

Botánica Integral:

Aplicaciones en farmacología, ecología y biotecnología

Cristhian Arturo Zambrano Cabrera
Luigi Oscar Solano Maza



© **Cristhian Arturo Zambrano Cabrera**
Luiggi Oscar Solano Maza

© Editorial Grupo Compás, 2025
Guayaqui, Ecuador
www.grupocompas.com
<http://repositorio.grupocompas.com>

Primera edición, 2025-11-11

ISBN: 978-9942-53-114-8

DOI: <http://doi.org/10.48190/9789942531148>

Distribución online

 Acceso abierto

Cita

Zambrano, C., Solana, L. (2025) Botánica Integral: Aplicaciones en farmacología, ecología y biotecnología. Editorial Grupo Compás

Este libro es parte de la colección de la Univesidad Técnica Estatal de Machala y ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad de la publicación. El copyright estimula la creatividad, defiende la diversidad en el ámbito de las ideas y el conocimiento, promueve la libre expresión y favorece una cultura viva. Quedan rigurosamente prohibidas, bajo las sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright.

Contenido

SOBRE LOS AUTORES 155

Capítulo 1: Fundamentos de la Botánica como Ciencia Biológica9

Introducción..... 9

1. ¿Qué es la Botánica? 14

2. Historia y evolución del conocimiento
botánico 17

3. Principales ramas de la Botánica 21

4. Métodos científicos aplicados al estudio
vegetal 25

4.1 Observación directa y recolección de
muestras..... 26

4.2 Microscopía óptica y electrónica 26

4.3 Cultivo in vitro y propagación clonal 28

4.4 Técnicas moleculares y genómicas 28

4.5 Análisis estadístico y modelado
ecológico 29

5. Aplicaciones científicas contemporáneas de
la Botánica..... 30

Elementos de cierre del capítulo 35

Referencias bibliográficas..... 40

Capítulo 2: Clasificación y Diversidad del Reino Plantae 45

Introducción.....	45
1. Introducción a la clasificación vegetal	49
2. Principales divisiones del Reino Plantae.....	52
2.1 Briofitas.....	53
2.2 Pteridofitas.....	54
2.3 Gimnospermas.....	56
2.4 Angiospermas	57
3. Herramientas y métodos en taxonomía vegetal	60
3.1 Métodos morfológicos: el punto de partida histórico.....	61
3.2 Técnicas moleculares: precisión en la era genómica	61
3.3 Métodos anatómicos y fitoquímicos: el interior de la clasificación	62
3.4 Recursos complementarios: tecnología y sistematización del conocimiento	62
Reflexión crítica.....	63
4. Importancia ecológica y económica de la diversidad vegetal.....	63
4.1 Sustrato ecológico de la biosfera	64
4.2 Servicios ecosistémicos esenciales	64
4.3 Pilar de la seguridad alimentaria y la bioeconomía	65

4.4 Fuente inagotable de compuestos bioactivos y biotecnología	65
4.5 Costos de la erosión de la diversidad vegetal.....	66
Reflexión integradora	66
5. Desafíos y estrategias en la conservación de la diversidad de plantas	66
5.1 Complejo panorama de amenazas contemporáneas	67
5.2 Estrategias in situ: sostener la evolución en su cuna natural	68
5.3 Estrategias ex situ y biotecnológicas: la salvaguarda fuera del hábitat	69
5.4 Monitoreo de precisión: del análisis molecular al espectro satelital	70
5.5 Gobernanza y financiación: del compromiso político a la acción operacional	71
Reflexión conclusiva.....	71
Reflexión de cierre	72
Elementos de cierre.....	72
Preguntas de revisión.....	73
Ejercicios aplicados	75
Autoevaluación.....	75
Reflexión final.....	76

Capítulo 3: Fisiología vegetal: procesos vitales y adaptaciones.....84

1. Fotosíntesis y respiración: flujo de energía en la planta..... 88

1.1 Panorama general88

1.4 Respiración: liberación controlada de energía90

1.5 Integración fotosíntesis-respiración y balance P/R.....90

1.6 Ejemplos de investigación actual91

Preguntas de reflexión91

Actividad aplicada.....91

2. Transporte de agua y solutos: fisiología del xilema y floema..... 92

2.1 Introducción general.....92

2.2 Transporte de agua por el xilema92

2.3 Movimiento de solutos en el floema.....93

2.4 Regulación hormonal y respuestas adaptativas94

2.5 Aplicaciones y relevancia ecológica94
.....95

Preguntas de reflexión96

2.8 Actividad aplicada.....96

3. Crecimiento y desarrollo vegetal: regulación hormonal y genética 97

3.1 Introducción general.....	97
3.6 Aplicaciones prácticas	100
Nota destacada.....	101
Preguntas de reflexión	101
Actividad aplicada.....	102
4. Respuestas a estímulos y estrés: señalización y plasticidad vegetal	102
4.1 Introducción general.....	102
4.3 Estrés abiótico y fisiología adaptativa..	103
4.5 Plasticidad fenotípica y memoria del estrés	105
Ejemplos de investigación actual	106
Nota destacada.....	106
Preguntas de reflexión	106
Actividad aplicada.....	107
5. Adaptaciones fisiológicas: estrategias para la vida en condiciones extremas.....	107
5.1 Introducción general.....	107
5.3 Plantas CAM: eficiencia hídrica extrema	108
5.4 Plantas xerófitas: vida en desiertos	109
5.5 Plantas halófitas: tolerancia a suelos salinos.....	109
5.6 Plantas hiperacumuladoras y serpentinófitas	110

5.7 Aplicaciones en agricultura y biotecnología.....	111
Nota destacada.....	111
Preguntas de reflexión	113
Actividad aplicada.....	114
Capítulo 4: Botánica aplicada, ciencia vegetal para el desarrollo sostenible	123
Introducción.....	123
Esquema del capítulo	124
Preguntas guía	124
4.1 Botánica y salud humana.....	126
4.1.1 Fármacos derivados de plantas.....	126
4.1.2 Fitoterapia y medicina tradicional.....	127
4.1.3 Metabolitos secundarios: moléculas bioactivas	128
4.1.4 Ejemplos de investigación aplicada	129
Preguntas de reflexión	129
4.2 Botánica y seguridad alimentaria	130
4.2.1 Cultivos nativos y biodiversidad agrícola	131
4.2.2 Mejoramiento genético y biofortificación.....	132
4.2.3 Plantas y resiliencia climática	133
4.3 Botánica y conservación ecológica	134

4.3.2 Jardines botánicos y bancos de germoplasma	136
4.4 Botánica y cambio climático.....	140
Introducción	140
4.4.4 Adaptación de cultivos y resiliencia vegetal.....	143
Preguntas de reflexión	143
Actividad aplicada.....	144
Preguntas de revisión	145
Ejercicios aplicados	145
Autoevaluación	146
Reflexión final del libro.....	147

Capítulo 1: Fundamentos de la Botánica como Ciencia Biológica

Introducción

La Botánica, como ciencia biológica, constituye un campo de estudio esencial para comprender la estructura, función, evolución y diversidad de los organismos vegetales. Su importancia trasciende el ámbito académico, ya que las plantas son la base de los ecosistemas terrestres, actúan como productores primarios, regulan ciclos bioquímicos clave y suministran recursos vitales como alimentos, medicamentos, fibras, combustibles y materias primas para diversas industrias (Joppa et al., 2011). En el contexto del cambio climático, la degradación ambiental y la necesidad de sistemas agrícolas resilientes, el conocimiento botánico se erige como un eje estratégico para el desarrollo sostenible.

Desde sus orígenes empíricos ligados a la recolección y clasificación de plantas útiles, la Botánica ha evolucionado hacia una ciencia experimental e interdisciplinaria que incorpora herramientas de la genética molecular, la ecología, la fisiología vegetal, la bioinformática y la biotecnología. Este avance ha sido posible gracias a la integración de nuevas tecnologías y a una perspectiva cada vez más orientada a la comprensión de los sistemas complejos en los que las plantas participan (Bar-On, Phillips & Milo, 2018).

Además, la Botánica moderna no solo estudia plantas terrestres tradicionales, sino que también

incluye algas, cianobacterias y organismos fotosintéticos acuáticos, lo que amplía su alcance y relevancia en investigaciones sobre biodiversidad y bioprospección marina (Guiry et al., 2014). Esta expansión temática permite abordar cuestiones fundamentales como la evolución del metabolismo fotosintético, la adaptación a condiciones extremas y la ingeniería de sistemas vegetales para enfrentar desafíos globales.

