

GABRIEL PÉREZ-LUCAS
JOSÉ M. VEIGA DEL BAÑO
SIMÓN NAVARRO

MANUAL PARA EL ANÁLISIS DE RESIDUOS DE PLAGUICIDAS EN MATRICES ALIMENTARIAS



**GABRIEL PÉREZ-LUCAS
JOSÉ M. VEIGA DEL BAÑO
SIMÓN NAVARRO**

MANUAL

PARA EL ANÁLISIS DE RESIDUOS DE PLAGUICIDAS EN MATRICES ALIMENTARIAS



Madrid • Buenos Aires • México • Bogotá

© Gabriel Pérez-Lucas, José M. Veiga del Baño, Simón Navarro, 2026 (edición ebook)

Reservados todos los derechos.

«No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.»

Ediciones Díaz de Santos

Internet: <http://www.editdiazdesantos.com>

E-mail: ediciones@editdiazdesantos.com

ISBN: 978-84-9052-604-0 (edición papel)

e-ISBN: 978-84-9052-605-7 (edición ebook)

Depósito legal: M-16899-2026

Diseño de cubierta y Fotocomposición: P55 Servicios Culturales

Agradecimientos

Gracias a los gestores y especialistas en seguridad alimentaria que compartieron su visión sobre los desafíos actuales de los LMR (Límites Máximos de Residuos) de plaguicidas en el comercio internacional y por ser el recordatorio constante de por qué la inocuidad alimentaria es vital para la sociedad actual; sus perspectivas han contribuido, sin duda, a dar a este texto un enfoque práctico y real.

A nuestras familias y amigos, por su paciencia infinita durante la gestación de esta obra. Gracias por entender que, tras cada página, hubo un tiempo que os pertenecía y que la ciencia —que no entiende de horarios— nos pidió prestado.

Invitación a la lectura

El *Manual para el Análisis de Residuos de Plaguicidas en Matrices Alimentarias* es una obra básica para entender uno de los retos más importantes en la actualidad, que es garantizar alimentos seguros en un mundo donde la producción agrícola y la inocuidad alimentaria deben convivir en equilibrio. A través de un enfoque riguroso, actual y multidisciplinar, los autores nos conducen desde los conceptos fundamentales sobre plaguicidas y sus riesgos hasta las técnicas analíticas más avanzadas para su detección en alimentos.

Su lectura resulta especialmente valiosa para estudiantes, analistas, técnicos de laboratorio, gestores de calidad, profesionales del sector agroalimentario y responsables de la gestión del riesgo relacionada con los residuos de plaguicidas. Este libro contribuye notablemente a la formación de todas aquellas personas interesadas en los aspectos técnicos de los residuos de plaguicidas, revelando el papel crucial que tiene la ciencia analítica en la protección de la salud pública y del medio ambiente.

En definitiva, es una obra completa y muy bien estructurada que invita a profundizar en un ámbito tan complejo y esencial para la seguridad alimentaria del presente y del futuro.

Victorio José Teruel Muñoz

*Subdirector General de Gestión de la Seguridad Alimentaria
Organismo Autónomo Agencia Española de Seguridad Alimentaria y
Nutrición (AESAN)*

ÍNDICE

Agradecimientos	IX
Invitación a la lectura	XI
Prólogo	XVII
Preface	XXI
Listado de abreviaturas.....	XXV
1. Plaguicidas. Características, propiedades y aplicación agrícola.....	1
1.1. Clasificación	4
1.2. Toxicidad.....	6
1.3. Aplicación agrícola.....	9
1.4. Efectos ecotoxicológicos	17
1.5. Estadísticas de uso	22
1.6. Uso de plaguicidas y cambio climático	24
Bibliografía consultada	25
2. Formación y evolución de los residuos de plaguicidas	
 en la planta.....	29
2.1. Naturaleza de los residuos	29
2.2. Expresión de los residuos.....	30
2.3. Factores determinantes del depósito de plaguicida	30
2.4. Eliminación de residuos tras el tratamiento.....	32
2.5. Curvas de disipación de plaguicidas, límites máximos de residuos y plazos de seguridad.....	36
2.6. Transferencia de residuos durante el procesado de productos agroalimentarios	38
2.7. Planes de control de residuos en la UE.....	44
Bibliografía consultada	57

3. Sistemas de gestión para el análisis de residuos de plaguicidas:	
Buenas Prácticas de Laboratorio	
y Norma UNE-EN ISO/IEC 17025	61
3.1. Establecimiento del concepto de BPL	62
3.2. Entidades responsables de la gestión.....	66
3.3. Legislación europea en materia de BPL.....	68
3.4. Principios de un sistema de BPL.....	72
3.5. Principios de un sistema de gestión basado en la	
Norma ISO 17025.....	80
Bibliografía consultada	85
 4. Recolección de muestras para el análisis y preparación	
en el laboratorio.....	87
4.1. Tipos de muestra.....	87
4.2. Principios generales.....	89
4.3. Legislación nacional y europea sobre muestreo de	
productos alimentarios	95
4.4. Recepción y almacenamiento de las muestras	
en el laboratorio	97
4.5. Preparación de muestras en el laboratorio	98
4.6. Incertidumbre de medición derivada del muestreo	100
Bibliografía consultada	104
 5. Aislamiento de residuos y purificación de extractos	105
5.1. Métodos de extracción	106
Bibliografía consultada	132
 6. Métodos instrumentales de análisis	137
6.1. Cromatografía de Gases (GC)	138
6.2. Cromatografía Líquida (LC)	142
6.3. Espectrometría de masas.....	147
6.3. Otras técnicas	152
Bibliografía consultada	155
 7. Validación de métodos analíticos	157
7.1. Parámetros de validación.....	158
7.2. Etapas del proceso de validación	163
7.3. Modificación, revalidación y verificación de métodos	166

7.4. Descriptores de tendencia central y de dispersión de resultados	168
7.5. Guías específicas de validación para el análisis de plaguicidas en alimentos	170
Bibliografía consultada	177
8. Manejo de datos y elaboración de informes	179
8.1. Registros y formatos.....	180
8.2. ELN, LES y LIMS.....	184
8.3. Informes	188
Bibliografía consultada	189
9. Aseguramiento y control de calidad	191
9.1. Aseguramiento de calidad.....	192
9.2. Control de calidad.....	194
9.3. Herramientas gráficas y estadísticas en el control de calidad	198
9.4. Análisis estadístico de los datos	202
Bibliografía consultada	203
10. Software y aplicaciones informáticas en el análisis de residuos de plaguicidas	205
10.1. Usando R con los datos de la validación.....	206
10.2. Usando R para seleccionar la mejor función de calibrado.....	210
10.3. Usando R para visualizar gráficos control	212
10.4. Usando R para analizar los datos del control de calidad	214
10.5. Usando R para cálculos ANOVA	216
10.6. Usando R para otros cálculos	217
Bibliografía consultada	220
Anexos.....	221
Epílogo	251

PRÓLOGO

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la Seguridad Alimentaria se define como “el acceso físico y económico de todas las personas, en todo momento, a alimentos suficientes, inocuos y nutritivos, capaces de satisfacer sus necesidades alimentarias y permitirles llevar una vida activa y sana”. Este concepto se basa en cuatro pilares interrelacionados: i) oferta y disponibilidad de alimentos, ii) estabilidad de la oferta, sin fluctuaciones ni escasez según la época del año, iii) acceso a los alimentos o capacidad para adquirirlos, y iv) buena calidad e inocuidad de estos. En general, las tres primeras premisas se cumplen sin grandes problemas en los países desarrollados, aunque no ocurre lo mismo en los países en vías de desarrollo. Por lo tanto, a la cuarta premisa es a la que habría que prestar especial atención, con el fin de lograr alimentos sanos, de calidad y seguros para el consumidor.

La seguridad alimentaria es clave porque es un derecho humano fundamental, garantiza la salud y la nutrición de la población, contribuye a la estabilidad social y la paz, y es esencial para alcanzar el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 2 de las Naciones Unidas: “Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición, y promover la agricultura sostenible”.

El objetivo de la política de seguridad alimentaria de la UE es proteger la salud y los intereses de los consumidores y garantizar el buen funcionamiento del mercado interior. Para ello, la UE establece normas de control en materia de higiene de los productos alimenticios, salud y bienestar animal, fitosanidad y prevención de riesgos de contaminación por sustancias externas, y vela por su cumplimiento. Esta política se inició a principios de este siglo, de conformidad con el enfoque “de la granja a la mesa”. Así, se garantiza un alto nivel de seguridad de los productos alimenticios comercializados en la UE en todas las etapas de la cadena de producción y distri-

bución, tanto para los alimentos producidos dentro de la UE como para los importados de terceros países.

Para lograr este objetivo, el análisis de residuos de plaguicidas en alimentos es una herramienta fundamental para garantizar el pilar más crítico de la seguridad alimentaria: la calidad e inocuidad, es decir, que los alimentos sean seguros para el consumo humano. Permite confirmar que los alimentos no presentan riesgos para la salud y verificar el cumplimiento de los Límites Máximos de Residuos (LMR) establecidos por el Codex Alimentarius de FAO/OMS y/o por las normativas nacionales o regionales. Además, al recopilar miles de datos, los resultados analíticos permiten evaluar la exposición dietética real de la población a los residuos de plaguicidas, lo cual es crucial para identificar tendencias, evaluar riesgos acumulativos y, si es necesario, ajustar los LMR.

El análisis de residuos es también una herramienta indispensable para el comercio global, ya que garantiza el tercer pilar de la seguridad alimentaria: el acceso. Cumplir con los LMR de los países importadores es una condición obligatoria para exportar productos agrícolas. Los análisis rigurosos basados en estándares internacionales aseguran que todos los países operen bajo las mismas reglas, promoviendo un comercio de alimentos fluido y confiable. Para las empresas agroalimentarias, realizar un análisis oportuno antes de la cosecha o el envío previene el rechazo de cargamentos en destino, lo que implica enormes pérdidas económicas y daños a la reputación. En definitiva, el análisis de residuos de plaguicidas es el mecanismo de verificación que conecta la producción de alimentos con la salud pública, permitiendo aprovechar los beneficios de los plaguicidas (mayor rendimiento y disponibilidad de alimentos) mientras se controlan y mitigan rigurosamente los riesgos para el consumidor.

Por todo ello, con la redacción de esta obra, titulada *Manual para el Análisis de Residuos de Plaguicidas en Matrices Alimentarias*, los autores, todos ellos profesores del Departamento de Química Agrícola de la Universidad de Murcia, con amplia experiencia investigadora y profesional, han pretendido compilar, en los diez capítulos que componen este Manual, los principales aspectos relacionados con el análisis de residuos de plaguicidas en alimentos, desde aquellos esenciales como la formación y evolución de los residuos en el campo, pasando por las etapas necesarias en todo análisis residual (muestreo, extracción y determinación analítica) para terminar con la elaboración de informes y control de calidad en los laboratorios de análisis de acuerdo con las Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL).

