien escasa, y ello exige indagar acerca de sus causas. Los problemas son todavía mayores en el caso de las plantas forestales, cuyas plagas y patologías, salvo excepciones, han sido menos investigadas que las que afectan a cultivos agrícolas y para las que se dispone de menor cantidad de información científica y técnica para la aplicación de la GIP.

En los capítulos de la parte C de este libro hemos procurado describir el estado actual de una serie innovaciones en la Sanidad Vegetal que pueden ser de aplicación para mejorar su efectividad. Asimismo, se han puesto de manifiesto las posibles interferencias entre ellas que dificultan su integración compatible en programas GIP. Dado que la mayor parte de cultivos tienen un número de agentes nocivos que comprometen la cantidad y calidad de sus cosechas (y de postcosecha en casos determinados), se comprenderá la dificultad de conocer la efectividad de cada método de control para cada agente nocivo

y, más aún, las posibilidades de su uso integrado; esa dificultad es mayor en aquellos agentes nocivos que son exóticos o de emergencia reciente, respecto de los cuales existe muy escaso conocimiento y experiencia en la ciencia.

La aplicabilidad de un programa de GIP depende de varios factores, entre los cuales podemos destacar: (i) el realismo y las bases con que el programa se ha diseñado, es decir, el conocimiento por parte de la investigación científico-técnica de las condiciones en las que el programa va a ser aplicado y la adecuación de este a aquellas; (ii) la preparación especializada de los protagonistas de la transferencia de tecnología y el asesoramiento para que el agricultor pueda aplicar el programa de manera eficiente; (iii) la disponibilidad técnica y económica de los medios necesarios para aplicar el programa; y (d) el seguimiento por parte de especialistas de la aplicación del programa para poder evaluar su efectividad y, si es necesario, poder corregirlo adaptándolo a las condiciones locales.

C6.2.3. Limitaciones de la Gestión Integrada de Plagas

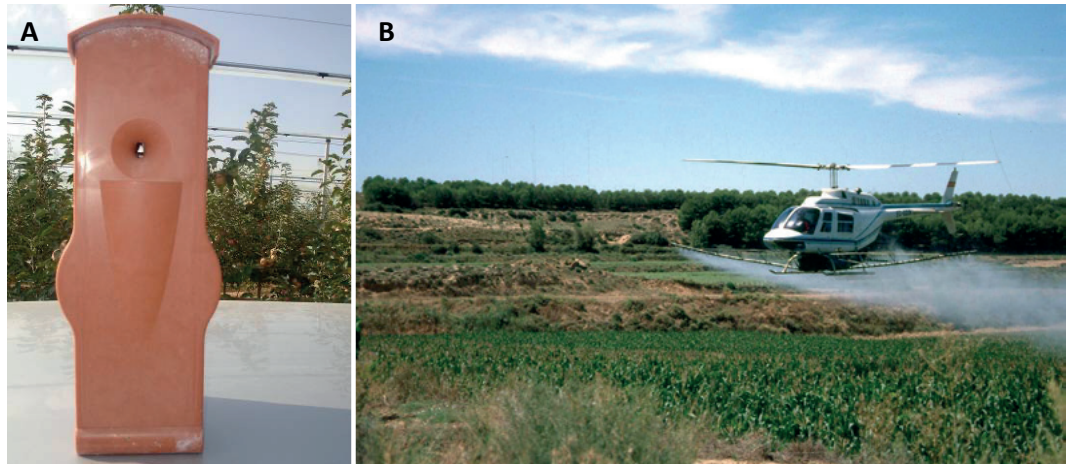
La complejidad del proceso de elaboración y validación de un programa de GIP, desde la investigación científico-técnica hasta su aplicación con éxito en condiciones concretas, da lugar a que se produzcan **múltiples limitaciones de índole diversa** que incluyen, entre otras: (i) las concernientes a conocimientos y técnicas; (ii) las de naturaleza económica y de comunicación; (iii) las relativas a la adopción por el agricultor o la industria en el caso de la postcosecha; y (iv) las concernientes a formación en cualquiera de las etapas del proceso de innovación.

Las limitaciones de conocimiento pueden provenir tanto de la falta de científicos con buena formación en las disciplinas necesarias, como de la falta de investigación multidisciplinar, máxime cuando nos falta una ciencia holística de la GIP tal como explicamos en un apartado posterior (también cf., Capítulo A2.). Las limitaciones de conocimiento también pueden derivar de la falta de la financiación suficiente de los proyectos de investigación sobre GIP, en particular para un tipo de investigación que: (i) es de largo recorrido; (ii) de resultados no necesariamente predecibles; (iii) dependiente de las condiciones específicas en las que se utiliza la GIP; y (iv) que raramente aporta soluciones rápidas, absolutas y de efectividad muy duradera. Lo cambiante de las condiciones en los cultivos y mercados que hemos puesto de manifiesto en capítulos anteriores (ej., cambio climático y de distribución geográfica de los agentes nocivos, introducción y establecimiento de especies o estirpes exóticas de agentes nocivos, aparición de resistencia a las medidas de control en los agentes nocivos, cambios de preferencia en los mercados de alimentos, etc.), exige casi siempre la constante puesta al día de los programas de GIP, aunque se hubieran aplicado con éxito inicialmente. **Un caso especial es el de las nuevas enfermedades causadas por agentes fitopatógenos no previamente descritos para la ciencia**, que son relativamente frecuentes entre las bacterias y muy frecuentes en el mundo de los virus, y en el de nuevas especies vectoras de patógenos, sobre todo los que afectan a determinados cultivos como el tomate y otras solanáceas, y a los cítricos. En estos casos se describen con frecuencia nuevos virus, la mayoría de las veces sin que sea posible disponer de información suficiente sobre su diversidad, vectores, epidemiología, susceptibilidad a ellos de cultivares comerciales, métodos de control cultural o biológico, etc., que requieren años de investigación y experimentación y que dificultan o imposibilitan su GI.

Las limitaciones técnicas suelen darse principalmente en los pioneros en la aplicación de la GIP en un territorio, ya que el mercado de insumos está poco incentivado en proveer de herramientas de aplicación muy minoritaria y a veces incluso sin apenas haber podido contrastar su efectividad y aceptación por los agricultores (Foto 5). Un ejemplo típico de este hecho ha sido la provisión al agricultor de enemigos naturales y microorganismos antagonistas de las plagas y enfermedades para el control

Foto 5. Técnicas de diferentes características que han facilitado mucho la aplicación de feromona para confusión sexual de plagas en programas de gestión integrada.

A. Dispensador de feromona para el control de plagas de frutales; **B.** Aplicación de feromona con pulverizador instalado en helicóptero para el control del taladro de maíz (*Sesamia nonagrioides*) mediante confusión sexual. (Cortesía de C. López).



biológico de estas. La lentitud con que se instaló la industria suministradora de enemigos naturales para el control biológico de plagas de cultivos de invernadero en algunos países de la cuenca mediterránea, obligó en un principio a la administración pública a poner en marcha insectarios para la cría de dichos organismos beneficiosos y a suministrarlos a los agricultores de forma gratuita en la segunda mitad del siglo pasado, para demostrar la viabilidad de la técnica en programas de GIP con un fuerte componente de control biológico.

Las limitaciones económicas son típicas en los inicios de muchos procesos de innovación tecnológica, entre ellos en la introducción de la GIP en la agricultura o silvicultura. Con la progresiva implantación de la GIP en un cultivo, se dan fenómenos de economías de escala con el abaratamiento de los materiales necesarios. Por ejemplo, el coste actual del trampeo masivo de la mosca de la aceituna (*Bactrocera oleae*, sinónimo *Dacus oleae*) que hoy se aplica con gran éxito en programas GIP del olivo en amplias zonas de la cuenca del Mediterráneo, es muy inferior al que tenía en los comienzos de la implantación del uso de la técnica a finales del siglo XX. Por otra parte, el reconocimiento por el mercado de las cualidades en términos de salubridad alimentaria de las cosechas obtenidas de cultivos en que se aplican programas GIP, similarmente a las de los productos de agricultura ecológica (cf., Capítulo B4.), podría conllevar un mayor precio que, junto con una habitual mejora del rendimiento, redundaría en el aumento de los beneficios del agricultor, aunque ello le lleve a tener que pagar más por unos materiales y servicios de mejor efectividad. Sin embargo, tal como se dice más abajo, apenas si ha habido un reconocimiento de la calidad de alimentos obtenidos con tecnología GIP en términos de salubridad alimentaria.

Una comunicación fluida entre todos los protagonistas del sistema agroalimentario relacionados o no con la Sanidad Vegetal es imprescindible para la GIP. Se trata de un proceso que debe ser muy dinámico, ya que cualquier factor que influya sobre la producción, conservación, transformación, comercialización y consumo de productos de alimentación puede influir de manera importante en la tecnología GIP a aplicar. En consecuencia, los responsables de diseñarla, divulgarla, asesorar su aplicación y ponerla en práctica, deben comunicarse con agilidad a fin de ir adoptando los cambios necesarios para que la GIP no pierda efectividad y poder responder a una demanda cambiante con la rapidez necesaria.