En el ámbito educativo, la formación botánica proporciona habilidades esenciales en observación científica, pensamiento crítico, manejo de datos, experimentación y resolución de problemas. Estas competencias son fundamentales no solo para carreras biológicas, sino también para áreas como la medicina, la farmacia, la ingeniería ambiental, la agricultura y la gestión de recursos naturales.

Como sostienen Pellicer & Leitch, (2020), una comprensión profunda de las plantas no es solo una herramienta científica, sino una necesidad urgente en un mundo en transformación: “la biodiversidad vegetal representa la infraestructura viva del planeta y cualquier estrategia de conservación debe partir de su conocimiento sistemático”. De ahí que el presente capítulo se proponga introducir al lector en los fundamentos de la Botánica, sus métodos, ramas y aplicaciones científicas actuales, sentando las bases para un estudio riguroso y significativo de la vida vegetal.

Esquema del capítulo

- ¿Qué es la Botánica?
- Historia y evolución del conocimiento botánico
- Principales ramas de la Botánica
- Métodos científicos aplicados al estudio vegetal
- Aplicaciones de la Botánica en la ciencia contemporánea

Preguntas guía

¿Cuáles son los objetos de estudio fundamentales de la Botánica?

¿Cómo se ha transformado la Botánica desde sus orígenes hasta la actualidad?

¿Qué ramas conforman esta disciplina y cómo se relacionan con otras ciencias?

¿Qué métodos de investigación se aplican al estudio de las plantas?

¿Qué aplicaciones tiene el conocimiento botánico en la salud, agricultura, industria y conservación?

Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

- Analizar el objeto de estudio de la Botánica, diferenciando el conocimiento científico del empírico y su interrelación con otras ciencias biológicas.

- Contextualizar la evolución histórica del pensamiento botánico, identificando los hitos clave que transformaron la disciplina desde una práctica descriptiva a una ciencia experimental e interdisciplinaria.
- Diferenciar las principales ramas de la Botánica, describiendo sus enfoques metodológicos y sus campos de investigación específicos.
- Evaluar la relevancia del conocimiento botánico como pilar para el desarrollo de soluciones innovadoras en los ámbitos de la salud, la agricultura sostenible, la conservación ambiental y la industria.

Competencias esperadas

- Comprensión crítica de conceptos fundamentales del estudio vegetal.
- Capacidad para interpretar procesos científicos asociados a la investigación botánica.
- Aplicación del pensamiento científico en la observación, análisis y sistematización de fenómenos relacionados con las plantas.

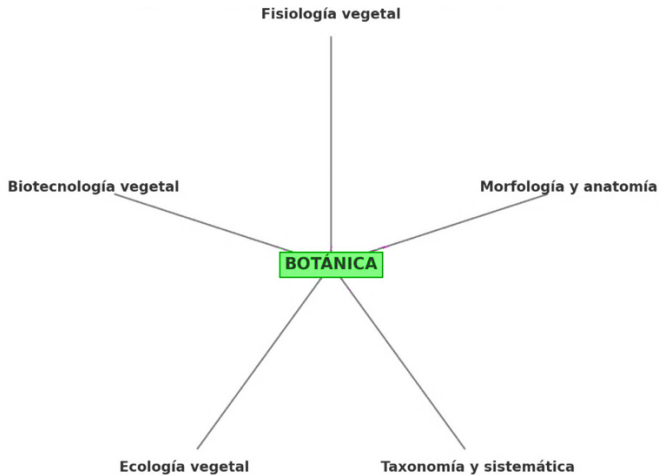


Figura 1. Esquema radial de las ramas principales de la Botánica

Fuente: Los autores.

Cita científica motivadora / problema disparador

"Comprender las plantas no es solo una cuestión de interés científico: es una necesidad para la supervivencia humana frente al cambio climático, la inseguridad alimentaria y la pérdida de biodiversidad." - (Taiz et al., 2022).

1. ¿Qué es la Botánica?

Definición y objeto de estudio

La Botánica es la rama de la Biología que se encarga del estudio científico de las plantas, incluyendo su estructura, función, desarrollo, reproducción, evolución, clasificación, ecología y distribución. Esta disciplina abarca desde organismos simples como algas y musgos, hasta plantas vasculares complejas como árboles y angiospermas. Aunque tradicionalmente el enfoque estaba centrado en plantas visibles, hoy la Botánica también incorpora el análisis de organismos fotosintéticos unicelulares y formas simbióticas (Simpson, 2019).

El objeto de estudio de la Botánica trasciende la mera descripción de especies; implica comprender cómo las plantas interactúan con su entorno, cómo responden a estímulos y cómo contribuyen a la estabilidad de los ecosistemas y al bienestar humano.

Términos clave: fitología, organismos fotosintéticos, diversidad vegetal, reino Plantae, estructura vegetal, fisiología vegetal.

Enfoque científico de la Botánica

A diferencia del conocimiento empírico tradicional, la Botánica se fundamenta en el método científico, utilizando observación sistemática, formulación de hipótesis, experimentación controlada y análisis de datos. El estudio moderno de las plantas se apoya en

técnicas interdisciplinarias que integran herramientas de la genética molecular, biotecnología, bioquímica, informática y ecología (Simpson, 2019).

Por ejemplo, gracias al uso de marcadores moleculares, se ha logrado esclarecer relaciones filogenéticas antes ambiguas, lo cual ha redefinido la clasificación de diversos grupos vegetales

Pregunta de reflexión

¿De qué manera el estudio científico de las plantas puede contribuir a resolver los desafíos globales en salud, alimentación y medio ambiente?

Relevancia de la Botánica en el mundo actual

El conocimiento botánico es esencial para enfrentar problemáticas contemporáneas como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, la seguridad alimentaria y la salud humana. Las plantas no solo son la base de las cadenas tróficas, sino que actúan como reguladoras del ciclo del carbono, fuentes de principios activos farmacológicos y proveedoras de materiales renovables (Tu, 2011; OMS, 2024).

Un ejemplo claro es el estudio del *Artemisia annua*, planta utilizada como base para la síntesis de la artemisinina, uno de los tratamientos más efectivos contra la malaria (Tu, 2011; OMS, 2024).



Ilustración 1. Planta *Artemisia annua*.

Fuente: Los autores.

Nota destacada

La Botánica no es una ciencia aislada; se vincula estrechamente con disciplinas como la ecología, agronomía, farmacia, medicina, genética, ingeniería ambiental y biotecnología.

Referencia cruzada

Este eje temático se complementa con el “apartado 5” del presente capítulo, donde se exploran las aplicaciones científicas contemporáneas de la Botánica en diversas áreas del conocimiento.

2. Historia y evolución del conocimiento botánico

Orígenes del estudio vegetal

El conocimiento sobre las plantas ha acompañado al ser humano desde sus inicios, primero como saber empírico vinculado a la recolección, agricultura y medicina tradicional. Las primeras clasificaciones vegetales surgieron de la necesidad de distinguir plantas útiles de aquellas tóxicas, lo que dio lugar a sistemas rudimentarios de categorización basados en características externas y propiedades observadas (Morton, 1981).

Uno de los primeros tratados escritos fue el Corpus Hippocraticum (siglo V a.C.), donde ya se evidenciaba una sistematización de plantas con usos médicos. Posteriormente, Teofrasto de Ereso, discípulo de Aristóteles, es considerado el "Padre de la Botánica" por sus obras Historia Plantarum y Causae Plantarum, en las que describió más de 500 especies vegetales desde una perspectiva científica primitiva (Morton, 1981).

De la Edad Media al Renacimiento: el despertar científico

Durante la Edad Media, la Botánica se mantuvo restringida a los herbolarios y monasterios. Fue en el Renacimiento cuando resurgió el interés por la observación directa de la naturaleza, impulsado por el humanismo y la imprenta. Obras ilustradas

como los herbarios facilitaron la difusión del conocimiento botánico (Ogilvie, 2006).

Ya en el siglo XVII, con la invención del microscopio, figuras como Marcello Malpighi y Nehemiah Grew iniciaron la anatomía vegetal, estableciendo las primeras descripciones celulares de tejidos vegetales (Ogilvie, 2006).