En Capítulo 1 se introduce el concepto de plaguicida, haciendo hincapié en la necesidad de una utilización racional para poder alimentar a una población que supera los 8.200 millones de habitantes en el momento actual. A continuación, en el Capítulo 2, se comentan los principales aspectos relacionados con la formación y evolución de residuos tras un tratamiento fitosanitario y la transferencia de residuos durante la elaboración de productos agroalimentarios. El Capítulo 3 introduce el concepto y desarrollo de Las Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL), conjunto de reglas y procedimientos para garantizar la calidad, integridad y confiabilidad de los datos obtenidos en estudios no clínicos, así como la Norma ISO 17025, sistema de calidad orientado a todo tipo de laboratorios de ensayos no clínicos y laboratorios de calibración. En el Capítulo 4 se resumen los principios necesarios para la recolección de muestras para su análisis y su preparación en laboratorio. En el Capítulo 5 se exponen los principales métodos de extracción de residuos utilizados, profundizando en el método QuEChERS. En el Capítulo 6 se presentan los principales métodos de análisis, con especial referencia a los métodos cromatográficos (GC y LC) en tándem con espectrometría de masas (MS), cuyo gran desafío es la sensibilidad, ya que en determinados casos se requiere llegar a niveles de partes por billón (ppb) o incluso partes por trillón (ppt). Baste decir, que 1 ppb equivale a 31,5 ms/año y 1 ppt a 31,5 μ s/año. El Capítulo 7 está dedicado a dar a conocer los parámetros analíticos necesarios para proceder a la validación de un método analítico, proceso mediante el cual se establece, mediante estudios de laboratorio, que las características de rendimiento del procedimiento cumplen los requisitos para las implicaciones analíticas previstas. En el Capítulo 8 se describe la importancia del manejo de datos y la elaboración de informes, prueba física o electrónica que permite demostrar la conformidad y trazabilidad mostrando las actividades realizadas a través de los datos que incluye el documento. En el Capítulo 9, se establecen los criterios necesarios para llevar a cabo el control de calidad en el laboratorio, mecanismo esencial diseñado para detectar, reducir y corregir deficiencias analíticas internas antes de que se emita un resultado. Su importancia es vital porque garantiza la confiabilidad, precisión y exactitud de los resultados informados. Finalmente, en el Capítulo 10, se resumen las principales aplicaciones informáticas a utilizar en el análisis de residuos.

Por todo lo anterior, esperamos que este Manual pueda ser de interés para técnicos y analistas de laboratorio, así como para gestores de calidad,

estudiantes y especialistas del sector, y que hayamos contribuido, aunque sea modestamente, a estructurar y esclarecer ideas sobre el control de residuos de plaguicidas en alimentos.

Los autores

PREFACE

.....

The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) defines food security as “*the physical and economic access of all people, at all times, to sufficient, safe, and nutritious food that enables them to lead active and healthy lives*”. This concept is based on four interrelated pillars: (i) food supply and availability; (ii) stable supply, free of seasonal fluctuations or scarcity; (iii) access to or ability to purchase food; and (iv) good food quality and safety. The first three pillars are generally met without major problems in developed countries, though this is not the case in developing countries. Therefore, special attention should be paid to the fourth pillar in order to ensure consumers have access to healthy, quality, and safe food.

Food security is essential because it is a fundamental human right. It guarantees the health and nutrition of the population and contributes to social stability and peace. Food security is also essential to achieving United Nations Sustainable Development Goal (SDG) number two: “*Ending hunger, achieving food security and improved nutrition, and promoting sustainable agriculture*”.

The EU’s food safety policy aims to protect consumers’ health and interests and ensure the internal market functions smoothly. To this end, the EU establishes control rules regarding the hygiene of foodstuffs, animal health and welfare, and plant health, as well as the prevention of contamination risks from external substances, and ensures compliance. This policy, which began at the start of this century, is based on the “*from farm to fork*” approach. It ensures a high level of food product safety at all stages of the production and distribution chain for food produced within the EU and food imported from third countries.

To achieve this goal, analyzing pesticide residues in food is a fundamental tool for ensuring the most critical aspect of food safety: that food

is safe for human consumption. This analysis confirms that food does not pose health risks and verifies compliance with the maximum residue limits (MRLs) established by the FAO/WHO Codex Alimentarius and/or national or regional regulations. Additionally, analytical results, based on thousands of data points, make it possible to assess the population's actual dietary exposure to pesticide residues. This is crucial for identifying trends, assessing cumulative risks, and adjusting MRLs if necessary.

Residue analysis is an indispensable tool for global trade because it ensures access, the third pillar of food security. Exporting agricultural products requires complying with the maximum residue levels (MRLs) of importing countries. Rigorous analyses based on international standards guarantee that all countries operate under the same rules, thereby promoting smooth and reliable food trade. For agri-food companies, conducting timely analyses before harvest or shipment prevents shipments from being rejected at their destinations, which can result in significant economic losses and reputational damage. In short, residue analysis verifies the connection between food production and public health, enabling the use of pesticides' benefits (e.g., increased yield and food availability) while rigorously controlling and mitigating risks to consumers.

For all these reasons, the authors of this work, entitled *Manual for the Analysis of Pesticide Residues in Food Matrices*, have intended to compile the main aspects related to the analysis of pesticide residues in food in the ten chapters that make up this manual. The authors are all professors of the Department of Agricultural Chemistry at the University of Murcia with extensive research and professional experience. The manual covers essential topics such as the formation and evolution of residues in the field and the necessary stages in all residual analysis, including sampling, extraction, and analytical determination. It also covers the preparation of reports and quality control in analysis laboratories in accordance with Good Laboratory Practices (GLP).

The first chapter introduces the concept of pesticides, emphasizing the need for their rational use to feed a population that currently exceeds 8.2 billion people. The second chapter discusses the main aspects related to the formation and evolution of residues after phytosanitary treatment, as well as the transfer of residues during the production of agricultural products. Chapter 3 introduces Good Laboratory Practices (GLPs), a set of rules and procedures that guarantee the quality, integrity, and reliability of data obtained in nonclinical studies. It also introduces the ISO

17025 standard, which is a quality system for all types of non-clinical testing and calibration laboratories. Chapter 4 summarizes the principles necessary for collecting samples for analysis and preparing them in the laboratory. Chapter 5 presents the primary residue extraction methods, delving into the QuEChERS method. Chapter 6 presents the main analytical methods, with a focus on chromatographic methods (GC and LC) coupled with mass spectrometry (MS). The great challenge of MS is sensitivity, as it is sometimes necessary to detect levels of parts per billion (ppb) or even parts per trillion (ppt). For reference, 1 ppb is equivalent to 31.5 ms/year, and 1 ppt is equivalent to 31.5 μ s/year. Chapter 7 describes the analytical parameters necessary for validating an analytical method. This process establishes, through laboratory studies, that the performance characteristics of the procedure meet the requirements for the expected analytical outcomes. Chapter 8 describes the importance of data management and reporting. This physical or electronic documentation demonstrates conformity and traceability by showing the activities carried out through the included data. Chapter 9 outlines the criteria for laboratory quality control, which is an essential mechanism designed to detect, reduce, and correct internal analytical deficiencies before issuing a result. This process is vital because it ensures reliability, precision, and accuracy of reported results. Finally, Chapter 10 summarizes the main computer applications to be used in residue analysis.

We hope this manual is of interest to laboratory technicians, analysts, quality managers, students, and specialists in the field. We also hope it contributes to the structuring and clarification of ideas on the control of pesticide residues in food, albeit modestly.

The authors

LISTADO DE ABREVIATURAS

AC	Affinity Chromatography
AE	Atomic Emission
AEMPS	Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios
ALC	Adsorption Liquid Chromatography
ALCOA	Atribuibles, Legibles, Contemporáneos, Originales y Exactos (Accurate)
ANOVA	Analysis of Variance
AOAC	Association of Official Analytical Collaboration
APCI	Atmospheric-Pressure Chemical Ionization
APPCC	Análisis de Peligros y Puntos de Control Crítico
APPI	Atmospheric Pressure Photoionization
BPA	Buenas Prácticas Agrícolas
BPC	Buenas Prácticas Clínicas
BPF	Buenas Prácticas de Fabricación
BPL	Buenas Prácticas de Laboratorio
BRC	British Retail Consortium
CE	Capillary Electrophoresis
CI	Chemical Ionization
COP	Compuestos Orgánicos Persistentes
CS	Suspensión de Cápsulas
CV	Coefficiente de Variabilidad
DA	Dyode-Array
DER	Desviación Estándar Relativa
DCM	Diclorometano
DG SANTE	Dirección General de Salud y Seguridad Alimentaria
DL ₅₀	Dosis Letal Media
DLLME	Dispersive Liquid-Liquid Microextraction
DSPME	Dispersive Solid Phase Microextraction
EBDC	Etilén bisditiocarbámicos

EC	Concentrado Emulsionable
ECD	Detector de Captura de Electrones
ECHA	Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas
ECPA	European Crop Protection Association
EFSA	European Food Safety Authority
EI	Electron Impact
ELC	Electrolytic Conductivity
ELISA	Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay
ELN	Electronic Laboratory Notebook
EM	Efecto Matriz
ENAC	Entidad Nacional de Acreditación
ESI	Electrospray Ionization
ETU	Etilén-tiourea
EURL-FV	European Union Reference Laboratory for Pesticide Residues in Food and Feed - Fruits and Vegetables
EW	Emulsión de Aceite en Agua
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FDA	Food and Drug Administration
FI	Flame Ionization
FL	Fluorescence
FP	Flame Photometric
FSMA	Food Safety Modernization Act
FT	Factor de Transferencia
GC	Gas Chromatography
GCB	Graphitized Carbon Black
HACCP	Hazard Analysis and Critical Control Point
HBGA	Health-Based Guidance Values
HBGV	Health-Based Guidance Values
HLS	High Level Structure
HPLC	High Performance Liquid Chromatography
ICH	International Conference for Harmonization
ICP	Inductively Coupled Plasma
IDA	Ingestión Diaria Admisible
IDE	Ingestión Diaria Estimada
IEXC	Ion Exchange Chromatography
IFS	International Featured Standard
ISO	International Organization for Standardization
IT	Ion Trap
JMPR	The Joint FAO/WHO Meeting on Pesticide Residues
LC	Liquid Chromatography

LIMS	Laboratory Information Management System
LLE	Liquid liquid Extraction
LLPC	Liquid-Liquid Partition Chromatography
LMR	Límites Máximos de Residuos
LOD	Limit of Detection
LOQ	Limit of Quantitation
LPE	Lista Pública de Ensayos
MACP	Multi-Annual Coordinated Control Programme
MAD	Aceptación Mutua de Datos
MAE	Microwave Assisted Extraction
MALDI	Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization
MC	Monte Carlo
M_d	Mediana
MIP	Manejo Integrado de Plagas
MIP	Molecularly Imprinted Polymers
MLA/MRA	Acuerdos Multilaterales de Reconocimiento Mutuo
M_o	Moda
MP	Mobile Phase
MRM	Métodos Multirresiduos
MRM	Multiple Reaction Monitoring
MS	Mass Spectrometry
MSPD	Matrix Solid Phase Dispersion
NPD	Detector Termoiónico Alcalino
NPR	Nivel Permissible de Residuos
NSE	Nivel sin Efecto
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONA	Organismo Nacional de Acreditación
PCC	Puntos de Control Crítico
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PNT	Procedimientos Normalizados de Trabajo
PNUMA	Plan de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PPP	Plant Protection Product
PPR	Programa Prerrequisitos
PSA	Primary Secondary Amine (N-propildietilamina)
PSAC	President's Science Advisory Committee
PTU	Propilentiourea
QA	Quality Assurance
QC	Quality Control