Como es obvio, un programa de GIP solo se aplica si el agricultor es receptivo a la innovación, está técnicamente formado para ejercerla y toma conciencia de la mejora y beneficios que le supone la adopción de esa tecnología. Ese proceso se facilita si el agricultor puede ver en la práctica dichas mejoras y beneficios, en comparación con la rutina de seguir con prácticas que no le suponen ningún esfuerzo de

cambio. Los ensayos de demostración *ad hoc* pueden ser decisivos en ese proceso o incluso el incentivar a agricultores pioneros para que ejerzan de prescriptor para sus vecinos. Estos ensayos de demostración se hacen más efectivos, si cabe, si los agricultores están asociados en cooperativas de producción.

Finalmente, la carencia actual de una adecuada formación en Sanidad Vegetal es una de las principales limitaciones para la implantación de programas completos y eficientes de GIP en España, y por ello queremos terminar señalando una preocupante falta de formación especializada en Sanidad Vegetal en toda la cadena agroalimentaria salvo honrosas excepciones, y en particular en los protagonistas de la producción, desde el científico hasta el agricultor. En el Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España ya se puso de relieve el insuficiente peso de la enseñanza de las disciplinas nucleares propias de la Sanidad Vegetal en la formación universitaria y no universitaria (Albajes et al., 2019), y a esta publicación remitimos al lector para tener una explicación pormenorizada de la situación y de las posibles acciones correctoras, que desafortunadamente todavía no se ha considerado llevar a cabo en España.

C6.2.4. La Gestión Integrada de Plagas en España

La práctica de la GIP está en expansión en España, pero la extensión de su uso es todavía insuficiente. Según el MAPA, la superficie de cultivos con GIP alcanzaba un total de 832.991 ha en 2014, correspondiendo la mayor extensión a Andalucía, seguida en orden decreciente de Extremadura, Aragón, Comunidad Valenciana, Cataluña, Murcia y las demás CC. AA. (<https://www.mapa.gob.es/es>). El olivar es el cultivo con mayor superficie en GIP, seguido de los cereales, arroz, algodón, frutales y cítricos, también en orden decreciente. La implantación de la GIP en toda la producción agrícola nacional se regula por los Reales Decretos 1311/2012 y 285/2021, el primero de los cuales establece el marco de actuación para conseguir el uso sostenible de los PP. FF. y un Plan de Acción Nacional para generalizar el uso de las prácticas de GIP en los cultivos y masas forestales españolas, y el segundo modifica algunos aspectos de dicho contenido y establece las condiciones de almacenamiento, comercialización, importación o exportación, control oficial y autorización de ensayos con productos fitosanitarios

Para facilitar la aplicación de la GIP en España, y siguiendo el referido Plan de Acción Nacional para el Uso Sostenible de Productos Fitosanitarios, el MAPA ha elaborado en esta última década más de 40 Guías de Gestión Integrada de Plagas, que tienen como finalidad servir de orientación a agricultores y asesores para conseguir implantar los principios de la GIP en la producción agrícola y silvícola nacional, según el Real Decreto 1311/2012. Las 36 guías GIP de cultivos agrícolas leñosos y herbáceos, y cuatro de especies forestales y de parques y jardines, se pueden consultar en la web del MAPA (<https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sanidad-vegetal/productos-fitosanitarios/guias-gestion-plagas/forestales/default.aspx>).

C6.3. La necesidad de una ciencia holística de la Gestión Integrada de Plagas

Aunque el concepto y la aplicación de la GIP han sido incorporados en la legislación de la mayor parte de los países y sus prácticas son recomendadas en las agriculturas y silviculturas más progresistas, carecemos todavía del desarrollo de una ciencia holística de GIP, un grave inconveniente para su rápida innovación y progreso (Stenberg, 2017), a pesar de que este vacío ya había sido puesto de manifiesto hace bastantes años, al poco de haberse enunciado los principios básicos de la GIP (Kogan, 1986). La práctica de la GIP en los cultivos que se comenta en este capítulo también debería ser complementada con la prevención integrada de insectos fitófagos, agentes fitopatógenos y malas hierbas que se describe con detalle en los capítulos A1. y A2. siendo necesario remarcar que el vacío científico es

aún mucho más acusado en el caso de la mayoría de los organismos nocivos que hemos denominado exóticos. En los apartados que siguen estudiamos las aproximaciones disciplinares que se han hecho a la ciencia holística de la GIP, que deberían permitir la mejora en la investigación científico-técnica necesaria e imprescindible para optimizar su aplicación.

C6.3.1. Las aportaciones de la Ecología: progresos y limitaciones

La Ecología es la disciplina científica que, por definición, debería permitir la aproximación holística al estudio y manejo de los agroecosistemas que se mencionaron anteriormente (Kogan, 1998). Por una parte, la Ecología ha estudiado históricamente los ecosistemas naturales o espacios protegidos y raramente se ha interesado por ecosistemas manipulados por el hombre; y por otra, los ecólogos no han prestado excesiva atención a estos últimos. Esta separación se ha intentado mitigar en las décadas más recientes con la aplicación de la Ecología al estudio y manejo de los agroecosistemas dando lugar a una disciplina denominada con el término 'Agroecología'. En los últimos años, este término ha emergido con fuerza en la bibliografía sobre ecología de los agroecosistemas, con la pretensión de englobar toda la complejidad de estos últimos incluidas sus relaciones con el medioambiente, y de proponer **soluciones integradas a la mejora de la productividad y sostenibilidad de la agricultura y la silvicultura en general, y a la de la Sanidad Vegetal en particular** (cf., Capítulo B4.). De hecho, se ha escrito que la Agroecología es la aplicación de la ecología a todo el sistema alimentario (Mason et al., 2020). Así, **la Agroecología ha incorporado objetivos de ciencias sociales y economía**, de manera que está facilitando el diálogo entre esas tres disciplinas y se ha convertido también en **la base de un movimiento social para transformar la agricultura** e incluso el sistema alimentario de las sociedades modernas (Tomich et al., 2011). Sin embargo, sin ánimo de desestimar sus importantes contribuciones a la gestión integrada de los agroecosistemas para el control de plagas, enfermedades y malas hierbas, **no podemos obviar la crítica a algunas de las posturas adoptadas por la Agroecología más allá de la ciencia**, y a menudo justificadas al abogar simplemente por el **acercamiento de la agricultura a la naturaleza**, y por responder a determinada **cultura social que utiliza términos científicos sin someterlos al análisis de la experimentación científica** y que, por lo tanto, caen a menudo en **dogmatismos**. Entre estos últimos, los principios ecológicos en el estudio de ecosistemas naturales preconizan que los sistemas diversificados son más estables y resilientes a las perturbaciones y, por tanto, la probabilidad de explosiones demográficas de insectos fitófagos, agentes fitopatógenos y malas hierbas en agro-ecosistemas disminuye con la diversificación de plantas en, o cerca de, los campos cultivados, lo que conlleva habitualmente **la mejora de la biodiversidad que se ha propugnado como herramienta fundamental de la Sanidad Vegetal** (Beillouin et al., 2019). Notemos, sin embargo, que otros meta-análisis han concluido que la incidencia de las plagas y enfermedades **no está consistentemente relacionada con la diversificación del paisaje circundante a los campos de cultivo** (Karp et al., 2018).

Ese mismo dogmatismo, que a menudo encierra a la tecnología de producción y protección vegetales dentro de límites muy estrictos, no responde necesariamente a las necesidades de todas las sociedades. Así, por ejemplo, del mencionado **acercamiento de la agricultura a la naturaleza se ha nutrido en buena parte la propuesta de la agricultura de conservación**. Sin embargo, esa misma propuesta se ha señalado por algunos autores como **incapaz de mitigar la inseguridad alimentaria de los países subsaharianos** (Corbeels et al., 2020). Probablemente, la selección de algunos de los objetivos propugnados por la Agroecología en la investigación científico-técnica podría aportar mejoras sustanciales en la productividad y sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios, como se ha demostrado hasta ahora, aunque necesitamos sin duda aumentar y acelerar la innovación tecnológica en Sanidad Vegetal para responder a los retos que hemos ido señalando en los capítulos anteriores del presente libro. **El contexto medioambiental, económico y social en el que se desarrollan la agricultura y silvicultura actuales, hace que el frecuente reduccionismo de la investigación científico-técnica deba ser sensible a los re-**

tos globales a que están sometidos el sistema alimentario mundial y el manejo de las masas forestales, de cuya disminución de superficie ha advertido la FAO repetidamente (cf., Capítulo A2.).