El siglo XVIII y la revolución linneana

En 1753, Carl Linnaeus (Carlos Linneo) revolucionó la clasificación vegetal con su obra *Species Plantarum*, introduciendo la nomenclatura binomial y un sistema jerárquico que aún constituye la base de la taxonomía moderna. Este enfoque permitió estandarizar la identificación de especies, facilitando el intercambio científico global (Simpson, 2019).

Siglo XIX: desarrollo de la fisiología y la morfología vegetal

Durante este siglo se consolidaron ramas como la fisiología vegetal, centrada en funciones como la fotosíntesis, la absorción de agua y el transporte de nutrientes. Investigadores como Julius von Sachs y Wilhelm Pfeffer realizaron experimentos fundamentales que sentaron las bases del estudio funcional de las plantas (Capra, 2007; Thorne, 1992).

La morfología y la embriología vegetal también alcanzaron gran desarrollo, ayudando a comprender los procesos de crecimiento y diferenciación celular.

Siglos XX y XXI: genética, biotecnología y sostenibilidad

La integración de la genética molecular, el desarrollo de la biotecnología vegetal, la secuenciación de genomas como *Arabidopsis thaliana*, y la aplicación de técnicas de edición génica como CRISPR-Cas9 han transformado radicalmente la Botánica. Hoy, la investigación botánica está en la vanguardia de soluciones para la agricultura sostenible, la conservación de especies vegetales y la producción de compuestos bioactivos de interés médico y farmacéutico (Hall, 2006; Taiz et al., 2022).

Tabla1. Historia y evolución del conocimiento botánico

Periodo Histórico	Características y Aportes Principales
Antigüedad	- Uso empírico de plantas con fines medicinales y alimenticios. - Primeros tratados como <i>De Materia Medica</i> de Dioscórides (s. I d.C.). - Botánica ligada a la medicina.
Edad Media	- Conservación del saber botánico en monasterios. - Elaboración de herbolarios ilustrados. - Enfoque espiritual y terapéutico.

Renacimiento (s. XV-XVI)	- Renacer del interés por la observación directa. - Expansión de los herbarios impresos. - Sistematización visual de especies vegetales. - Influencia del humanismo.
Edad Moderna (s. XVII-XVIII)	- Invención del microscopio: inicio de la anatomía vegetal. - Aportes de Marcello Malpighi y Nehemiah Grew. - Clasificación binomial de Linneo (1753).
Siglo XIX	- Desarrollo de la fisiología vegetal (movimiento de savia, fotosíntesis). - Avances en taxonomía evolutiva tras Darwin. - Consolidación de jardines botánicos.
Siglo XX y XXI	- Biología molecular y genética vegetal. - Aplicaciones en biotecnología y farmacognosia. - Conservación de biodiversidad y etnobotánica. - Digitalización de herbarios.

Fuente: Hall, 2006; Taiz et al., 2022.

Nota destacada

La Botánica ha pasado de ser una ciencia descriptiva y clasificatoria a una disciplina experimental e interdisciplinaria, que emplea herramientas genómicas, bioinformáticas y ecológicas.

Pregunta de reflexión

¿Qué aspectos del enfoque botánico clásico se mantienen vigentes y cuáles han sido superados por los avances científicos modernos?

Referencia cruzada

Este contenido se amplía en el Capítulo 2, donde se profundiza en la clasificación actual del Reino Plantae y la aplicación de criterios filogenéticos modernos.

3. Principales ramas de la Botánica

La Botánica como ciencia multidisciplinaria

El avance de la investigación vegetal ha dado origen a diversas ramas especializadas de la Botánica, cada una con enfoques, objetos de estudio y metodologías propias. Esta diversificación refleja la complejidad del mundo vegetal y la necesidad de abordarlo desde múltiples perspectivas.

Clasificación de las ramas de la Botánica

3.1 Morfología y anatomía vegetal

Estudia la forma externa (morfología) y la estructura interna (anatomía) de las plantas, desde el nivel macroscópico hasta el microscópico.

Analiza órganos como raíces, tallos, hojas, flores y semillas, así como tejidos especializados (En, Yamaji, & Ma, 2023).

Ejemplo: análisis histológico de tejidos conductores como la xilema y el floema.

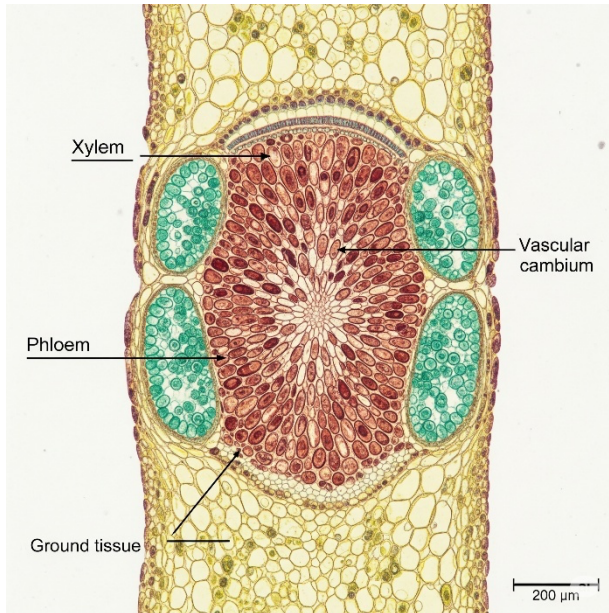


Ilustración 2. Tejido vascular en plantas dicotiledóneas. En una micrografía óptica, se visualiza un haz vascular colateral abierto de una planta dicotiledónea. Los tejidos se distinguen por su tinción y disposición: el xilema, teñido de rojo, se ubica en la posición central y es el conducto principal de agua. En la periferia, se encuentra el floema, teñido de verde, responsable del transporte de fotosintatos. Entre estos dos

tejidos se interpone el cámbium vascular, una capa de células meristemáticas clave para el crecimiento secundario. Rodeando el haz vascular, se observa el tejido fundamental, compuesto por células parenquimáticas.

Fuente: los autores

3.2 Fisiología vegetal

Se enfoca en los procesos funcionales de las plantas: fotosíntesis, respiración, absorción de agua, transporte de solutos, fotoperiodismo, entre otros. Estudia cómo las plantas responden a estímulos del entorno mediante mecanismos bioquímicos y hormonales. (En, Yamaji, & Ma, 2023).

Aplicación: uso de reguladores de crecimiento vegetal en agricultura de precisión.

3.3 Taxonomía y sistemática vegetal

Tiene como objetivo clasificar, identificar y nombrar a las plantas de forma ordenada, de acuerdo con sus relaciones evolutivas. La sistemática moderna emplea herramientas moleculares para construir árboles filogenéticos (Judd et al., 2015).

Herramientas modernas: códigos de barras de ADN (DNA barcoding) para la identificación vegetal

3.4 Ecología vegetal

Estudia las interacciones entre las plantas y su entorno, incluyendo factores bióticos (otros organismos) y abióticos (luz, agua, suelo, clima). Evalúa dinámicas como competencia, simbiosis, dispersión y sucesión ecológica (Judd et al., 2015).

Relevancia actual: restauración de ecosistemas mediante reintroducción de especies vegetales nativas.

3.5 Botánica económica y aplicada

Explora el uso de las plantas en sectores como la medicina, agricultura, industria alimentaria, cosmética y bioenergía. Comprende subdisciplinas como la etnobotánica, agrobotánica y la fitoterapia (Traverse, 2007).

Ejemplo: investigación de compuestos bioactivos en plantas medicinales amazónicas.

3.6 Palinología, Paleobotánica y Geobotánica

Estas disciplinas estudian el registro fósil de las plantas (paleobotánica), los granos de polen (palinología) y la distribución geográfica de las especies vegetales (geobotánica), permitiendo reconstruir climas antiguos y migraciones vegetales (Traverse, 2007).

Aplicación en ciencia forense: identificación de especies vegetales mediante análisis de polen.

Términos clave

- Filogenia
- Plantas vasculares
- Tejidos meristemáticos
- Especie botánica
- Relación planta-medio

Nota destacada

La integración de las ramas de la Botánica permite una comprensión holística de los sistemas vegetales y su aplicabilidad en diversos contextos científicos y sociales.

Pregunta de reflexión

¿Cuál de las ramas de la Botánica te resulta más relevante para tu campo profesional o académico, y por qué?

Actividad sugerida

“Mapa de ramas botánicas”: Elabora un esquema visual donde relaciones cada rama de la Botánica con una aplicación práctica o una problemática global (ej. cambio climático, producción de alimentos, pérdida de biodiversidad).