Q-TOF	Quadrupole Time of Flight Mass Spectrometry
QuEChERS	Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged and Safe
QuEChERSER	Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged, Safe, Efficient and Robust
REACH	Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias y Preparados Químicos
RMD	R Markdown
RSD	Relative Standard Deviation
S/N	Signal/Noise
SBE	Stir-Bar Sorptive Extraction
SC	Suspensión concentrada
SCF	Fluido Supercrítico
SCIE	Science Citation Index Expanded
SDME	Single-Drop Microextraction
SEC	Size-Exclusion Chromatography
SFE	Supercritical Fluid Extraction
SIM	Selected Ion Monitoring
SL	Concentrado Soluble
SLE	Solid Liquid Extraction
SP	Stationary Phase
SPE	Solid Phase Extraction
SPME	Solid Phase Microextraction
SweEt	Swedish Ethyl Acetate Method
TOF	Time of Flight
TQ/QqQ	Triple Quadrupole
UE	Unión Europea
UGC	Unidad de Garantía de Calidad
UHPLC	Ultra High-Performance Liquid Chromatography
UPC ²	Ultra Performance Convergence Chromatography
USP	United States Pharmacopeia
UV	Ultravioleta
VALLME	Vortex-Assisted Ionic Liquid-Liquid-Liquid Microextraction
WoS	Web of Science
σ	Desviación Estándar
$\bar{X}$	Media

Plaguicidas. Características, propiedades y aplicación agrícola

Los cultivos son afectados por plagas, enfermedades y malezas (malas hierbas) que reducen su vigor y capacidad de producción. Las plagas incluyen fundamentalmente ácaros, insectos, nematodos, caracoles, aves y roedores. Las enfermedades están causadas por microorganismos (virus, bacterias y hongos) y las malezas son aquellas plantas que resultan indeseables para el agricultor en un momento dado al competir con las plantas cultivadas por la luz, nutrientes y agua. Actualmente, existe la tendencia a incluir a todos los organismos perjudiciales, antes mencionados, bajo la denominación común de plagas agrícolas. De manera general, una plaga agrícola es “una población de organismos fitófagos (se alimentan de plantas) que disminuye la producción del cultivo, reduce el valor de la cosecha o incrementa sus costes de producción”. Dicho de otra manera, “cualquier especie, raza, o biotipo vegetal o animal o agente patógeno dañino para las plantas o productos vegetales es considerado plaga”. Se trata de un criterio esencialmente económico. No todas las poblaciones de organismos fitófagos constituyen plagas, ni todas las plagas presentan la misma gravedad o persistencia en sus daños. Así, los criterios económicos y ecológicos permiten categorizar a las plagas. Los programas de manejo (control) integrado de plagas se basan en la aplicación de criterios de decisión, en donde un factor clave es la cuantificación de la población plaga.

El concepto de plaga agrícola implica un descenso en el valor/beneficio económico que se obtiene de la cosecha. Puede tratarse de reducciones en la cantidad, en la calidad del producto o en el incremento de los costes de producción. Se entiende por pérdida de calidad “el deterioro en la presentación o aspecto del producto cosechado, o la disminución de su valor nutritivo u otra cualidad que influya en el uso del producto y baje su valor unitario”.

La agricultura actual tiende a una especialización, cuya intensidad depende de la zona o país del que se trate, lo que da lugar al desarrollo de

monocultivos con grandes áreas dedicadas al cultivo de una única especie (por ejemplo, cereales, algodón, cítricos, olivar o viñedos). Así, de las más de 350.000 especies vegetales existentes, tan solo 30 producen el 95% de los productos agrarios consumidos, circunstancia que, unida a la gran roturación del terreno para la agricultura, ha producido una continua alteración del medio y una proliferación de los enemigos de las especies cultivadas. Además, hay que tener en cuenta el efecto del cambio climático en la proliferación de plagas. Todo ello da lugar a pérdidas que suponen entre el 30 y el 50% de las cosechas a escala mundial y, en cierta medida, ha propiciado la aparición de nuevas técnicas de control de los enemigos de los cultivos. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), hasta un 40% (unos 220 billones de \$) de la producción agrícola mundial se pierde por causa de las plagas que llegan a afectar a los diferentes cultivos, a lo que debe agregarse un 5-10% de pérdidas durante el almacenamiento post cosecha.

Además de las afecciones no parasitarias sufridas por la planta debidas a la luz, temperatura, granizo (agentes atmosféricos), estrés hídrico, aire, pH, y exceso o deficiencia de elementos químicos (agentes edáficos), existen tres grandes tipos de infecciones parasitarias: parasitismo animal, vegetal y virosis (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Tipos de infecciones parasitarias de las plantas.

Parasitismo animal	Vertebrados	Mamíferos: roedores e insectívoros
		Aves: tordos y granívoras
	Artrópodos	Insectos: mayor número de plagas y más dañinas
		Miriápodos: ciempiés y milpiés
		Arácnidos: ácaros
		Crustáceos: especies terrestres de cangrejos
Parasitismo Vegetal	Moluscos	Babosas y caracoles
	Gusanos	Nematodos
	Fanerógamas	Plantas macroscópicas con raíz, tallo, hojas, flores y frutos (cúscuta, muérdago, etc.) y malas hierbas
	Criptógamas (hongos)	Plantas que carecen de hojas y frutos (parásitos y saprofitos). Parásitos (endo y ectoparásitos)
Virosis	Virus	Bacterias
		Seres unicelulares desprovistos de clorofila
Virosis	Virus	Marchitez Manchada del Tomate (TSWV), Mosaico del Pepino (CMV), Rizado Amarillo del Tomate (TYLCV), Mosaico del Tabaco (TMV), Jaspeado del Tabaco (TEV) y otros.

Aunque las enfermedades de las plantas han ocasionado pérdidas desde tiempos inmemoriales, la Fitopatología es una ciencia de desarrollo reciente en comparación con otras. Comenzó con la aceptación del concepto de patogenicidad entre 1750 y 1850 y continuó con la era del descubrimiento de los agentes causales: primero los hongos, luego las bacterias, los virus y finalmente las micoplasmas. Durante esta época, predominaron los fitopatólogos que enfatizaban el rol de los patógenos, sobre aquellos que otorgaban más importancia a los factores predisponentes para las enfermedades.

Aunque la Fitopatología trata de estudiar las causas y el desarrollo de las enfermedades de las plantas, es también una ciencia con un objetivo más práctico. Dicho propósito se centra en desarrollar métodos de detección precisa para, posteriormente, proponer medidas de control para las enfermedades de las plantas, partiendo del reconocimiento de los agentes causales. Su meta es ayudar al agricultor a salvar su cosecha que, en la actualidad, es destruida por muchos agentes fitopatógenos, para paliar las necesidades alimenticias de millones de personas, en un mundo globalizado que, día a día, aumenta su población y cambia sus necesidades. En este sentido, la Terapéutica Vegetal o Fitoterapéutica es la parte de la Fitopatología que “estudia los métodos más apropiados para combatir las plagas y enfermedades de las plantas cultivadas a fin de conseguir un aumento cuanti y, sobre todo, cualitativo de los productos agrícolas recolectados”. Y es, en este contexto, donde los plaguicidas juegan un papel esencial.

Según FAO, un plaguicida se puede definir como “toda sustancia destinada a prevenir, destruir, atraer, repeler o combatir cualquier plaga, incluidas las especies indeseadas de plantas o animales, durante la producción, almacenamiento, transporte, distribución y elaboración de alimentos, productos agrícolas o alimentos para animales, o que pueda administrarse a los animales para combatir ectoparásitos. El término incluye las sustancias destinadas a utilizarse como reguladoras del crecimiento de las plantas, defoliantes, desecantes, agentes para reducir la densidad de fruta o inhibidores de la germinación y las sustancias aplicadas a los cultivos antes o después de la cosecha para proteger el cultivo contra el deterioro durante el almacenamiento y transporte”. Los términos “producto fitosanitario” y “producto para la protección de las plantas” son, a menudo, usados como sinónimos en lugar de “plaguicida”. Sin embargo, existen algunas diferencias desde el punto de vista conceptual, normativo y de ámbito de aplicación. El término plaguicida es más funcional que regulatorio y, como indica la definición anterior abarca otros usos no

agrícolas, como eliminación de plagas del ganado, caseras, industriales, etc., como los biocidas. Además, desde el punto de vista científico se suele asociar con la sustancia activa, y no al formulado comercializado. Los otros dos términos son más empleados desde el punto de vista técnico y legal. Un “producto fitosanitario” es una categoría definida y regulada en la Unión Europea (Reglamento (CE) n° 1107/2009¹) específica para un uso estrictamente agrícola o forestal (ámbito vegetal), al igual que el término “producto para la protección de las plantas” que, en la práctica, es un sinónimo técnico y normativo de “producto fitosanitario” y que procede de la traducción del término anglosajón *Plant Protection Product (PPP)*. Actualmente, sobre todo en español, este último concepto se suele utilizar de forma más frecuente y adecuada cuando nos referimos a la protección vegetal de manera global, no solo con plaguicidas de síntesis química, sino también mediante métodos físicos, barreras o productos biológicos que “protegen” sin ser necesariamente biocidas contra una plaga, teniendo por lo tanto una connotación más positiva desde el punto de vista ecológico y de la salud, y un carácter más de tipo preventivo en algunos casos.

1.1. CLASIFICACIÓN

Los plaguicidas pueden ser clasificados de muy diversas formas, en función de su toxicidad, plaga a combatir, origen, forma de entrada, modo de acción, estructura química, tipo de formulación y otras. La clasificación más habitual y extendida se basa en la plaga a combatir (insecticidas, fungicidas, herbicidas, etc.). Así, en la Tabla 1.2 se resumen los principales tipos.

En función de su origen se pueden clasificar en naturales (nicotina, rotenona, piretrinas, etc.) o sintéticos, que son la mayoría y, más recientemente, se han incluido los bioplaguicidas, los cuales incluyen compuestos microbianos y derivados de plantas, bacterias y hongos. Según su forma de entrada a la planta pueden ser de contacto (solo actúan donde quedan depositados), penetrantes (aquellos que penetran en la planta, pero no son traslocados en gran proporción) y sistémicos, con capacidad de ser traslocados al resto de la planta vía xilema² (desde la raíz) o floema³ (desde las

1 Reglamento (CE) n° 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. DOUE, 309, 1-50.

2 Tejido vegetal formado por células muertas, rígidas y lignificadas que conduce los nutrientes y el agua desde la raíz a las hojas y sostiene la planta.

3 Tejido conductor encargado del transporte de nutrientes orgánicos, especialmente

partes aéreas). Estos últimos, a su vez, pueden ser estables (permanecen un tiempo sin degradarse), endolíticos (son rápidamente degradados a formas inactivas) y endometatóxicos (no tienen actividad inicial, pero pasan a ser activos al entrar en la planta, es decir son precursores de plaguicidas).

Según su estructura, existen dos grandes grupos, inorgánicos y orgánicos y, dentro de ellos, se pueden establecer distintos subgrupos en función de su composición. Así, los inorgánicos pueden ser compuestos cúpricos, arsenicales, azufrados, etc., mientras que los orgánicos se subdividen en infinidad de grupos (organofosforados, carbamatos, organoclorados, neonicotinoides, derivados ureicos, triazinas, etc.).

Tabla 1.2. Clasificación de plaguicidas en función de la plaga a combatir.