Pero volvamos de nuevo a la necesidad de tener una disciplina de análisis integrado de los agroecosistemas, que permita identificar a los componentes de estos últimos, así como las relaciones y propiedades que deben ser mantenidas, o incluso potenciadas, para asegurar la sostenibilidad del funcionamiento de un agroecosistema. Cuando aquellos son conocidos, la **modelización ecológica puede permitir examinar diversos diseños que satisfagan los objetivos propuestos**. El conocimiento ecológico, por tanto, permite la elección de diseños de agroecosistemas en función de los objetivos que los diferentes protagonistas del sistema alimentario hayan elegido o incluso pactado en plataformas organizadas para la innovación de dicho sistema. Resaltemos que, de esta manera, la investigación científico-técnica del agroecosistema mediante la ecología ofrece alternativas sobre las que decidir en función de los intereses del sector alimentario. Como ejemplo, puede citarse el trabajo de Berthet et al. (2018), en el cual se analizan tres sistemas intensivos de cultivo en Francia -pero representativos de muchos otros lugares del mundo-, para cada uno de los cuales se elaboran varios posibles diseños en función de los objetivos que se persigan en la gestión de los tres sistemas de cultivo. Esta aproximación, además, pretende ganar capacidad predictiva de lo que puede ocurrir en los tres sistemas estudiados cuando se den cambios: (i) en los organismos intervinientes (ej., en las especies invasoras); (ii) en las condiciones abióticas (ej., cambio climático); (iii) en las disponibilidades técnicas (ej., nuevos productos o procedimientos en agricultura y silvicultura incluyendo los organismos genéticamente modificados (OMGs) y plantas editadas genéticamente para mejorar su resistencia a patógenos determinados o tolerancia a estreses abióticos); (iv) en el mercado (ej., precios y preferencias de consumo); o (v) en la percepción social y en consecuencia en la legislación. Los tres sistemas aludidos por Berthet et al. (2018) fueron: (a) un primer sistema en el que se pasó de una agricultura con rotaciones mixtas a una alta intensificación de cereal, y en el que se estudió la persistencia de una población de aves depredadoras (el sisón común, *Tetrax tetrax*) según la disponibilidad de presas y los cambios en el uso del suelo; (b) un segundo caso de paisaje de pastizales subalpinos para estudiar la provisión de los servicios ecosistémicos en función de la biodiversidad funcional de los pastizales; y (c) un tercer caso de pastizales húmedos en los que los investigadores estudiaron los intereses contrapuestos de manejo del ganado y la viabilidad de las poblaciones de algunas aves.

A título de ejemplo, resumiremos el proceso de estudio y provisión de conclusiones para el primer caso, en el que se consideran aspectos globales de todos los componentes del agroecosistema y del mercado junto con los concernientes a la Sanidad Vegetal. La intensificación de los cereales conllevó el aumento del uso de PP. FF. de síntesis, y mayor homogeneidad del paisaje con la consiguiente reducción de pastizales, de lo que se derivó el empeoramiento de la calidad del agua y pérdida de diversidad. Sin embargo, todavía hoy se mantienen poblaciones de aves con interés de conservación, aunque la especie en la que se focalizó el estudio se ha reducido en un 90 %. Esta reducción se atribuyó al descenso de las poblaciones de insectos, que son la presa imprescindible del ave depredadora en determinados meses del año. La modelización ecológica del ecosistema, y el uso de la ecología de metapoblaciones, permitieron fijar en un 10 % la superficie mínima con pastizales que era necesaria en el paisaje para mantener las poblaciones del ave en densidades viables para su permanencia. El contrato con agricultores y la subvención por parte de la UE (esquemas agroambientales) permitió mantener esos mínimos de la superficie de pastizales que alcanzó un 13 % en 2011. Posteriormente, por cambios en la Política Agraria Común (PAC), esos contratos decayeron y la superficie de pastizales disminuyó con el consiguiente impacto negativo en las poblaciones del sisón común. Para restaurar la situación, se creó una comisión integrada por las tres partes interesadas -agricultores, extensionistas e investigadores- que permitió financiar un programa de investigación de manera que un diseñador de ecosistemas enriqueció el estudio ecológico anterior y se configuraron varios paisajes alternativos con hábitats de alta calidad de distinta naturaleza, proporción y distribución. Cada paisaje alternativo llevaba consigo una valoración de su respuesta a los distintos

intereses representados en la comisión mixta, de forma que las configuraciones óptimas del paisaje se podrían ir adaptando a las condiciones cambiantes de todo tipo (Berthet et al., 2018).

C6.3.2. La aproximación evolutiva para el manejo de las interacciones bióticas

Otra perspectiva para enfocar de forma global los problemas de Sanidad Vegetal e insertarlos en los agroecosistemas de manera integrada junto con sus otros componentes, es la **aproximación evolutiva para el manejo de las interacciones bióticas** y los modelos predictivos, que se han utilizado menos frecuentemente que los principios ecológicos, pero de los que hay ejemplos notables (Thrall et al., 2011). De hecho, tal como señalan Peterson et al. (2018), los primeros principios de la GIP se enunciaron en buena medida como respuesta al desarrollo de resistencia a los medios de control en los organismos nocivos, en particular a los PP. FF. Según esos últimos autores, **es momento de reintroducir consideraciones evolutivas en la investigación sobre la GIP, no de forma contrapuesta a las consideraciones ecológicas sino para enriquecerlas y complementarlas**. Pero la repercusión de las interacciones evolutivas en la GIP también tiene gran notoriedad en la aplicación efectiva y durabilidad de los cultivares resistentes contra agentes fitopatógenos, clave en la GIP de enfermedades (cf., Capítulo C3.) -sin olvidar la vinculación entre devastaciones en nuevas especies huésped y las introducciones de organismos nocivos exóticos con los cuales no han coevolucionado (cf., Capítulo B1.)-, de manera que entre las interacciones evolutivas que inciden en la GIP podemos considerar, en términos generales: (i) la resistencia a PP. FF. en agentes nocivos e impactos de aquellos en las relaciones planta - parásito; (ii) la virulencia sobre resistencias específicas contra razas y estirpes de fitopatógenos y artrópodos fitófagos (cf., Capítulo C3.); (iii) los cambios rápidos y acumulativos en agentes de control biológico de plagas y enfermedades (cf., Capítulo C4.); (iv) la evolución de las interacciones planta - fitófago y planta - patógeno, así como planta - fitófago (o patógeno) - agente de control biológico; y (v) la predicción de la emergencia de nuevas plagas, enfermedades y malas hierbas como respuesta a eventos como el cambio climático, la alteración en el uso del suelo o la simplificación del agroecosistema. A continuación, exponemos algunos ejemplos que aportan predicciones útiles para la gestión más sostenible de los agroecosistemas, a fin de prevenir cambios indeseables para la Sanidad Vegetal en las relaciones bióticas o el desarrollo de resistencias a PP. FF.

- (i). Resistencia a PP. FF. y otras técnicas de control en agentes nocivos. Tal como hemos dicho en el Capítulo B3. de este libro, ya se han descrito un elevado número de casos en una gran diversidad de especies de artrópodos fitófagos, bacterias, hongos y oomicetos fitopatógenos, y malas hierbas, en los que **la aplicación frecuente de sustancias activas que tienen un modo de acción específico ha propiciado la prevalencia en sus poblaciones de estirpes con resistencia a uno o más PP. FF.** El desarrollo de este fenómeno -que es considerado uno de los principales problemas emergentes de la Sanidad Vegetal- se está incrementado durante los últimos años, porque la progresiva disminución en la diversidad de sustancias activas disponibles dificulta la aplicación de las estrategias de alternancia o mezcla recomendadas para la gestión de la resistencia a aquellas (Giner Gil y Alonso Prados, 2019). En el caso de los hongos y oomicetos fitopatógenos, la resistencia a los fungicidas es pre-adaptativa y cromosómica, y la aparición de estirpes resistentes comenzó prontamente en la década de 1970 tras la utilización de los primeros fungicidas sistémicos y de acción específica -benzimidazoles-, y creció con rapidez con la introducción sucesiva de otros (ej., fenilamidas, dicarboximidas, inhibidores de la síntesis del esteroles, inhibidores externos de la quinona, anilino pirimidinas, amidas del ácido carboxílico, etc.) (Brent y Hollomon, 2007).

En la actualidad se dispone de una considerable cantidad de datos sobre los principios ecológicos que subyacen en la resistencia a los agentes nocivos, así como de la naturaleza genética y molecular de las dianas del PF en el organismo nocivo y de los mecanismos metabólicos implicados en aquella. Muchos de esos mecanismos son comunes a varios casos de resistencia referidos

en la bibliografía especializada, lo que facilita la elaboración de modelos que permitan predecir y reducir la aparición de nuevos casos. Por ejemplo, van den Bosch et al. (2014) **consideraron que la gestión de la resistencia a los fungicidas aumentaría en efectividad si se basara en los principios que gobiernan el desarrollo de las resistencias**, y propusieron como tal “la reducción del producto del coeficiente de selección de estirpes resistentes -i.e., la diferencia entre la tasa de crecimiento per capita de las estirpes resistentes y las sensibles a una sustancia activa- y el tiempo de exposición del patógeno a dicha sustancia activa”. Y Elderfield et al. (2018) llevaron a cabo la aplicación de este principio en modelos epidemiológicos de la septoriosis del trigo (*Zymoseptoria tritici*, sinónimo *Septoria tritici*) y el oídio de la vid (*Erysiphe necator*, sinónimo *Uncinula necator*), **para demostrar que la mezcla de fungicidas es más eficiente que la alternancia en la aplicación de ellos para la gestión de resistencias**, independientemente de la enfermedad y los parámetros epidemiológicos en los modelos considerados. Más difícil está siendo el conocimiento sobre otros mecanismos de resistencia, entre los cuales podemos citar aquellos ligados a cambios en el comportamiento, ya comprobados entre los insectos fitófagos que muestran adaptaciones a nuevas rotaciones y cambios en prácticas culturales, en principio diseñadas para el control de plagas, entre otras finalidades.