4. Métodos científicos aplicados al estudio vegetal

La Botánica como ciencia experimental

La Botánica se fundamenta en el método científico, el cual permite formular hipótesis, recolectar datos y validar conclusiones a través de la observación, experimentación y análisis crítico. Este enfoque ha sido clave para transformar el

estudio de las plantas en una ciencia rigurosa, reproducible y orientada a la resolución de problemas complejos en biología, ecología, medicina y agronomía.

Principales métodos utilizados en Botánica

4.1 Observación directa y recolección de muestras

Consiste en examinar plantas en su entorno natural o en condiciones controladas, registrando aspectos morfológicos, fenológicos y ecológicos. Las muestras pueden ser almacenadas en herbarios, donde se catalogan, secan y conservan para su estudio posterior. Actualmente, los herbarios digitales y la georreferenciación han potenciado el valor de las colecciones botánicas para la investigación ecológica y taxonómica (Borsch et al., 2020).

Ejemplo: levantamiento de una línea de vegetación en un transecto ecológico para evaluar diversidad.

4.2 Microscopía óptica y electrónica

Permite observar tejidos y estructuras celulares vegetales con distintos niveles de resolución. Se utilizan técnicas como tinciones, cortes histológicos y análisis anatómico para estudiar células, estomas, tricomas, xilema, floema y tejidos reproductivos. Estas técnicas siguen siendo fundamentales en la anatomía vegetal,

complementándose con enfoques digitales de análisis de imágenes (Shabir et al., 2025).

Técnica: corte en micrótopo y tinción con azul de metileno para visualizar tejidos conductores.

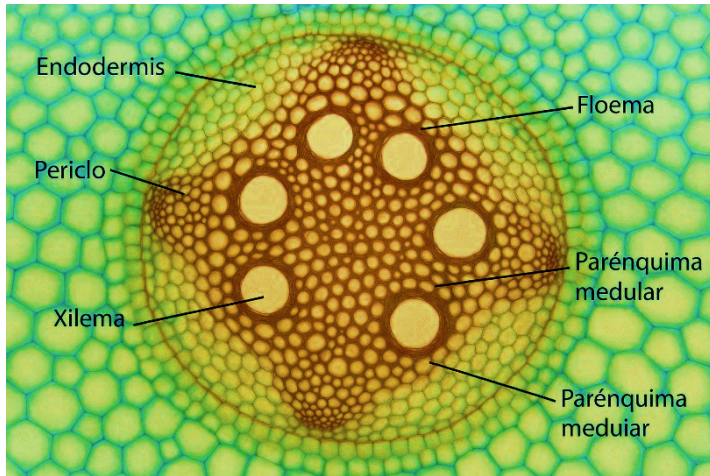


Ilustración 3. Vista microscópica de la distribución anatómica del tejido vascular. El corte transversal de una raíz de monocotiledónea muestra una organización anatómica distintiva. El cilindro vascular central posee una médula parenquimática muy desarrollada, una característica clave de este tipo de plantas. Rodeando la médula, los haces de xilema y floema se disponen de forma alterna.

Fuente: Los autores.

4.3 Cultivo in vitro y propagación clonal

Se emplean medios de cultivo estériles y condiciones controladas para propagar plantas en laboratorio. Esta técnica se utiliza en conservación de especies, mejora genética y producción de metabolitos secundarios. Recientemente, su aplicación se ha extendido a la obtención sostenible de compuestos bioactivos en especies de interés farmacológico (Anuradha & Balasubramanya, 2025).

Aplicación: cultivo de callos celulares de *Catharanthus roseus* para extraer alcaloides anticancerígenos.

4.4 Técnicas moleculares y genómicas

La biología molecular ha revolucionado la Botánica con herramientas como PCR, secuenciación de ADN, transcriptómica y edición genética. Estas técnicas permiten identificar especies, estudiar relaciones filogenéticas y modificar características genéticas. Nuevas tecnologías como CRISPR/Cas9 han sido implementadas en especies vegetales no modelo para mejorar características agronómicas y fisiológicas (Chen et al., 2019).

Ejemplo: uso de marcadores SSR para determinar diversidad genética en cultivares de maíz nativo.

4.5 Análisis estadístico y modelado ecológico

Los datos botánicos deben ser tratados con herramientas estadísticas para validar resultados. Se utilizan programas como R, SPSS o Excel, y modelos de simulación para estudiar la distribución de especies, el cambio fenológico y las respuestas a variables ambientales. La integración de estadística multivariada con SIG y modelado de nicho ecológico permite predecir la distribución de plantas en escenarios de cambio climático (Shin et al., 2024).

Ejemplo: análisis multivariado para determinar las variables ambientales que afectan la abundancia de una especie en un ecosistema montano.

Nota destacada

El rigor metodológico es un pilar de la investigación botánica contemporánea. La triangulación de métodos –morfológicos, moleculares y ecológicos– enriquece la validez de los hallazgos.

Pregunta de reflexión

¿Cuál de los métodos científicos descritos crees que tiene mayor impacto en la conservación de especies vegetales amenazadas?

Actividad aplicada

“Mini-proyecto de observación vegetal”

- Selecciona una planta local y registra durante una semana:
- Sus características morfológicas visibles.
- Su entorno ecológico.
- Variables ambientales (luz, temperatura, humedad).
- Cambios diarios observados.
- Luego, redacta un informe breve aplicando el esquema del método científico.

5. Aplicaciones científicas contemporáneas de la Botánica

Botánica en el contexto global actual

En la actualidad, la Botánica cumple un papel central en la búsqueda de soluciones sostenibles para los desafíos del siglo XXI. Su integración con disciplinas como la biotecnología, la farmacología, la genética y la ecología ha permitido desarrollar aplicaciones prácticas con impacto directo en la salud humana, la seguridad alimentaria, la protección del medio ambiente y la bioeconomía.

Aplicaciones clave

5.1 Medicina y farmacognosia vegetal

Numerosos principios activos utilizados en medicamentos modernos tienen origen vegetal. La Botánica farmacéutica estudia la identificación, extracción y análisis de metabolitos secundarios con propiedades terapéuticas.

Ejemplo: La vinblastina y vincristina, extraídas de *Catharanthus roseus*, son fármacos clave en el tratamiento del cáncer (Kumar et al., 2024).



Ilustración 4. Planta *Catharanthus roseus*.

Fuente: Los autores.

5.2 Agricultura sostenible y fitomejoramiento

La Botánica aplicada permite seleccionar y mejorar cultivos con características deseables: resistencia a plagas, tolerancia a la sequía, mayor rendimiento nutricional. Se emplean métodos como la selección asistida por marcadores moleculares y la edición génica (CRISPR-Cas9) (Ismail et al., 2012).

Ejemplo: Desarrollo de variedades de arroz tolerantes a la salinidad mediante ingeniería genética

5.3 Conservación de la biodiversidad

El estudio de la ecología y distribución vegetal es clave para establecer estrategias de conservación. Los botánicos trabajan en la identificación de especies amenazadas, restauración ecológica y diseño de áreas protegidas

5.4 Bioenergía y biomateriales

Las plantas se utilizan como materia prima en la producción de biocombustibles (etanol, biodiésel), bioplásticos y otros materiales renovables. Esto reduce la dependencia de combustibles fósiles y promueve economías circulares

Ejemplo: producción de bioplásticos a partir del almidón extraído del maíz o la papa (Gurunathan et al., 2025).

5.5 Cambio climático y servicios ecosistémicos

La Botánica permite cuantificar la captura de carbono por parte de las plantas, estudiar su rol en la mitigación del cambio climático y evaluar su aporte en servicios ecosistémicos como la purificación del aire, el control hídrico y la regulación térmica urbana.

Ejemplo: Modelos de captura de carbono en bosques tropicales como parte de estrategias REDD+ (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2016).