Tipo	Plaga/Efecto
Acaricidas	Sustancias que se utilizan para matar ácaros y garrapatas o para alterar su crecimiento o desarrollo
Alguicidas	Sustancias que eliminan o inhiben el desarrollo de algas
Avicidas y repelentes de pájaros	Compuestos utilizados para ahuyentar aves y pájaros
Bactericidas	Sustancias que se utilizan para matar o inhibir el desarrollo de bacterias en plantas y suelos
Quimioesterilizantes	Sustancias químicas que vuelven infértil a un insecto y evitan su capacidad de reproducción
Desecantes	Actúan sobre las plantas secando sus tejidos
Fungicidas	Productos químicos que se utilizan para prevenir, curar y/o erradicar los hongos
Herbicidas	Sustancias que se utilizan para eliminar las malezas o para inhibir su crecimiento y desarrollo
Atrayente de insectos	Producto químico que atrae a los insectos para atraparlos, eliminándolos de cultivos, animales y productos almacenados
Regulador del crecimiento de insectos	Sustancia que actúa interrumpiendo el crecimiento o desarrollo de un insecto
Insecticidas	Compuesto usado para matar insectos o para interrumpir su crecimiento y/o desarrollo
Larvicidas	Inhibidores del crecimiento de larvas
Molusquicidas	Empleados para eliminar caracoles y babosas

azúcares, producidos por la parte aérea fotosintética y autótrofa, hacia las partes basales subterráneas, no fotosintéticas y heterótrofas de las plantas vasculares.

Tipo	Plaga/Efecto
Nematicidas	Compuestos empleados para eliminar nematodos en plantas y suelos
Ovicidas	Inhibidores del desarrollo de huevos de insectos y ácaros
Reguladores de crecimiento	Sustancias que alteran el crecimiento y desarrollo de las plantas
Silvicidas	Actúan contra la vegetación leñosa
Sinergistas	Sustancia química que aumenta la efectividad de un plaguicida, pero que no es por sí mismo tóxico para las plagas
Termiticidas	Eliminadores de termitas
Virucidas	Agente con capacidad de inactivar o eliminar virus
Misceláneos	Compuestos con actividad combinada

De acuerdo con su modo de acción, se pueden establecer cinco grandes grupos en función del efecto que producen: i) efecto físico (los plaguicidas provocan la muerte de un insecto al ejercer un efecto físico); ii) efecto protoplasmático (facilitan la precipitación de proteínas); iii) efecto respiratorio (mediante inactivación de las enzimas respiratorias); iv) efecto nervioso (impiden la transmisión del impulso nervioso); v) inhibidores de la quitina (impiden su síntesis). De una manera más amplia se pueden establecer subclases, como inhibidores de la acetilcolinesterasa, del proceso fotosintético, de la síntesis lipídica, de la formación de pigmentos, de la biosíntesis de aminoácidos, disruptores de la membrana celular, etc.

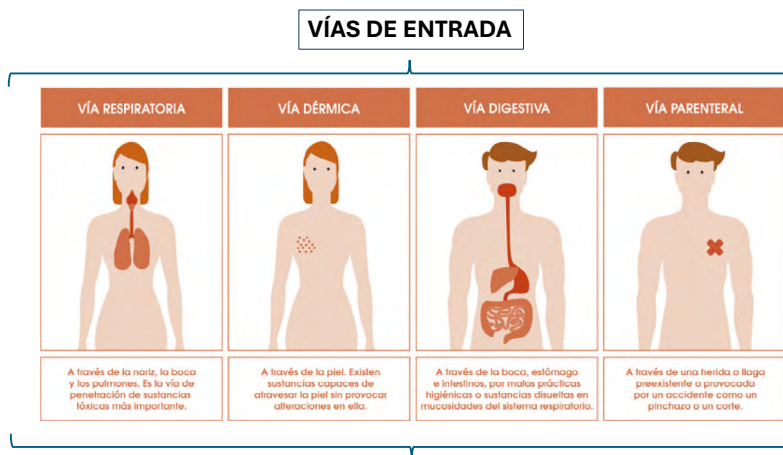
Por último, según el tipo de formulación, pueden ser fundamentalmente líquidos, sólidos o gaseosos, aunque existen multitud de variantes (cebos, fumígenos, tabletas, etc.) en el mercado y que se especifican en el Apartado 1.3. También se pueden clasificar en función del método de aplicación (pulverización, espolvoreo, fumigación, quimigación, etc.).

1.2. TOXICIDAD

El riesgo de la utilización de plaguicidas para la salud humana y animal se conoce desde los años 70 del pasado siglo. La intoxicación humana por plaguicidas se ha considerado desde hace tiempo un grave problema de salud pública. Ya en 1990, un grupo de trabajo de la Organización Mundial de la Salud (OMS) estimó que anualmente se producen alrededor de un millón de intoxicaciones no intencionales por plaguicidas, que causan aproximadamente 20.000 muertes. Treinta y cinco años después, no existe un panorama actualizado y consensuado sobre la intoxicación

mundial por plaguicidas, a pesar del aumento en su uso a nivel mundial. En un estudio publicado en la revista *BMC Public Health*, por Boedeker *et al.* (2020), donde se cubrieron 141 países, se reportaron 741.367 casos anuales de intoxicación aguda por plaguicidas, resultando en 7.446 muertes y 733.921 casos no mortales. Sobre esta base, los autores estiman que alrededor de 385 millones de casos de intoxicación aguda ocurren anualmente en todo el mundo, incluyendo unas 11.000 muertes, aunque otros autores dudan de que la estimación realizada sea correcta (Dunn *et al.*, 2021). Con base en una población agrícola mundial de aproximadamente 860 millones, esto significa que alrededor del 44% de los agricultores se intoxican por plaguicidas cada año. El mayor número estimado de casos se produce en el sur de Asia, seguido por el sudeste asiático y el este de África, con respecto a la intoxicación aguda no mortal.

Los plaguicidas pueden tener importantes consecuencias en la salud humana, ya que pueden entrar en el cuerpo por inhalación, ingestión directa, por vía dérmica y vía parenteral, aunque no hay que olvidar la introducción a través de la ingesta de alimentos contaminados. En la Figura 1.1 se esquematizan las vías de entrada en el organismo.



Absorción, Acumulación, Metabolismo, Distribución y Eliminación

Figura 1.1. Vías de entrada del plaguicida en el organismo.

De acuerdo con la OMS, los plaguicidas pueden clasificarse en cinco grupos, según su toxicidad, en función de la dosis letal media (DL_{50}), es decir, la dosis de plaguicida requerida para eliminar a la mitad de los or-

ganismos objeto de estudio cuando el tóxico entra en el cuerpo por ruta oral o dérmica (Tabla 1.3).

Tabla 1.3. Clasificación toxicológica recomendada por la OMS para los plaguicidas.

Grupo	Grado de peligrosidad	DL ₅₀ (rata) en mg kg ⁻¹ de peso corporal		Ejemplo
		Oral	Dérmica	
I _a	Extremo	< 5	< 50	Paratión
I _b	Alto	5 - 50	50 - 200	Aldrín
II	Moderado	50 - 2000	200 - 2000	DDT
III	Ligero	2000 - 5000		Malatión
U	Mínimo	> 5000		Carbetamida

Tras cruzar varias barreras, los plaguicidas llegan a los compartimentos de almacenaje, como el tejido adiposo. Aunque el cuerpo humano tiene mecanismos para excretar estos compuestos y/o sus productos de metabolización, estos pueden, en determinados casos, ser absorbidos a través del torrente circulatorio. La exposición, tanto aguda como crónica, puede tener una amplia variedad de efectos perjudiciales para la salud, causando enfermedades e incluso la muerte (Figura 1.2).

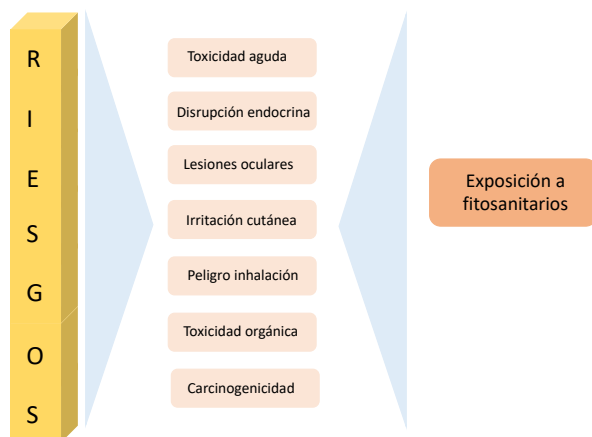


Figura 1.2. Riesgos derivados de la exposición a fitosanitarios.

Diversas investigaciones de laboratorio han puesto de manifiesto su intervención en trastornos endocrinos, disfunciones reproductoras e inmu-

nitarias, alteraciones del comportamiento, mutaciones genéticas y cáncer. Más recientemente se han atribuido a algunos plaguicidas la reducción de la inmunidad de lactantes y niños pequeños y el aumento correspondiente de las infecciones, incluso con anomalías en el crecimiento. Además, hay que tener en cuenta que los plaguicidas pueden tener efectos demoledores sobre insectos y otros organismos beneficiosos, como las abejas, entre otros, afectando negativamente a la biodiversidad animal y vegetal, a los ecosistemas y en definitiva a la cadena alimentaria, sin olvidar su acumulación en el aire, las plantas, el suelo o el agua, lo que puede provocar efectos tóxicos por encima de un determinado umbral de concentración.

1.3. APLICACIÓN AGRÍCOLA

En la Figura 1.3 se esquematizan las distintas etapas incluidas en el desarrollo y comercialización de un fitosanitario. Según la Asociación Europea para la Protección de los cultivos (ECPA, European Crop Protection Association), el coste medio para poner en el mercado un producto fitosanitario se cifra en torno a 276 millones de dólares. Entre las diferentes etapas que incluye el proceso, la búsqueda de compuestos activos y los ensayos de campo son las más costosas. En cuanto al tiempo necesario para poder comercializar un producto desde el inicio hasta su comercialización se estima en 10-11 años.

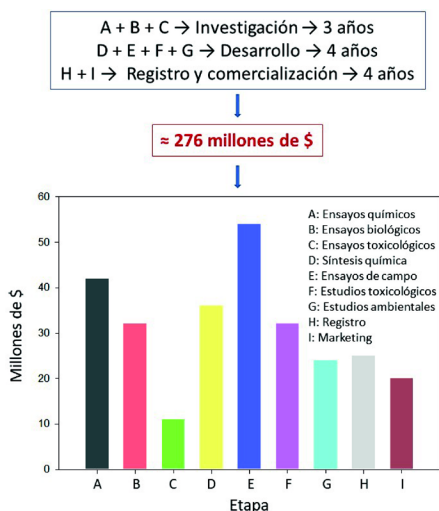


Figura 1.3. Etapas involucradas en el desarrollo y comercialización de un producto fitosanitario.

Aunque en determinados casos los compuestos químicos se emplean directamente en la protección vegetal (azufre, arseniatos, oxiclورو de cobre, etc.), lo más común es emplearlos debidamente “formulados”, es decir, acondicionados y preparados para obtener la máxima efectividad en su uso. Una formulación o preparado es todo plaguicida compuesto de una o varias sustancias o ingredientes activo-técnicos y, en su caso, ingredientes inertes, coadyuvantes y aditivos, en proporción fija. Los componentes que forman parte de cualquier formulación se muestran en la Figura 1.4.