- (ii). Virulencia sobre resistencias específicas contra razas y estirpes de agentes fitopatógenos y artrópodos fitófagos. Los agentes fitopatógenos poseen una gran capacidad adaptativa cuando el contacto con sus huéspedes se prolonga en el tiempo, y esta capacidad les permite superar la resistencia específica contra sus razas y estirpes presente en cultivares de aquellos tras periodos de tiempo relativamente cortos (cf., Capítulo C3.). Este fenómeno es particularmente frecuente en hongos y oomicetos biotrofos causantes de mildius, oídios y royas -pero también es relevante en bacterias, hongos necrotrofos, y en virus-, y su desarrollo obedece a la **selección direccional en favor de las razas y estirpes con nuevas virulencias** que se plasma en los ciclos de crecimiento y quiebra (*boom* y *bust*) de los cultivares resistentes introducidos en los agroecosistemas (cf., Capítulo C3., Foto 3). El desarrollo de nuevas virulencias gravita de manera importante sobre la utilización de resistencia específica en las estrategias de GIP, si bien **puede ser gestionado mediante estrategias en la mejora genética y la utilización de cultivares resistentes que consideren el potencial evolutivo de las poblaciones de los patógenos** (McDonald y Linde, 2002; McDonald, 2014).

En otros campos, entre los artrópodos fitófagos, el desarrollo de las técnicas de secuenciación genómica está permitiendo la rápida evaluación de la composición genética de las poblaciones de campo, tecnología que ha recibido el nombre de ecogenómica, que está ayudando a comprender los fenómenos micro-evolutivos en la adaptación de esos agentes nocivos a huéspedes vegetales o a condiciones ambientales cambiantes.

- (iii). Cambios en agentes de control biológico de plagas y enfermedades. En ocasiones se han observado cambios evolutivos en agentes de control biológico o en sus huéspedes/presas como resultado de la interacción durante larga duración entre ambos. En consecuencia, podría pensarse que la suelta de enemigos naturales exóticos para el control de agentes nocivos igualmente exóticos, sería una oportunidad para identificar o predecir nuevos impulsores de cambios evolutivos en ecosistemas agrícolas o naturales. Sin embargo, ese no ha sido el caso, ya que no se han observado cambios evolutivos rápidos en los agentes nocivos o sus enemigos naturales y como máximo se han comprobado cambios en la frecuencia de determinados genotipos en las poblaciones de ambos como resultado de la interacción agente nocivo - enemigo natural. No deja de ser sorprendente ese hecho si tenemos en cuenta que algunas interacciones entre agentes nocivos exóticos y enemigos naturales exóticos tienen ya más de 100 años de historia.

- (iv). Evolución de las interacciones planta - fitófago y planta - patógeno y también planta - fitófago (o patógeno) - agente de control biológico. Como se ha estudiado en el control biológico de los tumores causados por cepas de *Agrobacterium* spp. y *Rhizobium* spp. (cf., Capítulo C4.), en este primigenio caso de éxito se produjeron fracasos en el control debido a la transferencia del plásmido Ti desde las cepas patógenas al agente de control biológico, la cepa *Rhizobium rhizogenes* K84 (sinónimo *Agrobacterium radiobacter* K84), por conjugación bacteriana tanto en raíces como en tumores de plantas. Para solucionar el problema creado se obtuvo por manipulación genética la nueva cepa K1026, derivada de la anterior tras una delección para impedir la transferencia del plásmido Ti (Penyalver et al., 2000). La nueva cepa se comercializa en muchos países y sigue siendo eficiente en el control de la enfermedad en cuatro continentes más de 30 años después de su obtención; y
- (v). Predicción de la emergencia de nuevas plagas, enfermedades y malas hierbas como respuesta a eventos como el cambio climático, la alteración en el uso del suelo o la simplificación del agroecosistema. En este ámbito, la mayor parte de predicciones se han hecho basadas en modelos ecológicos y raramente en modelos evolutivos. De hecho, existe un cierto debate sobre si los fenómenos de micro-evolución modulan simplemente las consecuencias ecológicas del cambio climático o realmente mitigan o exacerbaban sus efectos. Por ejemplo, la evolución de resistencia a la desecación en mosquitos vectores de la enfermedad del dengue en Australia, ha conllevado su mayor adaptación a la disminución de la humedad causada por el cambio climático en zonas donde la enfermedad humana es endémica. Por otra parte, la mejora en el conocimiento de la respuesta de las especies al cambio climático exige la consideración simultánea de varios caracteres más que de caracteres individuales, en particular de aquéllos que están genéticamente correlacionados.

C6.4. Integración de otros protagonistas del sistema agroalimentario en la Gestión Integrada de Plagas

Buena parte del contenido de este libro concerniente a los retos que tiene planteados la Sanidad Vegetal en esta década se ha centrado en los productores, y solo esporádicamente hemos aludido a otros protagonistas del sistema agroalimentario (Capítulo A2. y Parte B). Entre estos últimos podríamos incluir muy particularmente a los consumidores, pero también a los comercializadores (mayoristas y minoristas) y a la industria transformadora, sin cuya implicación será difícil que los productores modernicen la Sanidad Vegetal en las líneas apuntadas. Todos estos protagonistas adicionales del sistema agroalimentario incluyen tanto incentivos como limitaciones, que repercuten sobre el cumplimiento de los objetivos y las estrategias de la Sanidad Vegetal, puesto que inciden sobre las **preferencias y precios de mercado de los alimentos**. Otra vía a través de la cual esos otros protagonistas inciden sobre la Sanidad Vegetal en los cultivos y sus cosechas es el **tránsito de productos y vehículos a cualquier escala geográfica**, ya que este es un factor determinante en la **diseminación de agentes nocivos exóticos, sean invasores o no**, que es uno de los mayores problemas que hoy día tiene la Sanidad Vegetal a nivel global. Solo la **consideración integrada de todos los protagonistas del sistema alimentario** va a permitir desarrollar y aplicar programas de GIP que sean técnicamente practicables, económicamente viables, socialmente aceptables y ambientalmente seguros.

La **sensibilidad de los consumidores acerca de los medios y métodos de control de uso en Sanidad Vegetal para la protección de las cosechas es muy variable**, en función de la disponibilidad de los alimentos objeto de producción, de su capacidad adquisitiva, y de su sensibilidad hacia la salubridad alimentaria con especial atención a los residuos de PP. FF. y su toxicidad. En otra sección de este libro

(cf., Capítulo B3.), hemos hecho referencia al porcentaje significativo de muestras de alimentos ofrecidos en los mercados de la UE cuyo análisis indicó una cantidad de residuos por encima de los límites máximos de residuos autorizados (LMR). No es de extrañar, pues, **la gran aceptación que tienen algunas etiquetas reguladas, como la de agricultura ecológica (AE)** (cf., Capítulo B4.), así como la intención de usar términos como 'bio', 'eco', 'natural' u 'orgánico' para los requisitos de la AE, y fundamentalmente la garantía de ausencia de residuos de PP. FF. Llama la atención, sin embargo, **la poca aceptación que ha tenido la etiqueta de 'producción integrada'** u otras equivalentes que han intentado promocionar algunas Consejerías de Agricultura de CC. AA. en España, para apoyar la aplicación de métodos de GIP de plagas, enfermedades y malas hierbas.

El **insuficiente interés despertado por la GIP**, que ha resultado inferior al esperado por el MAPA y los organismos autonómicos que la gestionan, es debido posiblemente a: (i) la carencia de información suficientemente detallada suministrada a los agricultores; (ii) insuficientes cursos de formación en GIP para cada cultivo; y (iii) la complejidad de la propia GIP. A todo ello se une una escasa demanda de este tipo de productos, probablemente por ignorancia del consumidor medio sobre las ventajas de la GIP, que contrasta, sorprendentemente, con su mayor conocimiento teórico sobre las de la AE. Posiblemente la escasa inversión que se ha hecho para su popularización y promoción entre los consumidores pueda haber contribuido a ello.

Las vías de comercialización de los alimentos también influyen grandemente en la práctica de la Sanidad Vegetal, en particular por el tiempo que transcurre entre la aplicación de un PF por el agricultor o en postcosecha y la venta por el minorista del producto tratado, que a veces puede ser menor de 24 h cuando el sector productor abastece mercados de su proximidad con productos de consumo en fresco. En ese caso, es difícil poder aplicar productos con plazos de seguridad (aquel que garantiza no sobrepasar los LMRs) menores de 24 h. **Los comercializadores**, sean minoristas o mayoristas, son en general los responsables de la calidad de los alimentos que se venden y de que estos cumplan los requisitos respaldados por etiquetas de calidad. Ello les obliga a disponer de herramientas y mecanismos de control de la calidad, que se puedan aplicar en el origen del producto o en el propio mercado. En el primer caso, el agricultor es más consciente de la necesidad de ajustar las prácticas culturales, y en particular las encaminadas a velar por la Sanidad Vegetal, a las exigencias del mercado. Las innovaciones de eficiencia contrastada en materia de Sanidad Vegetal que ayudan a cumplir con los estándares exigidos por el mercado, serán adoptadas más rápidamente si los comercializadores trasladan las exigencias del mercado al productor, tal como se indicó al referirnos a la importancia de la comunicación en el proceso de aplicación de la GIP en la agricultura y silvicultura.