Tabla 2. Aplicaciones científicas contemporáneas de la Botánica

Área de Aplicación	Descripción	Ejemplos Actuales
Medicina y farmacología	Estudio y uso de principios activos de origen vegetal para el desarrollo de fármacos, terapias naturales y bioproductos.	Producción de vinblastina y vincristina a partir de <i>Catharanthus roseus</i> para tratamiento del cáncer
Biotecnología vegetal	Aplicación de técnicas moleculares, cultivo in vitro y edición genética para mejorar cultivos y producir metabolitos específicos.	Uso de CRISPR/Cas9 en plantas para tolerancia a sequía o salinidad
Conservación de la biodiversidad	Evaluación, monitoreo y conservación de especies vegetales amenazadas mediante bancos de	Propagación in vitro de especies endémicas en peligro de extinción

	germoplasma y jardines botánicos.	
Agronomía y mejora genética	Optimización de cultivos agrícolas mediante selección asistida por marcadores, análisis fenotípico y genotípico.	Evaluación de variedades de maíz nativo mediante SSRs y análisis fenológicos
Cambio climático y modelado ecológico	Estudio del impacto de variables ambientales sobre la distribución y fisiología de plantas a través de modelos predictivos y simulaciones.	Modelado de distribución de especies bajo escenarios climáticos futuros usando MaxEnt o BIOMOD
Etnobotánica y saberes tradicionales	Documentación y validación científica del uso ancestral de plantas medicinales y alimenticias en comunidades	Estudios etnobotánicos en la Amazonía para descubrir nuevos compuestos bioactivos

indígenas o
rurales.

Fuente: Los autores.

Nota destacada

La Botánica ya no solo describe la naturaleza; ahora la transforma, la protege y la reinventa al servicio de la humanidad.

Pregunta de reflexión

¿Cómo podrías, desde tu futura profesión, aplicar conocimientos botánicos para contribuir a una sociedad más sostenible?

Actividad sugerida

“Estudio de caso botánico aplicado”

Selecciona una noticia científica reciente relacionada con plantas (ej. un nuevo medicamento vegetal, una planta transgénica, un proyecto de restauración). Analiza:

¿Qué problema aborda?

¿Qué técnicas botánicas se aplican?

¿Qué implicaciones ecológicas, sociales o éticas tiene?

Elementos de cierre del capítulo

En este capítulo se han sentado las bases conceptuales y metodológicas de la Botánica como disciplina científica. Se definió su objeto de estudio, abarcando la vasta diversidad del mundo

vegetal, desde organismos unicelulares hasta plantas vasculares complejas. Se trazó su evolución histórica, marcando la transición desde un saber empírico hacia una ciencia experimental rigurosa, destacando hitos como la clasificación linneana y la revolución genómica. Asimismo, se describieron sus principales ramas y los métodos científicos que sustentan la investigación contemporánea, desde la microscopía hasta las técnicas moleculares y el análisis estadístico. Finalmente, se subrayó la profunda relevancia de la Botánica en la resolución de desafíos globales en salud, agricultura y conservación.

Transición al siguiente capítulo

Habiendo establecido las bases epistemológicas y metodológicas de la Botánica, el siguiente capítulo aplicará estos fundamentos al primer gran desafío científico de la disciplina: la organización de la vasta diversidad del Reino Plantae. Se abordará cómo los métodos de clasificación, especialmente los basados en filogenia molecular, permiten construir un sistema coherente que no solo nombra a las especies, sino que revela sus relaciones evolutivas. Este marco taxonómico es el prerrequisito indispensable para la bioprospección, la conservación y el estudio comparativo de la flora mundial.

Preguntas de revisión

Opción múltiple (selecciona la respuesta correcta):

1. ¿Quién es considerado el padre de la Botánica científica?
 - a) Linneo
 - b) Hipócrates
 - c) Teofrasto
 - d) Darwin
2. ¿Cuál de las siguientes ramas estudia la función de los tejidos vegetales?
 - a) Taxonomía
 - b) Morfología
 - c) Fisiología vegetal
 - d) Paleobotánica
3. El método de cultivo in vitro es utilizado principalmente para:
 - a) Identificar tejidos dañados
 - b) Visualizar cloroplastos
 - c) Propagar plantas en condiciones controladas
 - d) Analizar estructuras florales

Verdadero o falso:

La sistemática vegetal moderna utiliza análisis de ADN para estudiar relaciones evolutivas.

La botánica aplicada no tiene implicaciones en la medicina moderna.

El método científico es exclusivo de las ciencias exactas, no se aplica en Botánica.

Respuesta abierta:

Explica en tus palabras la diferencia entre morfología y fisiología vegetal.

¿Qué método botánico moderno te parece más innovador y por qué?

Menciona dos ejemplos de aplicaciones actuales del conocimiento botánico.

Ejercicios aplicados

Ejercicio 1 - Análisis de un artículo científico

Revisa un artículo reciente de una revista académica (por ejemplo, *Plants*, *Botanical Journal of the Linnean Society*, *New Phytologist*). Responde:

¿Cuál fue el objetivo del estudio?

¿Qué métodos científicos emplearon?

¿Qué relevancia tiene este estudio para la sociedad actual?

— Ejercicio 2 - Mapa conceptual integrador

Elabora un mapa conceptual que relacione:

— Definición de Botánica

— Principales ramas

— Métodos de estudio

— Aplicaciones actuales

Puedes incluir imágenes, flechas, jerarquías y conectores.

Autoevaluación

Marca con ✓ si lograste:

___ Comprender qué estudia la Botánica y cómo se estructura.

___ Identificar las principales ramas y su función.

___ Reconocer la evolución histórica del conocimiento botánico.

___ Relacionar métodos científicos con su aplicación práctica.

___ Valorar la importancia de la Botánica en tu formación profesional.

Reflexión final

“Estudiar plantas es mucho más que memorizar nombres científicos; es descubrir cómo la vida se organiza, se adapta y sostiene el equilibrio del planeta. En un mundo en crisis, la Botánica no es una opción: es una herramienta indispensable para la ciencia, la salud y la conservación.”

Referencias bibliográficas

- Anuradha, M., & Balasubramanya, S. (Eds.). (2025). *In vitro production of plant secondary metabolites: Theory and practice*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-97-8808-8>
- Bar-On, Y. M., Phillips, R., & Milo, R. (2018). The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(25), 6506-6511. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>
- Borsch, T., Berendsohn, W. G., Dalcin, E., Delmas, M., Demissew, S., Elliott, A., ... Thiers, B. (2020). World Flora Online: Placing taxonomists at the heart of a definitive and comprehensive global resource on the world's plants. *Taxon*, 69(6), 1311-1341. <https://doi.org/10.1002/tax.12373>
- Capra, F. (2007). *La trama de la vida: Una nueva perspectiva de los sistemas vivos*. Anagrama.
- Chen, K., Wang, Y., Zhang, R., Zhang, H., & Gao, C. (2019). CRISPR/Cas genome editing and precision plant breeding in agriculture. *Annual Review of Plant Biology*, 70, 667-697. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100049>

- En, Y., Yamaji, N., & Ma, J. F. (2023). Linking root morphology and anatomy with transporters for mineral element uptake in plants. *Plant and Soil*, 484(1-2), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05692-y>
- Guiry, M. D., Guiry, G. M., Morrison, L., Rindi, F., Valenzuela Miranda, S., Mathieson, A. C., Parker, B. C., Langangen, A., John, D. M., Bárbara, I., Carter, C. F., Kuipers, P., & Garbary, D. J. (2014). AlgaeBase: An on-line resource for algae. *Cryptogamie, Algologie*, 35(2), 105-115. <https://doi.org/10.7872/crya.v35.iss2.2014.105>
- Gurunathan, M. K., Navasingh, R. J. H., Selvam, J. D. R., & Čep, R. (2025). Development and characterization of starch bioplastics as a sustainable alternative for packaging. *Scientific Reports*, 15, Article 15264. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00221-0>
- Hall, R. D. (2006). Plant metabolomics: From holistic hope, to hype, to hot topic. *New Phytologist*, 169(3), 453-468. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01632.x>
- Ismail, A. M., Johnson, D. E., Ella, E. S., Vergara, G. V., & Baltazar, A. M. (2012). Adaptation to

flooding during emergence and seedling growth in rice and weeds, and implications for crop establishment. *AoB PLANTS*, 2012, pls019.

<https://doi.org/10.1093/aobpla/pls019>

Joppa, L. N., Roberts, D. L., Myers, N., & Pimm, S. L. (2011). Biodiversity hotspots house most undiscovered plant species. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(32), 13171-13176.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1109389108>

Judd, W. S., Campbell, C. S., Kellogg, E. A., Stevens, P. F., & Donoghue, M. J. (2015). *Plant systematics: A phylogenetic approach* (4th ed.). Sinauer Associates.

Kumar, S., Sharma, A., Singh, P., & Verma, R. (2024). Pharmacological significance of *Catharanthus roseus* in cancer therapeutics: A review. *Current Research in Pharmacology and Drug Discovery*, 5, 100087.