Por otra parte, los productos fitosanitarios se pueden comercializar en diferentes presentaciones, según su naturaleza. Existen productos en estado líquido, sólido y gaseoso, que a su vez pueden presentarse en distintas formas (Figura 1.5).

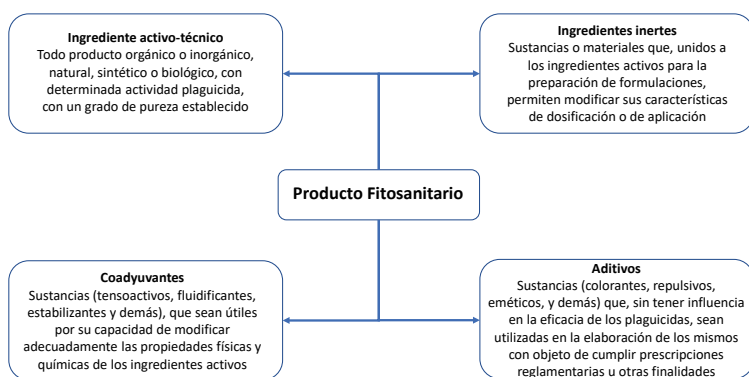


Figura 1.4. Componentes de los productos fitosanitarios.

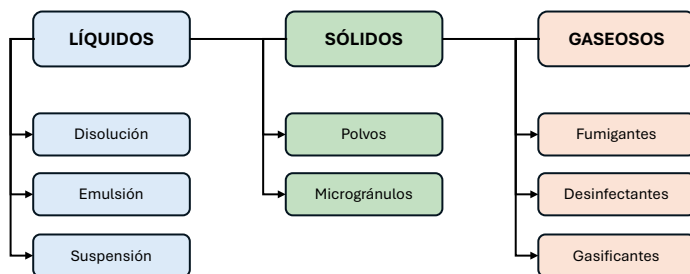


Figura 1.5. Tipos de productos fitosanitarios.

Las principales formas comerciales de presentación de los productos fitosanitarios en estado líquido y las siglas que los identifican, según su abreviatura en inglés por ser normativa europea, son:

- *Concentrado soluble (SL)*. Igual que ocurre con el polvo soluble, forma una auténtica disolución con el agua.
- *Emulsión de aceite en agua (EW)*. Al añadirlo al agua forma una mezcla de un aspecto lechoso, sin embargo, transcurrido un tiempo más o menos largo, el producto y el agua tienden a separarse.
- *Concentrado emulsionable (EC)*. Al entrar en contacto con el agua se produce una emulsión.
- *Suspensión concentrada (SC)*. Producto viscoso compuesto por pequeñas partículas de polvo en suspensión en un líquido.
- *Suspensión de cápsulas (CS)*. Pequeñas cápsulas en suspensión en un líquido.

1.3.1. Importancia, objetivos y fases de la aplicación de productos fitosanitarios

A la hora de realizar un tratamiento con un producto fitosanitario, debemos asegurarnos de su plena justificación, debido a los riesgos derivados para el cultivo, el medio ambiente, el aplicador y el consumidor final. En la Tabla 1.4 se muestran los distintos tipos de formulados disponibles en el mercado.

Los *objetivos* principales de un tratamiento con productos fitosanitarios se pueden concretar en los siguientes:

- *Proteger* al cultivo frente a los agentes causantes del daño, o mejorar sus condiciones de resistencia, producción, engorde de frutos, etc.
- *Minimizar* los riesgos que pueden causar a las personas, al cultivo, a los animales y al medio ambiente.
- *Optimizar* la rentabilidad del tratamiento, ya que si se realiza en un momento no adecuado y a una dosis mayor de la recomendada (sin conseguir aumentar la eficacia y provocando una mayor destrucción de la fauna útil y una mayor presencia de residuos), supone un gasto innecesario.

Las *fases* que configuran la decisión de realizar un tratamiento fitosanitario se pueden concretar en las siguientes:

- *Detectar* los daños en la planta.
- *Identificar* los agentes causantes de dichos daños.
- *Determinar* la fauna útil y su incidencia.
- *Tomar* la decisión de tratar o no tratar, teniendo en cuenta el umbral de tratamiento considerado.

- *Elegir* el producto más adecuado, siempre bajo criterios de eficacia, economía, toxicidad, disponibilidad, resistencias, etc.
- *Utilizar* el método de aplicación idóneo, según el tipo de planta, el producto escogido y el agente nocivo.
- *Seleccionar* el momento idóneo, de acuerdo con las condiciones climáticas y estado de la planta y del agente nocivo.
- Y finalmente, *realizar* el tratamiento, una vez preparado el caldo.

Tabla 1.4. Tipos de formulados comerciales.

AB: Cebo en Granos	FD: Fumígeno en Lata	PB: Cebo en Disco
AE: Aerosol	FF: Fumígeno en Pastillas	PC: Gel o pasta concentrada
AL: Líquido	FG: Granulado Fino	RB: Cebo/Isca
AP: Otro polvo	FK: Fumígeno en Vela	SB: Cebo en Pedazos
BB: Cebo en Bloques	FP: Fumígeno en Cartucho	OF: Suspensión Miscible
BR: Briquetas	FR: Fumígeno en Bastones	OL: Líquido Miscible
CB: Cebo Concentrado	FS: Suspensión concentrada para Semillas	OP: Polvo Dispersable en Aceite
CF: Cápsulas en suspensión	FT: Fumígeno en Tableta	PA: Pasta
CG: Gránulos Encapsulados	FU: Fumígeno	SC: Suspensión Concentrada
CL: Líquido o Gel de contacto	FW: Fumígeno en Pelets	SE: Suspo-Emulsión
CP: Polvo de contacto	GA: Gas	SG: Gránulos Solubles
CS: Suspensión de Encapsulado	GB: Cebo Granulado	SL: Concentrado Soluble
DC: Concentrado Dispersable	GE: Generador de Gas	SO: Spreading oil
DP: Polvo Seco	GF: Gel para Tratamiento de Semillas	SP: Polvo Soluble
DS: Polvo para tratamiento seco de semillas	GG: Macro Granulado	SS: Polvo Soluble para semillas
DT: Tableta para aplicación directa	GL: Gel Emulsionable	ST: Tabletas Solubles
EC: Concentrado Emulsionable	GP: Polvo Fluido	SU: Suspensión Ultra Bajo Volumen
ED: Líquido Electro Aplicable	GR: Granulado	T: Tabletas
EG: Gránulos Emulsionables	GS: Grasa	TC: Activo Grado Técnico
EO: Emulsión Agua en Aceite	GW: Gel Soluble	TK: Técnico Concentrado
ES: Emulsión para tratamiento de semillas	HN: Termonebulizable	UL: Ultra Bajo Volumen
EW: Emulsión Aceite en Agua	KK: COMBI-PACK Sólido-Líquido	VP: Evaporable
	KL: COMBI-PACK Líquido-Líquido	WG: Gránulos Dispersables
	KN: Nebulizable en frío	WP: Polvo Mojable
	KP: COMBI-PACK Sólido-Sólido	WS: Polvo Dispersable
	LA: Laca	XX: Otras
	LS: Solución para semillas	
	ME: Microemulsión	
	MG: Micro Granulado	

1.3.2. Factores que influyen en la aplicación de los fitosanitarios

- *Tipo de planta y estado fenológico.* Dependiendo del tipo de planta, su dificultad para mojarla y del estado fenológico de desarrollo, podremos emplear un tipo de plaguicida u otro y elegir entre diferentes métodos de aplicación.
- *Tipo de agente nocivo, localización en la planta y ciclo evolutivo.* Tras determinar el agente nocivo causante del daño en un cultivo y su localización (hojas, bien expuestos o protegidos, suelo, interior de la planta, etc.) escogeremos el producto más adecuado de entre los autorizados, así como el tipo de tratamiento.
- *Condiciones climáticas.* El clima es un factor decisivo a la hora de realizar un tratamiento, ya que condiciona, en gran manera, su efectividad. Existen una serie de recomendaciones que deberemos seguir para evitar problemas derivados de condiciones climáticas adversas. Por ejemplo, no se deben realizar tratamientos con lluvia o previsión de lluvias ya que el lavado hará que perdamos eficacia en el tratamiento. Ante temperaturas elevadas prestaremos especial atención al empleo de productos tóxicos por inhalación, ya que aumentan su volatilidad.
- *Factores relativos a la maquinaria empleada.* El equipo de tratamiento, los tipos de boquillas y su disposición o la presión de trabajo son algunos de los factores relacionados con la maquinaria y que influyen, en gran proporción, en la eficacia de los tratamientos.

1.3.3. Criterios de elección de plaguicidas

- *Eficacia.* Se deben escoger aquellos plaguicidas que, por su acción de choque y persistencia, aporten la mayor eficacia para controlar una determinada plaga.
- *Mezclas.* En el caso de tener que controlar más de una plaga o utilizar dos materias activas para una misma plaga, deberemos asegurarnos de la compatibilidad de los plaguicidas para poder realizar la mezcla.
- *Umbrales de tolerancia.* Estos umbrales determinan si existe un nivel de plaga suficiente que justifique la realización del tratamiento, teniendo en cuenta criterios económicos y ecotoxicológicos, decisión fundamental en Producción Integrada.
- *Plazos de seguridad y límites máximos de residuos (LMR).* Los LMR determinan la cantidad máxima legal de residuos de plaguicidas

en o sobre un producto vegetal para poder comercializarlo y consumirlo sin que se vea afectada la salud de los consumidores. Para que el plaguicida aplicado se degrade hasta estos niveles hay que esperar un plazo de tiempo mínimo entre el último tratamiento y la recolección conocido como Plazo de Seguridad, y que viene especificado en la etiqueta del formulado para cada cultivo.

- *Riesgos para la salud del aplicador.* Algunos productos presentan una elevada toxicidad para el aplicador, sobre todo los que presentan gran volatilidad. Por tanto, aparte de proteger siempre al aplicador con todas las medidas de seguridad necesarias, a la hora de escoger un producto intentaremos escoger siempre aquel que presente menores riesgos toxicológicos.
- *Riesgos ecológicos.* Una vez seleccionado el producto a emplear, debemos tener en cuenta su influencia sobre la fauna auxiliar (enemigos naturales, abejas, etc.), animales superiores (mamíferos, peces, aves, etc.) y sobre el medio ambiente en general.
- *Aspectos económicos.* Uno de los criterios de mayor peso para el agricultor es el económico. Productos muy eficaces contra una determinada plaga o enfermedad pueden no ser rentables económicamente en ciertos cultivos, con lo que resulta inviable su empleo.

1.3.4. Preparación del caldo. Dosificación

Existen tres formas fundamentales de preparar un caldo:

- *Directa.* Especifica en unidades la dosis apropiada. Por ejemplo: 200 mL 100 L⁻¹ nos indica que debemos emplear 200 mL de formulado por cada 100 L de mezcla.
- *Tanto por cien (%) o tanto por mil (‰).* Indica la cantidad de producto a emplear por cada 100 o 1.000 L de mezcla. Por ejemplo, una dosificación al 0,01% se refiere a que tenemos que emplear 0,01 L (10 mL) por cada 100 L de mezcla, mientras que si es al 0,05‰ deberemos emplear 50 mL por cada 1.000 L.
- *Superficie.* Hace referencia a la cantidad de formulado a emplear sobre una determinada superficie. Así, una dosis de 100 L ha⁻¹ indica que necesitamos emplear 200 L de producto por cada hectárea (10.000 m²). Este tipo de dosificación se emplea mayoritariamente en el caso de las aplicaciones de herbicidas.