La industria procesadora de los alimentos se ve a menudo afectada por plagas y microorganismos fitopatógenos, así como por la contaminación de los alimentos con micotoxinas o con patógenos humanos (cf., Capítulo A1.), bien sea durante el cultivo, el almacenamiento, la conservación o el transporte, o bien en los procesos de transformación porque los agentes nocivos se encuentren en las instalaciones o equipamientos. Independientemente de la fase en que se produzca la contaminación, la industria necesita desarrollar métodos propios de control y muy a menudo debe recurrir a PP. FF. con los consiguientes riesgos de favorecer la aparición de cepas resistentes a aquellos. Las pérdidas debidas a las causas referidas varían según conciernan a los patógenos de postcosecha (que se han estimado globalmente en al menos un 10 % del producto cosechado (cf., Capítulo A1.), o a las consecuencias de micotoxicosis o de contaminaciones patogénicas (que son más difíciles de estimar; cf., Capítulo A1., Apartado A1.4.).

La integración de todos los protagonistas del sistema agroalimentario, que van más allá de los productores, hace todavía más difícil encontrar una disciplina que permita diseñar programas de GIP adaptados

a cada situación particular. Buena parte de esa complejidad queda recogida en el artículo de Dara (2019), a la cual nos hemos venido refiriendo a lo largo de este libro y no vamos a repetir aquí. Quizás en este apartado, en el que pasamos revista a todos los protagonistas que inciden en la definición y aplicación de un programa GIP, **se hace necesario remarcar la importancia de la comunicación entre todos esos protagonistas**. Para que esa comunicación sea efectiva, debe contar con las técnicas apropiadas y con la formación adecuada en todos los eslabones. Según Jindal et al. (2013), el éxito de un programa de GIP de una plaga del arroz en el sur de Asia hizo que, posteriormente, muchos más países en desarrollo lanzaran sus propios programas de GIP. El éxito de algunos de estos programas ha llevado al establecimiento de la *Global IPM Facility*, bajo los auspicios de la FAO, el *United Nations Development Program* y el Banco Mundial, que son las entidades coordinadoras y promotoras. Sin duda, los avances en nuevas tecnologías como biotecnología y nanotecnología darán mayor impulso al control de organismos nocivos para la agricultura y la silvicultura en el futuro. Sin embargo, el desarrollo de numerosas tecnologías emergentes y oportunidades para lograr el objetivo de reducir las pérdidas de cosecha y postcosecha causadas por los organismos nocivos, no asegura que ninguna de ellas, por sí sola, sea la panacea para la GIP universal de plagas, enfermedades o malas hierbas, excepto en contextos muy específicos.

Por otro lado, a nivel global, la producción de alimentos procedentes de cultivos transgénicos ha crecido constantemente durante las últimas cuatro décadas, pero incluso para esos cultivos modificados genéticamente dicha tecnología no ha desplazado por completo el uso de PP. FF. de síntesis. La medida en que podamos disminuir nuestra dependencia de dichos PP. FF. en el futuro previsible, sin comprometer la reducción de las pérdidas de cosecha para lograr rendimientos aceptables u óptimos con menos insumos químicos, dependerá no solo de los avances en la ciencia y en la GIP, sino también de la disposición de la sociedad a aceptar nuevas tecnologías junto con sus riesgos inherentes y presumiblemente menores (Jindal et al., 2013). En el futuro inmediato, el riesgo y la regulación serán los determinantes clave de la práctica de la GIP, y el mundo de la ciencia y del conocimiento habrá de esforzarse en reclamar, al menos, que las decisiones regulatorias gubernamentales sobre la misma estén basadas en sólidas bases científicas y experimentales.

C6.5. Bibliografía

- Albajes, R., Recasens, J., y Jiménez Díaz, R.M. 2019. Formación universitaria y no universitaria en Sanidad Vegetal. Págs. 103-138, en: R.M. Jiménez Díaz y M. M. López, eds. Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España. UCOPress. Editorial Universidad de Córdoba. Córdoba.
- Beillouin, D., Ben-Ari, T., y Makowski, D. 2019. A data set of meta-analyses on crop diversification at the global scale. *Data in Brief*, 24. 103898. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.103898>.
- Berthet, I.T., Bretagnolle, V., Lavorel, S., Sabatier, R., Tichit, M., y Segrestin, B. 2018. Applying ecological knowledge to the innovative design of sustainable agroecosystems. *J Appl. Ecol.* 56: 44-51.
- Brent, K.J., y Hollomon, D.W., 2007. Fungicide resistance in crop pathogens: How can it be managed?. FRAC (Fungicide Action Resistance Committee) Monograph N° 1, 2ª edición.
- Cambra, M., Gorrís, M.T., Marroquín, C., Román, M.P., Olmos, A., Martínez, M.C., Hermoso de Mendoza, A., López, A., y Navarro, L. 2000. Incidence and epidemiology of *Citrus tristeza virus* in the Valencian Community of Spain. *Virus Res.* 71: 75-85.
- Capote, N., Pérez-Panadés, J., Monzó, C., Carbonell, E.A., Urbaneja, A., Scirza, R., Ravelonandro, M., y Cambra, M. 2008. Assessment of the diversity of *Plum pox virus* and aphid populations on transgenic European plums under Mediterranean conditions. *Transgenic Res.* 17: 367-377.
- Corbeels, M., Naudin, K., Whittbred, A.M., Kühne, R., y Letourmey, P. 2020. Limits of conservation agriculture to overcome low crop yields in sub-Saharan Africa. *Nat. Food* 1: 447-454. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0114-x>.
- Dara, S.K. 2019. The new integrated pest management paradigm for the modern age. *J. Integr. Pest Manag.* 10: 1-9.
- Elderfield, J.A.D., López-Ruiz, F.J., van den Bosch, F., y Cunniffe, N.J. 2018. Use of epidemiological principles to explain fungicide resistance management tactics: why do mixtures outperform alternations. *Phytopathology* 108: 803-817.
- Folinova, S.Y. 2013. Developing and understanding of cross-protection by *Citrus tristeza virus*. Págs. 30-38, en: Frontiers Research Topics: *Closteroviridae*. R. Flores, P. Moreno, B. Falk, G.P. Martelli, y W.O. Dawson, eds. Frontiers in Microbiology. <http://www.frontiersin.org/microbiology>.