<https://doi.org/10.1016/j.crphar.2024.100087>

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2016). *Plan de acción REDD+ Ecuador: Bosques para el buen vivir 2016-2025*.

Morton, A. G. (1981). *History of botanical science: An account of the development of botany*

from ancient times to the present day.
Academic Press.

Ogilvie, B. W. (2006). *The science of describing: Natural history in Renaissance Europe.* University of Chicago Press.

Organización Mundial de la Salud. (2024). *Estrategia mundial sobre medicina tradicional: 2025-2034* (borrador). Organización Panamericana de la Salud. <https://www.paho.org/sites/default/files/2024-08/draft-tm-strategy-2025-2034-regional-consultations-english.pdf>

Pellicer, J., & Leitch, I. J. (2020). The Plant DNA C-values database (release 7.1): An updated online repository of plant genome size data for comparative studies. *New Phytologist*, 226(2), 301-305. <https://doi.org/10.1111/nph.16261>

Shabir, Z., Un Nabi, S., Mehreen, M., & Mansoor, S. (2025). Microscopy as a tool for the detection of plant pathogens. En S. Un Nabi, S. Mansoor, & S. Shafi (Eds.), *Conventional to emerging advances in plant disease diagnosis and pathogen detection* (pp. 13-28). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003474036-2>

- Shin, Y., Shin, E., Lee, S.-W., & An, K. (2024). Predicting changes in and future distributions of plant habitats of climate-sensitive biological indicator species in South Korea. *Sustainability*, 16(3), 1013. <https://doi.org/10.3390/su16031013>
- Simpson, M. G. (2019). *Plant systematics* (3rd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-02773-6>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2022). *Plant physiology and development* (7th ed.). Sinauer Associates.
- Thorne, R. F. (1992). Classification and geography of the flowering plants. *The Botanical Review*, 58(3), 225-348. <https://doi.org/10.1007/BF02858611>
- Traverse, A. (2007). *Paleopalynology* (2nd ed.). Springer.
- Tu, Y. (2011). The discovery of artemisinin (qinghaosu) and gifts from Chinese medicine. *Nature Medicine*, 17(10), 1217-1220. <https://doi.org/10.1038/nm.2471>

Capítulo 2: Clasificación y Diversidad del Reino Plantae

Introducción

La clasificación y comprensión de la diversidad del Reino Plantae son fundamentales para el estudio de la botánica. Las plantas, que incluyen desde algas microscópicas hasta árboles gigantes, presentan una increíble variedad de formas, estructuras y adaptaciones que les permiten habitar casi todos los ecosistemas del planeta. Esta diversidad es el resultado de millones de años de evolución y adaptación a diferentes condiciones ambientales.

La taxonomía vegetal ha evolucionado significativamente con el tiempo. Inicialmente basada en características morfológicas, la clasificación de las plantas ha incorporado herramientas moleculares y genéticas que han permitido una comprensión más precisa de las relaciones evolutivas entre los diferentes grupos vegetales.

La diversidad de las plantas no solo es evidente en su morfología, sino también en su genética, fisiología y ecología. Esta diversidad es crucial para el funcionamiento de los ecosistemas, ya que las plantas desempeñan roles esenciales como productores primarios, reguladores del clima y proveedores de hábitats para otras especies.

En este capítulo, exploraremos los principales grupos del Reino Plantae, sus características distintivas y su importancia ecológica y económica. También discutiremos las herramientas y métodos utilizados en la clasificación de las plantas, así como los desafíos actuales en la conservación de la diversidad vegetal.

Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

- Analizar los principios de la taxonomía y la sistemática vegetal moderna, incluyendo el uso de herramientas filogenéticas y moleculares como el sistema APG IV y el código de barras de ADN.
- Clasificar las principales divisiones del Reino Plantae (Briofitas, Pteridofitas, Gimnospermas y Angiospermas), identificando sus innovaciones evolutivas y adaptaciones clave.
- Vincular la diversidad taxonómica y filogenética con su potencial directo en la farmacognosia, la agronomía, la biotecnología y el diseño de estrategias de conservación *in situ* y *ex situ*.
- Evaluar los desafíos contemporáneos para la conservación de la diversidad vegetal, fundamentando la urgencia de su protección

en su importancia ecológica y económica para la sostenibilidad global.

Preguntas guía

- ¿Cuáles son los principales criterios utilizados en la clasificación de las plantas?
- ¿Qué características distinguen a los diferentes grupos del Reino Plantae?
- ¿Cómo ha evolucionado la taxonomía vegetal con el uso de herramientas moleculares?
- ¿Por qué es importante conservar la diversidad vegetal?
- ¿Qué desafíos enfrenta la conservación de la diversidad de plantas en la actualidad?

Esquema del capítulo

1. Introducción a la clasificación vegetal
2. Principales divisiones del Reino Plantae
 - Briofitas
 - Pteridofitas
 - Gimnospermas
 - Angiospermas
3. Herramientas y métodos en taxonomía vegetal

4. Importancia ecológica y económica de la diversidad vegetal
5. Desafíos y estrategias en la conservación de la diversidad de plantas

Competencias esperadas

Al concluir este capítulo, el estudiante desarrollará las siguientes competencias:

- Capacidad para clasificar y diferenciar los principales grupos de plantas.
- Habilidad para utilizar herramientas modernas en la identificación y clasificación vegetal.
- Comprensión de la importancia de la diversidad vegetal en los ecosistemas.
- Conciencia sobre la necesidad de conservar la diversidad de plantas y los desafíos asociados.

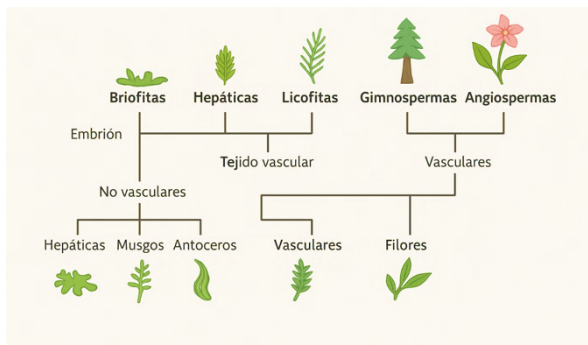


Figura 1. Evolución de las plantas.

El diagrama presenta un árbol filogenético que sintetiza las relaciones evolutivas y los principales eventos de divergencia dentro del reino Plantae. Este modelo ilustra cómo todas las plantas terrestres, o Embriófitas, comparten un ancestro común definido por el desarrollo de un embrión multicelular. Un evento evolutivo crucial fue la aparición del tejido vascular, que marcó una división fundamental entre las plantas no vasculares (Briófitas, como musgos, hepáticas y antoceros) y las plantas vasculares (Traqueofitas), que desarrollaron xilema y floema. Dentro de las plantas vasculares, una innovación reproductiva significativa fue el surgimiento de las flores, una apomorfia que define el clado de las Angiospermas y las diferencia de otros grupos, como las Gimnospermas, que carecen de esta estructura reproductiva.

Fuente: Los autores.

Cita destacada

"La diversidad de las plantas es la base de la vida en la Tierra; entenderla y conservarla es esencial para el bienestar de todos los seres vivos."— Adaptado de State of the World's Plants and Fungi Report, 2020.

1. Introducción a la clasificación vegetal

La clasificación del Reino Plantae constituye uno de los pilares esenciales de la botánica sistemática, ya que permite organizar la enorme diversidad vegetal en un sistema jerárquico que

refleja tanto similitudes morfológicas como relaciones evolutivas. En la actualidad, los métodos clásicos de clasificación, basados en la morfología de estructuras como hojas, flores o frutos, han sido complementados por técnicas moleculares que analizan secuencias de ADN para reconstruir árboles filogenéticos más precisos. Este enfoque integrador ha revolucionado la taxonomía vegetal, facilitando la identificación de linajes ocultos y relaciones insospechadas entre grupos vegetales (Liu et al., 2023).

1.1 La filogenia como herramienta taxonómica

La taxonomía moderna ha adoptado un enfoque filogenético, que considera la evolución como criterio central para clasificar las especies. El sistema APG IV (Angiosperm Phylogeny Group IV) es el más aceptado para la clasificación de las angiospermas, y se basa en el análisis de múltiples genes nucleares y plastídicos. Esta metodología ha corregido numerosas incongruencias del sistema clásico, como la agrupación artificial de especies por convergencia morfológica. Así, se ha logrado una mayor coherencia entre la taxonomía y la historia evolutiva de las plantas (Angiosperm Phylogeny Group [APG IV], 2016).