1.3.5. Compatibilidad de productos

Es habitual que, en determinados tratamientos fitosanitarios, se mezclen dos o más materias activas, bien sea para controlar más de una plaga o para ahorrar tiempo, mano de obra, combustible de la maquinaria, número de entradas en la parcela y/o agua.

Puede que la mezcla no tenga ninguna repercusión y los productos funcionen como si se aplicaran por separado (efecto aditivo). También puede ocurrir que la mezcla amplifique el efecto de la suma de los productos por separado (efecto sinérgico). Finalmente, también puede ser que el efecto sea menor a la suma de ambos ingredientes activos (efecto antagónico).

1.3.6. Técnicas de aplicación

Existen tres grandes métodos de aplicación de productos fitosanitarios, en función del estado en el que se vayan a aplicar: líquido, sólido o gaseoso. De entre todos, por su facilidad de manipulación, aplicación y dosificación en campo, las aplicaciones líquidas son las más frecuentes.

1.3.6.1. Pulverización

Es la técnica de aplicación más ampliamente extendida y se basa en la emisión del caldo en forma líquida, depositando las gotas producidas sobre el cultivo. El producto pasa del pulverizador a la planta a través del aire, por lo que en este método hay que prestar especial atención a las condiciones atmosféricas, especialmente viento y humedad. Otros factores importantes en este tipo de tratamientos son la cantidad de producto emitida por el equipo, el tamaño de la gota y la velocidad de avance. Todos estos factores pueden ser controlados directamente por el aplicador mediante un buen asesoramiento técnico o por la propia experiencia, fruto del aprendizaje de la técnica.

1.3.6.2. Quimigación

Se trata de una técnica relativamente nueva, ligada a los avances en tecnología de riego localizado. Consiste en aplicar el producto fitosanitario a través del agua de riego. Entre sus ventajas, cabe destacar las siguientes: i) proporciona uniformidad en la aplicación de los productos, permitiendo la distribución de estos en cantidades pequeñas, cuando y donde son necesarios, ii) reduce la compactación del terreno, al no ser necesaria la entrada de maquinaria, iii) disminuye la cantidad de productos utilizados

y el peligro derivado de su aplicación, iv) reduce los costes de mano de obra, equipo y energía, v) minimiza el daño químico a la cosecha y reduce la cantidad de residuos, y vi) reduce la contaminación del medio ambiente. Por el contrario, también tiene inconvenientes: i) solo es aplicable en parcelas que dispongan de riego localizado, con el consiguiente coste en instalaciones y mantenimiento, ii) los productos a emplear deben ser sistémicos para que la planta los pueda translocar desde las raíces a la parte aérea vía xilema, y iii) la combinación de ciertos plaguicidas con el agua puede facilitar la aparición de precipitados, lo cual provocaría la obturación de los goteros y filtros.

1.3.6.3. Espolvoreo

Es el método de aplicación de productos que se encuentran en polvo. Consiste en la aplicación de una corriente de aire para arrastrar el producto y depositarlo sobre la planta. Es una técnica rápida de ejecutar (no requiere preparación de caldo), asegura una buena penetración del fitosanitario en la masa vegetal y es aplicable en zonas con escasez o falta de agua, ya que no la requiere. No obstante, a pesar de estas ventajas, el método cuenta también con una serie de inconvenientes, como la poca adherencia del producto sobre la planta, el riesgo de invasión a lugares próximos en días de viento (deriva), daños sobre la planta en días de elevadas temperaturas y/o excesiva insolación, poca homogeneidad en la distribución y apelmazamiento del producto con la humedad.

1.3.6.4. Aplicación de gránulos

Constituye la forma de aplicación para aquellos productos sólidos que se presentan en formato de gránulo. El producto se reparte de manera homogénea en el suelo mediante técnicas mecánicas. Se suelen emplear cuando se desea una liberación lenta del ingrediente activo.

1.3.6.5. Fumigación

Consiste en la aplicación de productos en estado gaseoso o capaces de generar gases. Están orientadas a la desinfección de espacios cerrados (almacenes, depósitos, camiones, etc.) o a la desinfección del suelo.

1.4. EFECTOS ECOTOXICOLÓGICOS

La Revolución Verde⁴, iniciada en la segunda mitad del siglo XX, marcó un salto cualitativo en la tecnificación de la agricultura en todo el mundo, basándose en mejoras tecnológicas avanzadas como las semillas de alto rendimiento, que a finales de siglo experimentó un nuevo impulso con la biotecnología de los organismos modificados genéticamente (OMG). Simultáneamente, la evolución generalizada hacia una agricultura de mercado produjo la cada vez mayor dependencia de los agroquímicos, con graves problemas medioambientales, como la contaminación de suelos y acuíferos y una drástica reducción de la biodiversidad; a ello se ha pretendido responder con el planteamiento de una denominada agricultura sostenible.

Un factor decisivo de la Revolución Verde fue el desarrollo y aplicación de numerosos plaguicidas orientados a combatir una gran variedad de parásitos y malas hierbas que, de lo contrario, hubieran disminuido la cantidad y calidad de la producción agroalimentaria. En lugares donde se practica el monocultivo intensivo, los plaguicidas constituyen el método habitual de lucha contra las plagas para que no se vea mermada su producción. Sin embargo, los beneficios aportados por la química han ido acompañados de una serie de perjuicios, algunos de ellos tan graves que ahora representan una amenaza para muchos ecosistemas, como consecuencia de la perturbación de las relaciones depredador-presa y la pérdida de biodiversidad, si bien es cierto que, teniendo en cuenta la situación demográfica actual, se hace necesario asegurar la demanda alimenticia de la población, por lo que, indefectiblemente, se han de utilizar mecanismos que garanticen el máximo rendimiento agrícola.

En definitiva, todos los actores implicados (políticos, agricultores, almacenistas, etc.) deben crear un plan de acción global que asegure un respeto por el Medio Ambiente⁵ pero que, al mismo tiempo, sea económicamente viable a la vez que socialmente aceptable, tal y como promulga la Agricultura Sostenible. Indudablemente, el uso racional de los plaguicidas exige el conocimiento de los problemas biológicos relacionados con el control de las plagas, los cuales son numerosos y complejos. Es evidente hoy en día

4 "Revolución verde" es la denominación usada internacionalmente para describir el importante incremento de la productividad agrícola, y por tanto de alimentos, acaecida en Estados Unidos entre 1960 y 1980, término acuñado después por numerosos países.

5 El entorno, incluyendo agua, aire y suelo y su interrelación, así como la relación entre estos elementos y cualquier organismo vivo.

que la utilización de los plaguicidas de forma abusiva o incontrolada puede plantear serios problemas al alterar los equilibrios existentes en la Naturaleza, tanto en las especies, por las posibles resistencias que pueden generar, como en el resto de los miembros de la cadena trófica, creando en definitiva un impacto ambiental negativo.

A la hora de abordar los efectos toxicológicos de los plaguicidas en el medio ambiente, lo primero que deberíamos preguntarnos es ¿sobre qué o quién actúa un plaguicida en el medio ambiente? (Figura 1.6).

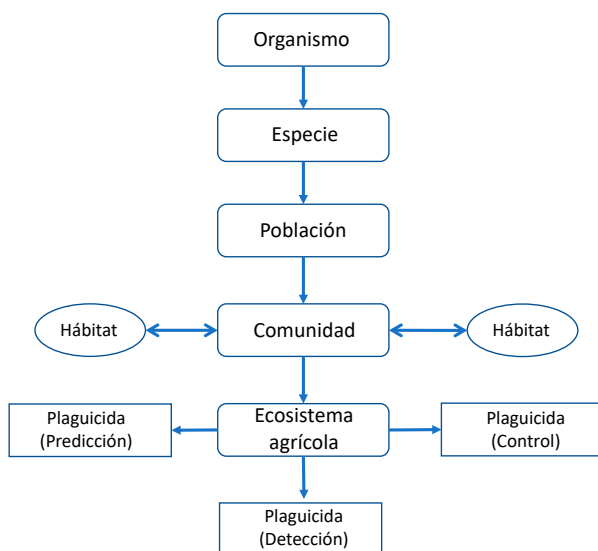


Figura 1.6. Eslabones del ecosistema agrícola y efectos a estudiar.

En el primer lugar de la cadena ecológica se encuentra el organismo, individuo singular y diferenciado, compuesto por materia orgánica jerarquizada y especializada. A continuación, se encuentra la especie, conjunto de organismos capaces de entrecruzarse y producir descendencia fértil, aunque, en principio, no con miembros de poblaciones pertenecientes a otras especies. En el tercer eslabón se encuentra la población, conjunto de individuos de la misma especie que ocupan un lugar y tiempo determinado, y finalmente, una comunidad está constituida por un conjunto de animales y vegetales (elementos bióticos) que habita al mismo tiempo en una misma zona geográfica e interactúa entre sí y con el ambiente (elementos abióticos). Teniendo en cuenta lo anterior, un ecosistema es un sistema biológico constituido por una comunidad de organismos vi-

vos (biocenosis) y el medio físico donde se relacionan (biotopo). A partir de este concepto, se puede definir el ecosistema agrícola como un sistema antropogénico, cuyo origen y mantenimiento van asociados a la actividad del hombre, que ha transformado la naturaleza para obtener principalmente alimentos. Por lo tanto, la detección, el control y la predicción de los posibles efectos ocasionados por los plaguicidas resulta fundamental para evaluar su impacto ambiental⁶.

Los efectos ecológicos de los plaguicidas, además de ser muy variados, están frecuentemente interrelacionados entre sí puesto que, en ocasiones, no son causados de forma exclusiva por la exposición directa a los mismos. Los plaguicidas pueden afectar a los animales de muy diversa forma, ya que pueden provocar cáncer (carcinógenos), inhibir el sistema reproductor, suprimir el inmunitario, perturbar el endocrino (disruptores endocrinos), e incluso producir mutaciones (teratógenos). Hay que tener en cuenta que estos efectos constituyen una advertencia de las posibles repercusiones sobre la salud humana por los procesos de biomagnificación.

Entre los efectos indeseables ocasionados por los plaguicidas cabe destacar los siguientes: i) descuidos y accidentes, ocasionados por derrames o vertidos; ii) alteración de la vida silvestre, como ocurre al eliminar determinadas especies; iii) daños ocasionados por residuos, tanto los liposolubles, que se pueden acumular en el tejido adiposo de los mamíferos, como los hidrosolubles, capaces de contaminar cuerpos de agua, superficial y/o subterránea, y iv) efectos indirectos, como ocurre al eliminar la malas hierbas acuáticas para hacer navegables los canales, con la consiguiente desoxigenación del agua. En este sentido, el perfil de utilización de un determinado plaguicida ejerce un efecto fundamental. Así, el *tipo de formulación* es fundamental ya que las formulaciones líquidas son más lixiviables que las sólidas; los *métodos de aplicación*, ya que no es lo mismo un tratamiento a bajo volumen que a ultrabajo volumen, porque las pérdidas por deriva son mayores; el *lugar de aplicación* debido a que no es lo mismo una aplicación controlada y acotada que una aplicación forestal para combatir la procesionaria del pino, por ejemplo; la *dosis de aplicación*, ya que a mayor dosis, mayor carga contaminante se introduce en el medio y, finalmente, el *emplazamiento geográfico*, ya que la temperatura, humedad e insolación son fundamentales en la evolución de los plaguicidas en el medio.