- Giner Gil, M., y Alonso Prados, J. L. 2019. Disponibilidad de materias activas eficientes en el control de plagas, enfermedades y malas hierbas de cultivos estratégicos y usos menores: de la Directiva 91/414/CEE al Reglamento 1107/20. Págs. 503-526, en: R.M. Jiménez Díaz y M. M. López, eds. Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España. UCOPress. Editorial Universidad de Córdoba. Córdoba.
- Jacobsen, B.J. 1997. Role of plant pathology in integrated pest management. *Annu. Rev. Phytopathol.* 35: 373-391.
- Jiménez Díaz, R.M. 2009. La protección del rendimiento: Programas IPM para armonizar el control de enfermedades y los compromisos de sostenibilidad agrícola. Págs. 163-182, en: Jaime Lamo de Espinosa, ed. El Nuevo Sistema Agroalimentario Global. Mediterráneo Económico 15. Fundación CAJAMAR. El Ejido (Almería).
- Jiménez-Díaz, R.M., y López González, M.M. (Eds.). 2019. Libro Blanco de la Sanidad Vegetal en España. UCOPress. Editorial Universidad de Córdoba. Córdoba.
- Jindal, V., Dhaliwal, G.S., y Koul, O. 2013. Pest management in 21st century: roadmap for future. *Biopestic. Int.* 9: 1-22.
- Karp, D.S., Chaplin-Kramer, R., Meehan, T.M., Martin, E.M., et al. 2018. Crop pests and predators exhibit inconsistent responses to surrounding landscape composition. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 115: E7863-E7870.
- Kendrick, J.B., Jr. 1988. A view point on Integrated pest management. *Plant Dis.* 72: 647.
- Kogan, M. 1986. *Ecological Theory and Integrated Pest Management Practice*. Wiley Interscience. New York.
- Kogan, M. 1998. Integrated pest management: historical perspectives and contemporary developments. *Annu. Rev. Entomol.* 43: 243-270.
- Kogan, M. 1999. Integrated pest management: constructive criticism or revisionism. *Phytoparasitica* 27: 2-6.
- Landa, B.B., Navas-Cortés, J.A., y Jiménez-Díaz, R.M. 2004. Integrated management of *Fusarium* wilt of chickpea with sowing date, host resistance, and biological control. *Phytopathology* 94: 946-960.
- Mason, R.E., White, A., Bucini, G., Anderzén, J., Méndez, V.E., y Merrill, S.C. 2020. The evolving landscape of agroecological research. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* DOI: 10.1080/21683565.2020.1845275.
- McDonald, B.A. 2014. Using dynamic diversity to achieve durable disease resistance in agricultural ecosystems. *Trop. Plant Pathol.* 39: 191-196.
- McDonald, B.A., y Linde, C. 2002. Pathogen population genetics, evolutionary potential and durable resistance. *Ann. Rev. Phytopathol.* 40: 349-379.
- Moriones, E. 2016. Manejo integrado de enfermedades virales. Págs. 391-413, en: Enfermedades de Plantas Causadas por Virus y Viroides. M.A. Ayllón, M. Cambra, C. Llave, y E. Moriones, eds. Sociedad Española de Fitopatología (SEF) y Bubok Publishing SL. España. ISBN. 978-84-686-8986-9.
- Navarro, L. 1986. Citrus certification in Mediterranean countries. *Bull. OEPP/EPPO Bull.* 16: 227-238.
- Navas-Cortés, J.A., Hau, B., y Jiménez-Díaz, R.M. 1998. Effect of sowing date, host cultivar, and race of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* on development of *Fusarium* wilt of chickpea. *Phytopathology* 88: 1338-1346.
- Navas-Cortés, J.A., Hau, B., y Jiménez-Díaz, R.M. 2000. Yield loss in chickpeas in relation to development of *Fusarium* wilt epidemics. *Phytopathology* 90: 1269-1278.
- Navas Cortés, J.A., Landa, B.B., Méndez-Rodríguez, M.A., y Jiménez-Díaz, R.M. 2007. Quantitative modeling of the effects of temperature and inoculum density of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* races 0 and 5 on the development of *Fusarium* wilt in chickpea cultivars. *Phytopathology* 97: 564-573.
- Penyalver, R., Vicedo, B., y López, M.M. 2000. Use of the genetically engineered *Agrobacterium* strain K1026 for biological control of crown gall. *Eur. J. Plant Pathol.* 106: 801-810. <https://doi.org/10.1023/A:1008785813757>.
- Peterson, R.K.D., Higley, L.G., y Pedigo, L.P. 2018. Whatever happened to IPM? *Am. Entomol.* 64: 146-150.
- Scorza, R., Callahan, A., Dardick, C., Ravelonandro, M., Polak, J., Malionowsky, T., Zagrai, I., Cambra, M., y Kamenova, I. 2013. Genetic engineering of Plum pox virus resistance: 'HoneySweet' plum-from concept to product. *Plant Cell, Tissue and Organ Cult.* 115: 1-12. doi:10.1007/s11032-11240-013-0339-6.
- Sorribas, F.J., y Ornat, C. 2011. Estrategias de control integrado de nematodos fitoparásitos. Págs. 115-131, en: Enfermedades Causadas por Nematodos Fitoparásitos en España. M.F. Andrés y S. Verdejo-Lucas, eds. Sociedad Española de Fitopatología (SEF) y Phytoma España. Valencia. ISBN: 978-84-935247-6-0.
- Stenberg, J.A. 2017. A Conceptual framework for integrated pest management. *Trends in Plant Sci.* 22: 759-769.
- Stern, V.M., Smith, R.F., van den Bosch, R., y Hagen, K.S. 1959. The integrated control concept. *Hilgardia* 29: 81-101.
- Tenllado, F., Llave, C., y Díaz-Ruiz, J.R. 2008. Nuevas aplicaciones biotecnológicas basadas en interferencia por RNA (RNAi) para el control de las enfermedades virales en plantas. Págs. 391-405, en: V. Pallás, C. Escobar, y P. Rodríguez-Palenzuela, J.F. Marcos, eds. Herramientas Biotecnológicas en Fitopatología. Sociedad Española de Fitopatología-SEF y Mundi-Prensa, Madrid. ISBN: 978-84-8476-319-2.
- Thrall, P.H., Oakeshott, J.G., Fitt, G., Southerton, S., Burdon, J.J., Sheppard, A., Russell, R.J., Zalucki, M., Heino, M., y Denison, R.F. 2011. Evolution in agriculture: the application of evolutionary approaches to the management of biotic interactions in agro-ecosystems. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2010.00179.x>.
- Tomich, T.P., Brodt, S., Ferris, H. et al. 2011. Agroecology: A review from a global-change perspective. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 36: 193-222.

Trapero-Casas, A., y Kaiser, W.J. 1992. Influence of temperature, wetness period, plant age, and inoculum concentration on infection and development of *Ascochyta* blight of chickpea. *Phytopathology* 82: 589-596.

van den Bosch, F., Oliver, R., van den Berg, F., y Paveley, N. 2014. Governing principles can guide fungicide-resistance management tactics. *Annu. Rev. Phytopathol.* 52: 175-195.

Vidal, E., Zagrai, L., Milusheva, S., Bozhkova, V., Tasaheva-Terzieva, E., Kamenova, I., Zagrai, I., y Cambra, M. 2013.

Horticultural mineral oil treatments in nurseries during aphid flights reduce *Plum pox virus* incidence under different ecological conditions. *Ann. Appl. Biol.* 162: 299-308. ISSN 0003-4746. doi:10.1111/aab.12022.

Zadoks, J.C. 2001. IPM philosophy: an appraisal of pros and cons in botanical epidemiology. Págs. 76-88, en: Proceedings 8th International Workshop on Plant Disease Epidemiology "Understanding Epidemics for Better Disease Management". Ouro Preto. Brasil.



EPÍLOGO

Epílogo: el reto multifacético de la seguridad y salubridad alimentaria global mediante la protección de las plantas con estrategias sostenibles

Cuando los autores de este Libro nos decidimos a escribir un epílogo para concluir la obra, nos planteamos cómo acabarlo sin reincidir de nuevo en ideas ya expuestas a lo largo de los distintos capítulos. Por eso, aun a sabiendas de que no se van a aportar ideas nuevas, porque de lo contrario se deberían haber plasmado en las numerosas páginas anteriores, sí nos parece que este es el lugar donde destacar los temas que han necesitado un mayor esfuerzo y dedicación de los autores, y probablemente de los revisores, para exponerlas.

Quizá se podría empezar recordando un doble reproche que se suele hacer a la agricultura: (i) una de cada diez personas habitantes del planeta Tierra pasa hambre; y (ii) algo más de la cuarta parte de las emisiones de gases con efecto invernadero las producen la agricultura y la silvicultura. Y ello nos ha llevado a definir como insoslayables los dos principales desafíos que tienen planteadas esas dos actividades: (i) aumentar la productividad agrícola y al mismo tiempo mejorar la sostenibilidad en las estrategias y técnicas para contrarrestar el primero de los reproches; y (ii) considerar la influencia del cambio climático asociado al incremento de los referidos gases para mitigar sus efectos. Y la Sanidad Vegetal, como no podía ser de otra manera, debe ser partícipe de forma relevante en ambos retos. No en vano, al menos una tercera parte del producto de los cultivos agrícolas y masas forestales se pierde por la acción sobre ellos de las plagas, las enfermedades y las malas hierbas, a pesar de los avances técnicos que se han venido produciendo durante las últimas décadas y del esfuerzo que se hace para disminuir esas pérdidas, sin los cuales aquella proporción de mermas se duplicaría.

Es conveniente recordar también la importancia económica de la agricultura y la silvicultura en España que justifica la necesidad de una Sanidad Vegetal dinámica y actualizada. El impulso del sector agroalimentario para amortiguar el impacto de las crisis que se han producido recientemente, primero por la pandemia de la COVID-19 y en la actualidad por la invasión rusa de Ucrania, se hace patente en los datos del Observatorio de 2021 del sector agroalimentario de Cajamar. Este informe muestra que en 2021 España fue el principal productor de vegetales y frutas frescas, aceite de oliva y cítricos de la Unión Europea (UE), con cuotas de mercado del 20,9 %, 21,0 %, 51,7 % y 55,9 %, respectivamente; y al mismo tiempo la economía española es la cuarta economía exportadora de productos agroalimentarios, con un superávit comercial que es el segundo más alto de la UE con un valor máximo histórico de exportaciones de 61.646 millones de euros. Además, la productividad del sector agroalimentario español fue un 29,1 % superior a la media de la UE en 2021.

Respecto a la incidencia de la agricultura española sobre el medioambiente, digamos que las emisiones de gases de efecto invernadero del sector agroalimentario español se redujeron en un 2,2 % en 2020, aunque todavía se emiten 56 millones de toneladas de dichos gases que suponen el 25,6 % de las emisiones totales del país. Por otro lado, España ha logrado reducir un 9 % el riesgo por el uso de productos fitosanitarios en la agricultura en 2019, pero se posiciona como la tercera economía con menor reducción de dicho riesgo en la UE. Esta posición en el ranking supone un serio reto de eficiencia que se debe afrontar en los próximos años y que viene exigido por la legislación de la UE.

El doble reto de mejorar la **productividad y la sostenibilidad** que afecta de lleno a la Sanidad Vegetal como parte sustancial que es de las actividades agrícolas y silvícolas, la relaciona con la salud humana,

la ganadera y la medioambiental hasta el punto que se ha propuesto definir un ámbito global del bienestar bajo el nombre de **Salud Única** o *Circular, One Health*. Esa es otra de las ideas que se asoman en las páginas de este Libro, aunque probablemente su exposición hubiera merecido una mayor extensión, aun considerando que los pioneros de la misma apenas si han iniciado su elaboración. Digamos, simplemente, que la unicidad del concepto proviene no solamente de que los cuatro ámbitos comparten buena parte de los organismos nocivos para la salud humana, animal, vegetal y medioambiental, sino también porque las intervenciones practicadas o simplemente propuestas en cada uno de ellos afectan a los otros y al bienestar global. La erosión que se ha venido produciendo en los contenidos curriculares de las disciplinas científicas que sostienen a la Sanidad Vegetal, junto con la carencia actual en España de estudios reglados de Medicina de los Vegetales que estén reconocidos por los distintos estamentos y de una profesión que la proyecte socialmente, dificultan la visibilidad y la consecución de los objetivos de esta Salud Única en los aspectos relacionados con las actividades de la agricultura y la silvicultura.