1.2 Diversidad evolutiva del Reino Plantae

El Reino Plantae exhibe una diversidad extraordinaria que abarca desde organismos simples como las briofitas hasta las complejas angiospermas. Esta diversidad es producto de

adaptaciones progresivas al medio terrestre, como el desarrollo de tejidos vasculares, semillas y estructuras reproductivas especializadas. Comprender esta diversidad no solo permite identificar especies, sino también interpretar patrones macroevolutivos y dinámicas ecológicas clave. En estudios recientes se ha evidenciado que la diversidad vegetal continúa siendo subestimada, especialmente en regiones tropicales, lo que resalta la necesidad de mayores esfuerzos de exploración y conservación (Slik et al. 2015).

1.3 Herramientas moleculares para el estudio de la diversidad vegetal

Entre las herramientas modernas más destacadas se encuentra el DNA barcoding, técnica que permite identificar especies mediante el análisis de regiones específicas del genoma, como el *rbcl* o el *matK*. Esta técnica ha demostrado ser especialmente útil para reconocer especies crípticas, analizar contenido vegetal en muestras ambientales (eDNA) y fortalecer programas de conservación. Su aplicación ha permitido estandarizar la identificación vegetal en contextos tan diversos como botánica forense, control de calidad en herbolaria o detección de especies invasoras (Jones et al., 2021).

1.4 Relevancia ecológica y conservación de la diversidad vegetal

La diversidad de plantas no solo tiene un valor intrínseco, sino que constituye la base funcional de los ecosistemas. Las plantas regulan el clima, estabilizan el suelo, producen oxígeno, capturan carbono y sustentan a millones de especies animales. Sin embargo, el cambio climático, la deforestación y la expansión urbana están acelerando la pérdida de diversidad vegetal a un ritmo sin precedentes. Se estima que una de cada cinco especies de plantas está en riesgo de extinción, lo que amenaza la seguridad alimentaria, la salud humana y la estabilidad ecológica global (Antonelli et al., 2020).

2. Principales divisiones del Reino Plantae

El Reino Plantae comprende una vasta diversidad de organismos que se agrupan en divisiones o filos según criterios evolutivos y morfofuncionales. La clasificación moderna se sustenta en datos moleculares y filogenéticos, que han reformulado muchas de las relaciones entre los grupos tradicionales, permitiendo establecer una organización más coherente con la evolución de las adaptaciones al medio terrestre (Renzaglia et al., 2020).

2.1 Briofitas

Las briofitas comprenden a los musgos, hepáticas y antocerotes, y representan uno de los grupos más antiguos de plantas terrestres. Son no vasculares, carecen de tejidos conductores especializados y dependen del agua para la fecundación. A pesar de su simplicidad estructural, desempeñan roles clave en la regulación hídrica del suelo, la sucesión ecológica y la colonización de ambientes extremos. Estudios recientes han resaltado la relevancia evolutiva de las briofitas como intermediarios en la transición de plantas acuáticas a terrestres (Harris et al., 2022)

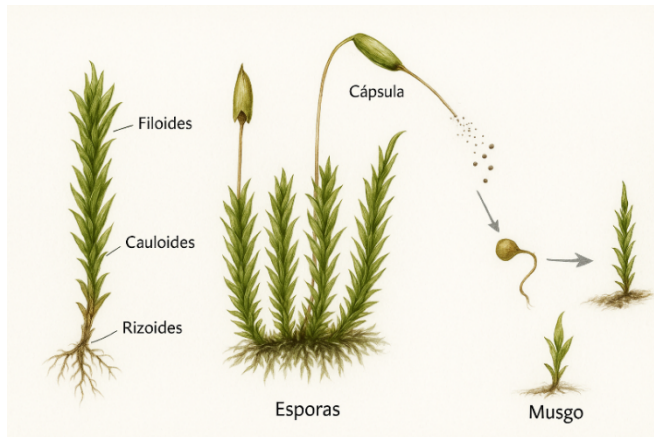


Ilustración 1. Briofitas-musgo.

El ciclo de vida de un musgo, una planta no vascular, se caracteriza por una alternancia de

generaciones. La fase dominante y visible es el gametofito haploide. Sobre este, crece el esporofito diploide, que produce esporas por meiosis. Cuando las esporas son liberadas, germinan para formar un protonema que, a su vez, se desarrolla en un nuevo gametofito, reiniciando el ciclo.

Fuente: Los autores.

2.2 Pteridofitas

Las pteridofitas, que incluyen helechos, licopodios y equisetos, fueron las primeras plantas con sistema vascular (xilema y floema), lo que les permitió alcanzar mayor tamaño y colonizar ambientes más diversos. Aunque no producen semillas, su ciclo de vida presenta una alternancia bien definida entre esporofito dominante y gametofito libre. Su diversidad ha sido redescubierta mediante análisis moleculares que han clarificado sus relaciones internas y su papel en ecosistemas húmedos (Cárdenas et al., 2023).

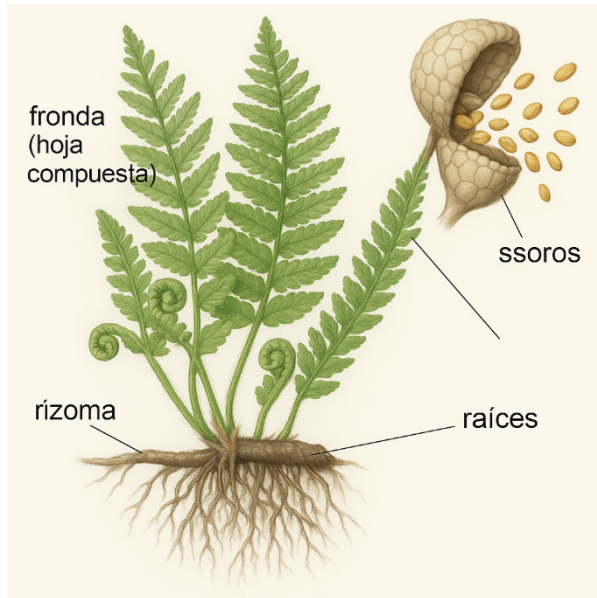


Ilustración 2. Pteridofitas - helechos.

Fuente: Los autores.

El esporofito del helecho, la fase dominante de su ciclo de vida, se caracteriza por una morfología distintiva que incluye la fronda (megafilo), que es la hoja principal para la fotosíntesis, el rizoma, un tallo subterráneo del cual emergen las frondas y las raíces verdaderas para anclaje y absorción. En el envés de las frondas, se encuentran los soros, que son agrupaciones de esporangios donde se producen las esporas por meiosis para la reproducción asexual.

2.3 Gimnospermas

Las gimnospermas agrupan a las plantas con semillas desnudas, como coníferas, cícadas, ginkgos y gnetales. Son vasculares, leñosas y presentan reproducción por polinización aérea, lo cual les ha permitido adaptarse a condiciones climáticas adversas. Aunque en términos de diversidad actual son menos numerosas que las angiospermas, poseen una gran relevancia ecológica y económica, especialmente en regiones boreales y en la industria forestal. Investigaciones genómicas recientes han revelado aspectos singulares de su evolución, como tasas lentas de cambio molecular (Wan et al., 2021).



Ilustración 3. Gimnospermas – ciclo de vida.

Fuente: Los autores.

El ciclo de vida de una gimnosperma, como el pino, se caracteriza por la dominancia de la fase esporofítica diploide, representada por el árbol adulto. Este árbol produce conos masculinos, que liberan polen (gametofito masculino), y conos femeninos, que contienen los óvulos. La polinización, generalmente anemófila (por viento), transporta el polen a los conos femeninos, donde ocurre la fecundación. Tras este evento, se forma un embrión dentro de una semilla desnuda (no encerrada en un fruto). La semilla, a menudo con adaptaciones para la dispersión por el viento, germina en condiciones favorables para dar origen a una nueva plántula que crecerá hasta convertirse en un árbol maduro, completando el ciclo.

2.4 Angiospermas

Las angiospermas constituyen el grupo más diverso y dominante del Reino Plantae, caracterizado por la presencia de flores, frutos y semillas protegidas. Su éxito evolutivo se debe a una combinación de estrategias reproductivas eficientes, coevolución con polinizadores, diversidad morfológica y plasticidad adaptativa. Representan más del 90 % de las especies vegetales actuales. La clasificación filogenética ha llevado a redefinir numerosos órdenes y familias, lo que ha sido posible gracias a avances en la secuenciación masiva de genomas vegetales (One Thousand Plant Transcriptomes Initiative, 2019).