6 Cualquier cambio en el medio ambiente, sea adverso o beneficioso, total o parcial, resultante de las actividades, productos o servicios de una organización (ISO-14001).

El interés por estudiar los efectos ecotoxicológicos⁷ de los plaguicidas comienza, sin duda, con la publicación de la obra de Rachel L. Carson (1907-1964), famosa bióloga marina y conservacionista estadounidense, titulada *Primavera silenciosa* (*Silent Spring*), en 1962, de la cual se publicó una segunda edición en 2002, con motivo del cuadragésimo aniversario de su publicación y prologada por el Vicepresidente Al Gore, y otros textos, que contribuyeron de manera decisiva a la puesta en marcha de la moderna conciencia ambiental. Carson ofreció un primer aviso de que ciertos productos químicos artificiales, fundamentalmente insecticidas organoclorados, se habían diseminado por todo el planeta, contaminando prácticamente a todos los seres vivos hasta en las tierras vírgenes más remotas. Marcó un hito, ya que presentó las primeras pruebas del impacto que dichas sustancias sintéticas tenían sobre las aves y demás fauna silvestre. Debido a la controversia ocasionada con la publicación de Carson, la administración del presidente John F. Kennedy encargó una investigación en 1963 sobre lo publicado por el autor Jerome B. Wiesner (1915-1994), por aquel entonces Director del Comité Asesor Científico del Presidente (*President's Science Advisory Committee*, PSAC), y que fue publicado bajo el título *Pesticides Report*⁸, el cual recomendaba la eliminación gradual de los plaguicidas tóxicos y persistentes como el DDT y otros. Los resultados obtenidos a partir de este estudio constituyeron el punto de partida para llevar a cabo la prohibición de estos compuestos en EE UU y otros países desarrollados a partir de la década de los 70 del siglo pasado. Carson inspiró un movimiento ambiental de base que llevó a la creación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y fue premiada en 1980, a título póstumo, con la Medalla Presidencial de la Libertad por Jimmy Carter.

Hasta ese momento no se advirtieron las graves consecuencias de esta insidiosa invasión que estaba trastornando el desarrollo sexual y la reproducción, no solo de numerosas poblaciones animales sino, también, de los seres humanos. Con la publicación de la obra titulada *Nuestro Futuro Robado*, escrita por dos prominentes científicos ambientales (Theo Col-

7 El término Ecotoxicología fue acuñado por Truhaut en 1969, como una extensión de la Toxicología, ciencia que estudia los efectos de los tóxicos en organismos individuales, a los efectos de los contaminantes en los ecosistemas.

8 *Papers of John F. Kennedy. Presidential Papers. 1963. President's Office Files. Departments and Agencies. President's Science Advisory Committee (PSAC): Pesticides report, 15 May 1963.*

born y Pete Myers) y una galardonada periodista especializada en medio ambiente (Dianne Dumanoski), y publicada en 1996, se dieron a conocer, por primera vez, las alarmantes evidencias obtenidas en estudios de campo, experimentos de laboratorio y estadísticas humanas, para plantear, en términos científicos, el caso de este nuevo peligro, que en gran medida estaba pasando inadvertido. Comienza allí donde terminaba *Primavera silenciosa*, revelando las causas de los síntomas que tanto alarmaron a Carson. Basándose en décadas de investigación, los autores presentan un completo y llamativo informe que sigue la pista de defectos congénitos, anomalías sexuales y fallos de reproducción en poblaciones silvestres, hasta su origen, naciendo así el concepto de disruptor endocrino:

"sustancias químicas que suplantán a las hormonas naturales, trastornando los procesos normales de reproducción y desarrollo".

Hoy en día se ha demostrado que muchos de los plaguicidas usados o en uso tienen capacidad de disrupción endocrina.

En esta época nace también el concepto de compuestos orgánicos persistentes (COP), *compuestos orgánicos que, en diversa medida, resisten la degradación fotolítica, biológica y química*. Se trata con frecuencia de productos halogenados que se caracterizan por una hidrosolubilidad baja y una liposolubilidad elevada, que da lugar a su bioacumulación en el tejido adiposo. Son también semivolátiles, rasgo que les permite recorrer largas distancias en la atmósfera antes de su deposición. El 22 de mayo de 2001, una Conferencia de plenipotenciarios celebrada en Estocolmo (Suecia), auspiciada por el Plan de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), adoptó el Convenio de Estocolmo sobre COP. El Convenio entró en vigor el 17 de mayo de 2004, noventa días después de la presentación del quincuagésimo instrumento de ratificación, aceptación, aprobación o adhesión con respecto al Convenio. El Convenio de Estocolmo representa la culminación de una lucha ambiental que había durado más de medio siglo y supone el reconocimiento de las propiedades tóxicas, persistentes y bioacumulativas de los COP y su capacidad de transporte a largas distancias, y se propone la eliminación de la denominada "docena sucia" (*dirty dozen*): aldrín, dieldrín, DDT, endrín, clordano, hexaclorobenceno (HCB), mirex, toxafeno, heptacloro, bifenilos policlorados (PCB), dioxinas y furanos, a los que siguieron otros insecticidas organoclorados como lindano y endosulfán.

A partir de ese momento se han realizado grandes esfuerzos de concienciación ambiental. Así, el Reglamento (UE) 2019/1021⁹ sobre COP tiene como objetivo “proteger la salud humana y el medio ambiente contra los COP prohibiendo, suprimiendo progresivamente con la mayor celeridad posible, o restringiendo, la fabricación, comercialización y uso de las sustancias sujetas al Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes, en lo sucesivo denominado «Convenio», o al Protocolo sobre contaminantes orgánicos persistentes del Convenio de 1979 sobre la contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia, en lo sucesivo denominado «Protocolo», reduciendo la emisión de dichas sustancias, con vistas a eliminarla cuando sea viable lo antes posible, y estableciendo disposiciones relativas a los residuos consistentes en cualquiera de esas sustancias o que las contengan o estén contaminados por ellas”.

1.5. ESTADÍSTICAS DE USO

En zonas donde el monocultivo intensivo es mayoritario, los plaguicidas constituyen el método habitual de lucha contra las plagas para que no se vea mermada su producción. En términos generales, el uso de plaguicidas se ha incrementado considerablemente a lo largo de los últimos 40 años, aunque, a partir de los años 90 del siglo pasado, se apreció una disminución de su uso en los países desarrollados, mientras que en los países en vías de desarrollo continuó aumentando. A medida que aumente la preocupación por la contaminación y la pérdida de biodiversidad, el uso futuro de plaguicidas puede crecer más lentamente que en el pasado. En los países desarrollados, su uso se restringe cada vez más mediante leyes e impuestos. Además, su uso está siendo frenado por la creciente demanda de cultivos orgánicos, producidos sin la adición de productos químicos. Es probable que en el futuro aumente el uso de plaguicidas “inteligentes”, variedades de cultivos resistentes y métodos ecológicos de control de plagas. Sin embargo, no hay que olvidar el efecto del cambio climático, ya que el aumento de la temperatura y los cambios en los patrones de precipitación son los principales determinantes de la infección por plagas y patógenos. Así, es posible que la utilización de plaguicidas se incremente, aunque también lo es

9 Reglamento (UE) 2019/1021 del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de junio de 2019 sobre contaminantes orgánicos persistentes. Diario Oficial de la Unión Europea. L169, 45-77.

que el cambio climático reduzca sus niveles en el suelo y agua debido a un aumento de la volatilización y aceleración en la degradación, ambos fuertemente afectados por un alto contenido de humedad, temperaturas elevadas y exposición directa a luz de sol.

El Real Decreto 1311/2012¹⁰ sobre Uso Sostenible de los Productos Fitosanitarios, publicado en septiembre de 2012, incorpora a la legislación española la Directiva 2009/128/CE, que establece el marco de actuación comunitaria para conseguir un uso sostenible de los plaguicidas. En él se establecen una serie de medidas de carácter obligatorio, para que la preparación de la mezcla y la carga del depósito del equipo de tratamiento no suponga ningún peligro para la salud humana y el medio ambiente. España es referente mundial en la producción y exportación de frutas y productos hortícolas. Sin embargo, su producción depende en gran manera del uso de fitosanitarios. En la Figura 1.7 se pueden observar las ventas a nivel mundial durante el periodo 2000-2023.

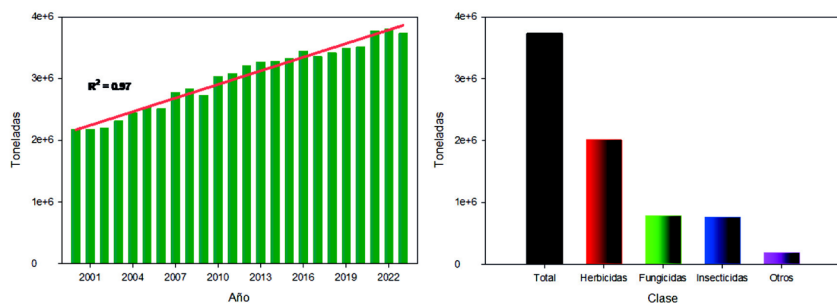


Figura 1.7. Ventas mundiales de fitosanitarios. A) ventas totales durante el periodo 2000-2023; B) ventas por grupos de productos en 2023 (Faostat, 2025).

Como se puede observar, existe un ligero aumento del consumo entre 2000 y 2010, seguido de un periodo de estabilización entre 2010 y 2020, y un repunte hasta 2023. En términos de consumo mundial por grupos, en 2023, los herbicidas ocupan el primer lugar, seguidos de fungicidas e insecticidas. En 2023, se vendieron aproximadamente 292.000 toneladas (t) de plaguicidas en la UE, el nivel más bajo desde el inicio de la serie de datos en 2011. Esto supuso un descenso del 9% con respecto a 2022 y del 18% con respecto a 2021. En cuanto a los tipos de plaguicidas vendidos en la UE,

10 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. BOE, 223, 1-52.

las principales categorías en 2023 fueron los fungicidas y bactericidas (39% del volumen de ventas), los herbicidas (36%) y los insecticidas y acaricidas (17%). Entre los países de la UE, Francia ocupa el primer lugar con 65.415 t, seguida de España (52.906 t), Alemania (40.493 t) e Italia (39.571 t), representando estos cuatro países el 70% de las ventas totales. Entre 2011 y 2023, se observan marcados contrastes en la evolución de las ventas de plaguicidas dentro de la UE. De los 21 países para los que se dispone de datos, se registraron menores volúmenes de ventas en 16 países de la UE, siendo los cuatro más pronunciados los de Portugal e Italia (con un descenso del 44% en cada uno), seguidos de Irlanda y Eslovenia (con un descenso del 38 % en cada uno). Por el contrario, se registraron mayores volúmenes de ventas en cinco países de la UE, siendo los aumentos más pronunciados los de Letonia (+55%), Austria (+52%) y Lituania (+11%).

1.6. USO DE PLAGUICIDAS Y CAMBIO CLIMÁTICO

La información sobre las interacciones entre el cambio climático, el uso de plaguicidas y el medio ambiente es bastante limitada. En la actualidad, el impacto del calentamiento global sobre los efectos medioambientales de los plaguicidas es objeto de debate, ya que las condiciones climáticas cambiantes pueden afectar gravemente al uso de plaguicidas. Por lo tanto, hay varios factores nuevos que influyen en el patrón de uso de plaguicidas, y se prevé un aumento de la intensidad de su uso en forma de mayores cantidades, dosis y frecuencias de diferentes tipos de formulaciones aplicadas en los campos.