Esa visión global de la Salud se refleja asimismo en la selección que hemos hecho de los múltiples, variados y heterogéneos **retos que tiene planteada la Sanidad Vegetal** en la actualidad para ser desarrollados en este Libro, porque aun reconociendo que no son los únicos sí se encuentran entre los más relevantes para la agricultura europea en base a la experiencia de los autores. Estos retos y también todos los capítulos, están más enfocados a los problemas de los cultivos agrícolas que a los de las masas forestales, pero ello no es más que un reflejo de la proporción de investigación dedicada en España a los primeros, que es muy superior a la de los segundos, aunque para ambos se reclama mucha más inversión en proyectos específicos, tanto a nivel global como en la UE. Es indudable que el aumento de los costes de producción agraria como consecuencia del encarecimiento de la energía y del conflicto bélico en Ucrania, son otros retos que está afrontando el sector agroalimentario español y que afectan a su rentabilidad y competitividad. A estos se unen otros no menos importantes, como son el impacto de la nueva Política Agraria Común (PAC) y de la ley de la cadena alimentaria, que no se tratan en este Libro, focalizado en la Sanidad Vegetal.

El primero de los retos que se ha abordado en el Libro es la **creciente introducción y establecimiento de organismos nocivos exóticos** en nuevas áreas, por el aumento del transporte de personas y del comercio internacional de plantas y productos vegetales en el contexto globalizado del mundo actual. La falta de datos fiables y globales, así como la escasa atención que se le presta al tema en el comercio internacional, dificultan la efectividad con que se puede prevenir ese fenómeno; no obstante, tanto la legislación hoy en día vigente en la UE como la que se anuncia para los próximos años deberían ayudar a paliar las consecuencias de la incesante introducción de organismos exóticos nocivos en todos los países. Otro de los retos seleccionados se refiere a los **efectos y amenazas del cambio climático**, que afecta a la distribución global e incidencia sobre cultivos y masa forestales de los organismos nocivos protagonistas de la Sanidad Vegetal, tanto nativos como exóticos. Los modelos disponibles hoy día para predecir las consecuencias del cambio climático en la distribución e incidencia de los organismos nocivos en la agricultura y silvicultura, precisan disponer de datos sobre su biología que permitan conocer de manera fiable la respuesta de ellos a las modificaciones directas e indirectas asociadas a dicho cambio. Otro de los retos desarrollados concierne las consecuencias de la **restricción creciente en el uso de los productos fitosanitarios**, que se ha acentuado en las últimas décadas en varias regiones del mundo, y en particular en la UE, y su sustitución por prácticas culturales preventivas y bioplaguicidas como herramientas para la gestión integrada de las plagas y enfermedades actualmente presentes en España y la UE y de las que son de alto riesgo de introducción. En el capítulo correspondiente se trata de predecir los cambios en los productos fitosanitarios que eviten, o por lo menos disminuyan, los efectos indeseables de muchos de ellos. En muchos países se han buscado soluciones a esos retos a través de la llamada **agricultura ecológica** y, razón de ello, en otro capítulo se ha abordado el estudio de la situación actual, beneficios y limitaciones de este tipo de agricultura, cada año más practicada en España, porque la demanda de alimentos ecológicos es creciente a nivel global.

A continuación, entre los ámbitos de innovación que pretenden dar respuesta a los retos anteriormente mencionados, se han escogido los seis que probablemente recogen la mayor parte de avances científicos y tecnológicos que se están dando en las disciplinas de la Sanidad Vegetal. El primero e ineludible paso en la resolución de un problema de Sanidad Vegetal es su **diagnóstico rápido, preciso y fiable, se trate de una enfermedad, plaga o mala hierba**, y en ello se ha avanzado considerablemente en el último decenio, en particular apoyándose en los desarrollos de nuevas técnicas moleculares. Sin embargo, falta mucho en el recorrido de progreso hacia un diagnóstico múltiple, de bajo coste y sostenible. Además, los avances en tecnologías diagnósticas no deben soslayar a las técnicas más tradicionales de identificación de agentes nocivos de los cultivos y las masas forestales, ni la necesidad de formación especializada del actor en el diagnóstico para la imprescindible valoración del problema en campo. Un segundo ámbito de innovación escogido ha sido aquel que permite ajustar los insumos necesarios en cantidad, lugar y oportunidad a los requerimientos que el diagnóstico del problema exige; es el conjunto de técnicas de la llamada **agricultura de precisión**, señalando las distintas velocidades a las que se mueven los eslabones de la cadena alimentaria, con sofisticadas posibilidades para la agricultura de precisión en ciertos cultivos, pero con técnicas muy conservadoras en otros de escasa rentabilidad. La Inteligencia artificial, como por ejemplo el Chat GPT4, ya está siendo usada en numerosos campos.

Los **cultivares resistentes a los agentes fitopatógenos o a los artrópodos fitófagos que causan plagas** son elemento clave de los Programas de Gestión Integrada de plagas y enfermedades, y su desarrollo se nutre también de los progresos científicos que están experimentando la Genética, la Mejora Genética, la Fisiología Vegetal y la Biología Molecular, entre otras disciplinas. Dicho desarrollo recoge también el avance considerable del conocimiento en las relaciones entre las plantas y sus organismos nocivos, un campo de enorme complejidad como también lo es el de las relaciones tróficas entre los fitopatógenos, los artrópodos fitófagos y las malas hierbas con sus antagonistas y enemigos naturales, que constituyen la base del **control biológico** que es objeto de otro capítulo. Ninguno de esos progresos en las técnicas de control de plagas, enfermedades y malas hierbas serían sustancialmente efectivos, si no contáramos con mejores conocimientos de cómo cambia la intensidad de una enfermedad en el espacio y el tiempo o las variaciones en ambos del número de individuos de artrópodos fitófagos y malas hierbas. Sin lugar a dudas, las **innovaciones en epidemiología de enfermedades vegetales y en la dinámica de poblaciones de organismos nocivos** contribuyen a optimizar su prevención y control, ya que nos están permitiendo conocer mejor cómo, cuándo y con qué mecanismos los agentes nocivos causan las pérdidas repetidamente mencionadas en distintos capítulos.

Para concluir con las aportaciones de la innovación tecnológica y del conocimiento que se precisan para dar respuesta a los retos planteados a la Sanidad Vegetal en el siglo XXI, hemos destacado en el último capítulo la necesidad de tener una **visión holística del agroecosistema** a la hora de analizarlo, monitorizarlo e intervenir en él para que su manejo sea satisfactorio. Además, esta visión holística propicia que se promueva y mejore la coordinación y colaboración multisectorial e interprogramática para buscar sinergias entre todos los interesados que contribuyan a poner en práctica las nuevas estrategias de gestión; incluso abogamos para incorporar la ecología del paisaje en esa visión holística, de manera que la ordenación de cultivos y masas forestales, las relaciones con hábitats naturales o seminaturales y el manejo de los mismos sean tenidos en cuenta a la hora de proponer **soluciones integradas** a los problemas planteados por las enfermedades, plagas y malas hierbas. La **Gestión Integrada de Plagas (*sensu lato*)** es una aproximación imprescindible si queremos avanzar en la Sanidad Vegetal en la dirección de aumentar la productividad y sostenibilidad de la agricultura y la silvicultura.

Teniendo en cuenta todos los **problemas actuales de la investigación, transferencia de tecnología y formación agraria en España**, quizá algún lector se haya sorprendido también de no encontrar en este Libro un capítulo dedicado a la situación actual de la formación en materia de Sanidad Vegetal, máxime

cuando en los currículum vitae de los autores incluidos al principio de la obra se aprecia claramente que esa ha sido una de las principales actividades profesionales de los tres. Aunque la inversión empresarial en I+D del sector agroalimentario español creció un 3,1 % en 2019 hasta alcanzar los 365 millones de euros -el valor más alto de las últimas dos décadas-, este crecimiento es inferior al 4,6 % que fue la media registrada por este sector en la UE, como venía ocurriendo desde hace una década. Pero en cambio, somos el país de la UE que más proyectos de innovación e investigación agrícola y forestal desarrolló en 2021, contribuyendo con el 27,4 %, seguido de Italia y los Países Bajos. Hubiera sido muy apropiado señalar aquí también la situación de la I+D+i en Sanidad Vegetal en España, pero hemos considerado que esas materias están ya muy presentes directa o indirectamente en casi todos los capítulos, y que sintetizarlas por separado podría interpretarse como que constituyen solo una parte de las necesidades para el progreso de la Sanidad Vegetal de este decenio, cuando estamos convencidos de que sin ellas no habrá respuesta mínimamente satisfactoria a los retos enunciados.