En el suelo, el transporte de plaguicidas viene determinado principalmente por la estacionalidad, la intensidad y el aumento de la temperatura y de las precipitaciones, así como por los cambios en el uso del suelo, lo que indica un efecto indirecto de los impactos a largo plazo del cambio climático. Se deben realizar esfuerzos para comprender la relación entre el uso de plaguicidas y el clima para proteger, mantener o restaurar la salud de las personas, las comunidades y los ecosistemas, utilizando enfoques y asociaciones integrados y exhaustivos.

Un efecto indirecto importante del cambio climático podría ser la aparición de plagas agrícolas tardías que requieren la aplicación de plaguicidas después de que sus poblaciones hayan alcanzado niveles económicamente perjudiciales, normalmente a mediados del verano. En condiciones de altas temperaturas, estas plagas pueden requerir un tratamiento temprano en verano, lo que añade más plaguicidas al medio ambiente.

El cambio climático ayudará a algunas plagas a sobrevivir al invierno y acelerará el desarrollo de las especies activas en verano. Esto podría dar lugar a un mayor uso de plaguicidas, lo que más adelante podría agravar los efectos negativos sobre el medio ambiente. Se prevé que los patrones de temperatura y precipitación, influidos por las condiciones climáticas cambiantes, tengan un mayor impacto en la distribución de los productos químicos tóxicos. Se espera que los cambios climáticos y la consiguiente aparición de enfermedades, plagas de insectos y la influencia de una degradación más rápida de los plaguicidas debido al aumento de las temperaturas, el incremento de las precipitaciones, la reducción de la actividad en condiciones de sequía, las pérdidas debidas a la escorrentía de las lluvias, etc., aumenten el uso de plaguicidas en determinados cultivos. Con temporadas de cultivo más largas y climas más cálidos, las malas hierbas y las plagas proliferarán, lo que probablemente provocará un mayor uso de plaguicidas, que a su vez son responsables de emisiones nocivas que agravan aún más el cambio climático.

Los efectos negativos pueden verse amplificados por tres factores principales: i) mayor toxicidad de la mayoría de los plaguicidas a la misma concentración a temperaturas más altas, ii) dosis más altas de plaguicidas debido al aumento de las poblaciones de plagas con el aumento de las temperaturas, y iii) aumento de la escorrentía y la lixiviación de plaguicidas en las zonas agrícolas debido al aumento de las precipitaciones. Además, algunos estudios han demostrado que el cambio climático puede aumentar el uso de plaguicidas debido a una combinación de mayor volatilización y degradación de los plaguicidas. La mayoría de los plaguicidas que se utilizan actualmente en la agricultura son herbicidas, pero el cambio climático puede aumentar la necesidad de otros productos agroquímicos, como insecticidas y fungicidas, en el futuro.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Agrios, G.N. 2005. *Plant pathology*. 5ª Ed. Elsevier Academic Press, Amsterdam.
- Al-Ahmadi, M.S. 2019. Pesticides, anthropogenic activities, and the health of our environment safety. In Larramendy, M., Solonesky, S. (Eds.). *Pesticides-use and misuse and their impact in the environment*. IntechOpen. London. pp. 1-14.
- Boedeker, W., Watts, M., Clausing, P., Márquez, E. 2020. The global distribution of acute unintentional pesticide poisoning: estimations based on a systematic review. *BMC Public Health*, 20,1875.

- Bovey, R. 1989. *La defensa de las plantas cultivadas*. 2ª Ed. Omega, Barcelona.
- Carson, R. 1962. *Silent spring*. Fawcett Publications Inc., Greenwich, CT.
- Carson, R. 2002. *Silent spring. 40th anniversary*. Houghton Mifflin, Mariner Books/Houghton, Orlando, FL.
- Chaube, H.S., Pundhir, V.S. 2009. *Crop diseases and their management*. PHI Learning, New Dehli.
- Colborn, T. Dumanoski, D., Myers, J.P. 1996. *Our stolen future*. Penguin Books, New York. Ed. En castellano: *Nuestro futuro robado*, 1997. Ecoespaña y Gai-a-Proyecto 2050, Madrid.
- Costa, J.J., Margheritis, A E., Marsico, O.J. 1974. *Introducción a la terapéutica vegetal*. Hemisferio Sur, Buenos Aires.
- Damalas, C.A., Koutroubas, S.D. 2016. Farmers' Exposure to Pesticides: Toxicity Types and Ways of Prevention. *Toxics*. 4, 1.
- Darbre, P.D. (Ed.). 2015. What Are Endocrine Disrupters and Where Are They Found? In: *Endocrine Disruption and Human Health*. pp. 3-26. Academic Press, New York.
- De Liñán, C. 2025. *Vademecum de productos fitosanitarios y nutricionales*. Ed. TecnAgrícola de España. Madrid.
- Delcour, I., Spanoghe, P., Uyttendaele, M. 2015. Literature review: Impact of climate change on pesticide use. *Food Res. Int.*, 68, 7-15.
- Dixon, G.R. 2012. Climate change—impact on crop growth and food production, and plant pathogens. *Can. J. Plant Pathol.*, 34, 362-379.
- Dunn, S.B., Reed J.E., Neumann, C. 2021. Letter to the editor regarding the article “The global distribution of acute unintentional pesticide poisoning: estimations based on a systematic review”. *BMC Public Health*, 21, 1944.
- ECPA. 2023. Registering plant protection products in the EU. European Crop Protection Association. https://issuu.com/cropprotection/docs/20110125_pppbrochure_ecpa_2.
- EUROSTAT. 2025. *Pesticide sales*. European Commission. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/about-us>.
- FAO. 2015. *Código Internacional de conducta para la gestión de plaguicidas*. Organización Mundial de la Salud y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, 2014.
- FAO. 2021. *Climate change fans spread of pests and threatens plants and crops, new FAO study*. <https://www.fao.org/news/story/en/item/1402920/icode/>.
- FAOSTAT. 2025. *Pesticide sales*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/es/#home>.
- Fernández-Fernández, M., López-Infante, M.I., Ortiz-Berrocal, F., Yruela-Morillo, M.C. 2017. *Aplicación de productos fitosanitarios nivel básico*. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, Sevilla.

- Ferragut, F., García Marí, F. 2020. *Plagas agrícolas*. M.V. Phytoma-España S.L. España.
- Giulivo, M., López de Alda, M., Capri, E., Barceló, D. 2016. Human exposure to endocrine disrupting compounds: Their role in reproductive systems, metabolic syndrome and breast cancer. A review. *Environ. Res.*, 151:251–264.
- Hayo, M.G., Werf, V.D. 1996. Assessing the impact of pesticides on the environment. *Agric. Ecosys. Environ.*, 60, 81–96.
- Kalyabina, V.P., Esimbekova, E.N., Kopylova, K.V., Kratasyuk, V.A. 2021. Pesticides: formulants, distribution pathways and effects on human health - a review. *Toxicol. Rep.*, 8, 1179–1192.
- Kaur, R., Mavi, G.K., Raghav, S., Khan, I. 2019. Pesticides classification and its impact on environment. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.*, 8, 1889–1897.
- Koli, P., Bhardwaj, N. R., Mahawer, S. K. 2019. Agrochemicals: harmful and beneficial effects of climate changing scenarios. In: Choudhary, K.K., Kumar, A. (Eds.). *Climate change and agricultural ecosystems*. Elsevier. Amsterdam, Netherlands. pp. 65–94.
- Lee, G.H., Choi, K.C. 2020. Adverse effects of pesticides on the functions of immune system. *Comp. Biochem. Physiol. C Toxicol. Pharmacol.*, 235, 108789.
- Lieber, E. Ainsworth, G.C. 1982. *Introduction to the history of plant pathology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Lushchak, V.I., Matviishyn, T.M., Husak, V.V., Storey, J.M., Storey, K.B. 2018. *Pesticide toxicity: a mechanistic approach*. EXCLI J. 17, 1101–1136.
- Matthews, G.A. 2000. *Pesticide application methods*. Blackwell Science Ltd., Malden, MA.
- Mnif, W., Hassine, A.I., Bouaziz, A., Bartegi, A., Thomas, O., Roig, B. 2011. Effect of endocrine disruptor pesticides: a review. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 8, 2265–2303.
- Molinari, O.C. 1953. *Terapéutica vegetal*. Salvat, Madrid.
- Mostafalou, S., Abdollahi, M. 2017. Pesticides: an update of human exposure and toxicity. *Arch. Toxicol.*, 91, 549–599.
- Nicolopoulou-Stamati P, Maipas S, Kotampasi C, Stamatis P, Hens L. 2016. Chemical pesticides and human health: the urgent need for a new concept in agriculture. *Front. Public Health*, 4, 148.
- Noyes, P.D., Lema, S.C. 2015. Heating up the environmental context of chemical pollution: ecotoxicology in a changing global climate. *Current Zool.*, 61, 614–616.
- Olea-Serrano, N., Fernández-Cabrera, M.F., Martín, P. 2001. Disruptores endocrinos. El caso particular de los xenobióticos estrogénicos. I: Estrógenos naturales. *Salud Ambient.*, 1:6–11.
- Pardo, L.A., Beane Freeman, L.E., Lerro, C.C., Andreotti, G., Hofmann, J.N., Parks, C.G., Sandler, D.P., Lubin, J.H., Blair, A., Koutros, S. 2020. Pesticide

- exposure and risk of aggressive prostate cancer among private pesticide applicators. *Environ. Health*, 19, 30.
- Pérez-Lucas, G., Navarro, G., Navarro, S. 2024. Adapting agriculture and pesticide use in Mediterranean regions under climate change scenarios: A comprehensive review. *Eur. J. Agron.*, 161, 127337.
- Rani, L., Thapa, K., Kanojia, N., Sharma, N., Singh, S., Grewal, A.S., Srivastav, A.L., Kaushal, J. 2021. An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. *J. Cleaner Product.*, 283, 124657.
- Rivera, M., Wright, E.R. 2020. *Apuntes de patología vegetal: fundamentos y prácticas para la salud de las plantas*. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Sabarwal, A., Kumar, K., Singh, R.P. 2018. Hazardous effects of chemical pesticides on human health-Cancer and other associated disorders. *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, 63, 103-114.
- Shafiq, S., Haq, M. Z., Shahbaz, A., Shafique, S., Riaz, M., Hanif, M. T., Jilani, G., Ali, H., Sarfaraz, W., Naqvi, S. A. R., Hassan, G. Z. 2024. Agrochemicals and climate change. In: Karmaoui A. (Ed.). *Water-Soil-Plant-Animal nexus in the era of climate change*. IGI Global, Hershey, PA. pp. 49-77.
- Shah, R. 2020. Pesticides and Human Health. In Nuro, A. (Ed.). *Emerging contaminants*. IntechOpen, London. pp. 1-22.
- Thakur, M.V., Munj, S.S., Kurhade, A.K. 2022. Recent advances in pesticide formulation for eco-friendly and sustainable crop pest management. In: Rajesh, S., Wankhade, M., Sow, S., Ranjan, S. (Eds.). *Agriculture Science: Research and Review*. Bhumi Publishing, Maharashtra, India. Volume IV, pp. 7-16.