A los lectores que hayan llegado hasta aquí en el recorrido del Libro, les agradecemos su interés y les animamos a que nos hagan llegar sus opiniones y críticas a lo expuesto por los tres autores y para ello tienen las direcciones de correo electrónico en los CV de los mismos al final del libro.

Finalmente, es necesario recordar que tanto el medio agrícola como las masas forestales constituyen las mejores herramientas de que se dispone en la actualidad para neutralizar la contaminación que produce el medio urbano e industrial, y que es imprescindible que se establezcan más conexiones del medio rural con la técnica, la ciencia y el conocimiento para un progreso real de la agricultura y silvicultura del siglo XXI. Como indica la FAO en La Agenda 2030 del Desarrollo Sostenible, **para conseguir la transición global a la alimentación y la agricultura sostenibles, es imprescindible mejorar la protección ambiental, la resiliencia de los sistemas y la eficiencia en el uso de los recursos** y en todos ellos juega un papel estelar la Sanidad Vegetal.

An aerial photograph of a vineyard, showing rows of grapevines and a white building in the center. The image is overlaid with a semi-transparent teal color.

AUTORES

Rafael Manuel Jiménez Díaz (Écija, Sevilla, 1945)

Doctor Ingeniero Agrónomo, Universidad Politécnica de Madrid (1976), Master of Science en Patología Vegetal, Universidad de Cornell, NY (EE. UU.) (1976) y Profesor Emérito de la Universidad de Córdoba (UCO). Ha sido: Catedrático Numerario de Patología Vegetal en la ETSIAM de la UCO (1977-2015), Profesor de Investigación en excedencia en el Instituto de Agricultura Sostenible del CSIC (1988-2015), Vicerrector de Investigación de la UCO (1981-1983), Presidente de la Sociedad Española de Fitopatología (1981-1984), Director del Instituto de Agricultura Sostenible del CSIC (1989-1995), Vicepresidente de la Unión Fitopatológica Mediterránea (1991-1993), Coordinador Científico-Técnico del Área de Ciencias Agrarias del CSIC (1992-1995), Profesor Visitante en las Universidades de Cornell (1983-84) y del Estado de Pennsylvania (EE. UU.) (2004), Experto Externo del *Working Group on Directive 200/29 Fungi, Plant Health Unit* de la *European Food Safety Authority* (EFSA) (2014), y Presidente de la Asociación Española de Sanidad Vegetal (AESaVe) (2012-2017). Sus investigaciones conciernen el desarrollo de estrategias innovadoras, eficientes, y ambientalmente respetuosas para la gestión integrada de enfermedades de plantas. Ha dirigido 29 Tesis Doctorales, 43 proyectos de investigación financiados por agencias nacionales e internacionales y 15 Convenios o Contratos de Investigación con Empresas y Administraciones. Es autor de 185 artículos científicos en revista científicas internacionales del JCR, 210 artículos de divulgación y capítulos de libros. Es autor de ocho libros, y ha registrado 11 cultivares de garbanzo en España y EE. UU., 2 clones de acebuche resistentes a la verticilosis en la UE, y 12 patentes de protocolos de diagnóstico molecular de patotipos y razas de hongos fitopatógenos. Es Académico Correspondiente de las Reales Academias: de Doctores de España (Sección Ingeniería); de Ciencias, Bellas Artes y Buenas Letras 'Luis Vélez de Guevara' de Écija; y de Ciencias, Bellas Letras y Nobles Artes de Córdoba; ha recibido el Premio Rey Jaime I a la Protección del Medio Ambiente y el Premio de Investigación XXV Aniversario de la Universidad de Córdoba; Modalidad Agro-ganadera y Alimentación, y es Miembro Distinguido (*Fellow*) Electo de la Sociedad Americana de Fitopatología (APS) y Socio de Honor de la Sociedad Española de Fitopatología.

Dirección electrónica: ag1jjidir@uco.es

María Milagros López González (Vitoria, 1952)

Ingeniera Agrónoma especialidad Fitotecnia (1975) y Doctora Ingeniera Agrónoma (1989) por la Universidad Politécnica de Valencia (1975). Inició sus investigaciones con el Programa INIA/BIRF del Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento y el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA) en el Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) en Angers y Burdeos, Francia (1976-1977). Funcionaria en el INIA CRIDA 07, de Moncada, Valencia y transferida desde 1983 a la Generalidad Valenciana, al Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). Realizó una estancia sabática en el USDA-United States Department of Agriculture en Orlando, Florida, EE. UU. (1989-1990). Responsable del Laboratorio Nacional de Referencia de Bacterias Fitopatógenas, desde 1994, por convenio con el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Investigador principal IVIA y Profesor de Investigación IVIA (2005-2017), dirigió el Departamento de Bacteriología del Centro de Protección Vegetal y Biotecnología hasta su jubilación. Su investigación se ha centrado principalmente en la prevención integrada de bacteriosis en España y ha coordinado o participado en 29 proyectos internacionales de investigación, 40 proyectos nacionales y en 12 con empresas. Ha publicado más de 160 artículos científicos en revistas SCI y más de 110 en otras revistas, más de 120 capítulos de libros, editado cinco libros y es coautora de ocho patentes. Ha recibido cinco premios nacionales y dirigido 23 tesis doctorales. Miembro de la Red Nacional de Alerta Biológica (RE-LAB), representante español en el Panel de Bacteriología de la European

and Mediterranean Plant Protection Organisation (OEPP/EPPO) (1996-2017), coordinadora y redactora de cinco protocolos de diagnóstico de la International Plant Protection Convention de la FAO, consultora en la European Commission Plant Health Standing Commission (1994) y en la European Food Safety Authority (EFSA) (2012). Evaluadora científica de l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire, de l'Alimentation, l'Environnement et du Travail (ANSES) de Francia (2012). Miembro de varias Juntas Directivas de la Sociedad Española de Fitopatología, de la que fue Presidenta (2009-2012) y Socia de Honor. Miembro de la Junta Directiva de la Asociación Española de Sanidad Vegetal (AESaVe) (2012-20).

Dirección electrónica: mm52lopez@gmail.com

Ramon Albajes (Barcelona, 1951)

Ingeniero Agrónomo y Doctor Ingeniero Agrónomo por la Universidad Politécnica de Madrid (1973, 1978). Profesor y Catedrático de Entomología Agrícola y Control Integrado de Plagas en las Universidades Complutense, Politécnica de Madrid y de Catalunya, y de Lleida. Investigador del Centro CERCA Agrotecnio. Profesor de esas materias también en otros cursos españoles e internacionales. Líneas de investigación: Biología y Control de la mosca mediterránea de la fruta, Biología de parasitoides y depredadores para control biológico de plagas, Control Integrado de plagas de hortícolas de invernadero y cultivos florales, Biología y Control de Plagas de cultivos extensivos (maíz y alfalfa), Biología de los vectores del BYDV, Impacto de variedades OGM-Bt en objetivos no diana, Ecología del paisaje en relación con la biología y control de plagas. Proyectos y publicaciones científicos: ha participado y coordinado numerosos proyectos españoles e internacionales de investigación científica y de transferencia de tecnología. Colaboración en convenios con empresas del sector. Es autor de publicaciones en revistas de carácter científico y editor de revistas científicas y colaborador en diversos libros internacionales sobre la temática de su labor investigadora. Labor desarrollada en organismos internacionales: miembro de la Organización Internacional de Control Biológico (IOBC-OILB). Coordinador del grupo de trabajo de la OILB sobre Control Integrado en Cultivos Protegidos en Clima Mediterráneo (1990-2003). Miembro del grupo de trabajo de 'Sostenibilidad de OGMs' (2005-2016). Posteriormente, miembro del Consejo, vicepresidente, tesorero y miembro del comité auditor de la IOBC (OILB)-WPRS (sucesivamente desde 2004 a 2022). Vicepresidente del Comité Asesor Científico del Instituto de Investigación Agroinnova de la Universidad de Turín durante 10 años (2012-2022). Miembro de la Institució Catalana d'Estudis Agraris (ICEA).

Dirección electrónica: ramon.albajes@udl.cat



Real
Academia
de Ingeniería



La sanidad vegetal en la agricultura y la silvicultura

Retos y perspectivas para la próxima década

Este libro pretende mostrar resumidamente al lector no familiarizado con la Sanidad Vegetal el papel que esta desempeña en la agricultura y la silvicultura y vislumbrar el que puede tener en el futuro próximo, para el que se anuncian cambios sustanciales en el sistema agroalimentario mundial. La oportunidad de dicho objetivo es doble. De una parte, por la relevancia que la Asamblea General de la Naciones Unidas reconoció a la Sanidad Vegetal al declarar el 2020 como Año Internacional de la Sanidad Vegetal, celebración que fue prolongada en 2021 como consecuencia de la pandemia causada por la Covid 19.

La concienciación social en los países del mundo desarrollado de que una alimentación suficiente y saludable es indispensable para mejorar la salud de la población, junto con la evidencia de que las zoonosis y las contaminaciones de los productos vegetales con patógenos humanos y hongos toxigénicos repercuten sobre la salud humana, han favorecido la consideración unitaria del sistema sanitario humano, ganadero, agrícola y medioambiental dando lugar a un concepto explícitamente formulado bajo el nombre de Salud Única o Global (One Health) (Capua, 2020).

www.raing.es