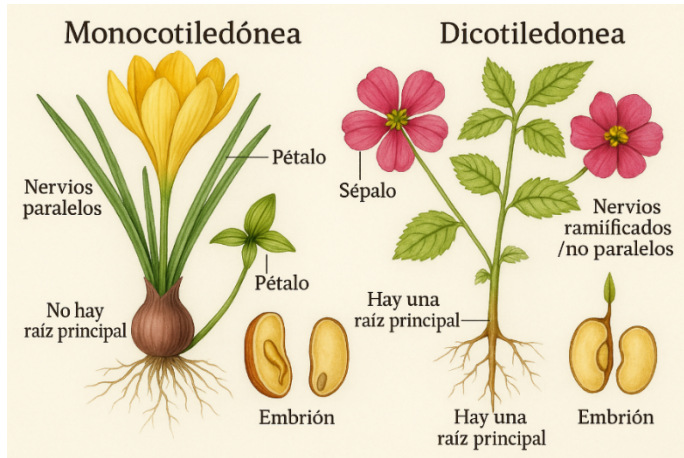


Ilustración 3. Angiospermas – Monocotiledónea y dicotiledónea.

Fuente: Los autores.

La comparación entre monocotiledóneas y dicotiledóneas revela diferencias morfológicas clave. Las monocotiledóneas se caracterizan por poseer un solo cotiledón, un sistema radicular fibroso, nerviación foliar paralela y piezas florales en múltiplos de tres. En contraste, las dicotiledóneas presentan dos cotiledones, un sistema radicular pivotante (con una raíz principal), nerviación foliar reticulada y piezas florales en múltiplos de cuatro o cinco.

Tabla 1. Las principales divisiones del Reino Plantae.

Criterio	Briofitas	Pteridofitas	Gimnospermas	Angiospermas
Tejido vascular	No	Sí	Sí	Sí
Tipo de reproducción	Esporas	Esporas	Semillas desnudas	Semillas protegidas en fruto
Estructuras reproductivas	Gametangios	Esporangios	Conos	Flores y frutos
Hábitat predominante	Ambientes húmedos	Bosques húmedos	Regiones templadas y frías	Ambientes diversos
Importancia ecológica	Retención de humedad, colonización inicial de suelos	Ciclo de nutrientes, estabilidad del sotobosque	Regulación del clima, producción de madera	Sustentación de cadenas tróficas, diversidad vegetal

Fuente: Los autores.

Reflexión integradora

Comprender las principales divisiones del Reino Plantae no solo permite identificar grupos vegetales con precisión, sino también reconocer su papel funcional en los ecosistemas y su valor evolutivo. Cada grupo representa un escalón en la conquista del medio terrestre y revela estrategias adaptativas que siguen siendo objeto de investigación en áreas como ecología, biotecnología y conservación.

3. Herramientas y métodos en taxonomía vegetal

La taxonomía vegetal ha trascendido su concepción tradicional como disciplina descriptiva para consolidarse como una ciencia integradora, rigurosa y metodológicamente sofisticada. Su propósito no se limita a nombrar o clasificar especies, sino que busca desentrañar las relaciones filogenéticas entre los linajes vegetales, revelar patrones evolutivos, y sustentar programas de conservación, monitoreo ambiental y aprovechamiento biotecnológico. Para ello, se vale de un cuerpo metodológico diverso, que incluye desde la observación morfológica hasta técnicas moleculares de última generación (Soltis et al., 2021).

3.1 Métodos morfológicos: el punto de partida histórico

El análisis morfológico sigue siendo la base fundamental de la clasificación vegetal. La estructura, disposición y forma de órganos como hojas, flores, tallos y frutos proporcionan criterios diagnósticos esenciales para la identificación y delimitación taxonómica. Este enfoque, cuando se combina con claves dicotómicas, descripciones anatómicas y observación fenológica, permite distinguir especies con alto nivel de precisión en campo. Aunque a menudo subestimado frente a los avances moleculares, su valor permanece vigente, especialmente en contextos ecológicos, paleobotánicos y de herborización (Judd et al., 2019).

3.2 Técnicas moleculares: precisión en la era genómica

La revolución molecular ha transformado radicalmente la taxonomía vegetal. Técnicas como la amplificación de regiones específicas del ADN (ej. *rbcL*, *matK*) y la secuenciación de genomas completos permiten construir árboles filogenéticos con base en relaciones evolutivas reales, más allá de similitudes superficiales. El método de DNA barcoding, ampliamente adoptado en estudios de biodiversidad y trazabilidad alimentaria, ha demostrado ser eficaz para identificar especies incluso a partir de fragmentos o muestras contaminadas. Esta

precisión es especialmente crítica en regiones megadiversas, donde la convergencia morfológica puede inducir a errores sistemáticos (Cahyaningsih et al., 2022).

3.3 Métodos anatómicos y fitoquímicos: el interior de la clasificación

Los métodos anatómicos permiten el estudio detallado de tejidos, células y estructuras internas de los vegetales, revelando características invisibles a simple vista, como patrones de lignificación, distribución de estomas o arquitectura del sistema vascular. Paralelamente, los perfiles fitoquímicos –especialmente la presencia de metabolitos secundarios como alcaloides, flavonoides o terpenos– pueden funcionar como marcadores taxonómicos de alta especificidad, útiles para diferenciar géneros o especies dentro de complejos evolutivos estrechamente emparentados (Yao et al., 2021).

3.4 Recursos complementarios: tecnología y sistematización del conocimiento

Además de los métodos analíticos, la taxonomía vegetal se apoya en una red de herramientas complementarias que facilitan la sistematización y acceso al conocimiento. Entre ellas destacan:

- Claves taxonómicas digitales, que automatizan la identificación mediante algoritmos multicriterio.

- Bases de datos globales como Trópicos, The Plant List o POWO (Plants of the World Online), que integran taxonomía, distribución geográfica e imágenes de referencia.
- Herbarios digitales, que permiten comparar especímenes tipo sin barreras geográficas ni de conservación.

Estas plataformas han democratizado el acceso al conocimiento botánico y fortalecen la investigación colaborativa a escala global (Antonelli et al., 2020).

Reflexión crítica

El estudio taxonómico vegetal no puede entenderse hoy como una práctica puramente descriptiva. Es una ciencia de alta complejidad, con implicaciones en biodiversidad, evolución, bioprospección, cambio climático y políticas de conservación. Integrar diferentes métodos, validar resultados con enfoques convergentes y mantener la actualización de los sistemas clasificatorios son desafíos constantes para el botánico del siglo XXI.

4. Importancia ecológica y económica de la diversidad vegetal

“La variedad de plantas —en genes, especies y comunidades— sostiene todos los procesos de los que dependen la vida y la economía humanas” (IPBES, 2023).

4.1 Sustrato ecológico de la biosfera

La diversidad vegetal es el motor de la productividad primaria: determina cuánta energía y biomasa ingresa a las redes tróficas y cuánto carbono queda secuestrado en la biosfera. Un metaanálisis global demostró que los ecosistemas con mayor diversidad funcional de plantas elevan su capacidad de captura de CO₂ y estabilizan los flujos de nutrientes frente a la variabilidad climática (Elbasiouny et al., 2022). Esta función resulta crítica en la mitigación del calentamiento global y en la regulación de los ciclos hidrológico y biogeoquímico.

4.2 Servicios ecosistémicos esenciales

La variedad de arquitecturas florales, fenologías y metabolitos secundarios sustenta la polinización animal, la retención de suelos, el filtrado de agua y la provisión de microhábitats. La pérdida de especies vegetales simplifica las redes planta-polinizador y reduce la resiliencia frente a extremos climáticos; proyecciones recientes anticipan descensos netos del 7-15 % en la producción global de cultivos dependientes de polinizadores si la diversidad floral continúa erosionándose (Millard et al., 2021).

4.3 Pilar de la seguridad alimentaria y la bioeconomía

El 80 % de las calorías humanas procede de apenas una docena de especies, pero los parientes silvestres de los cultivos concentran genes para tolerancia a sequía, salinidad y patógenos. Modelos de rendimiento muestran que la incorporación de alelos nativos podría incrementar la productividad global hasta un 17 % hacia 2050 (Cortés & López-Hernández, 2021). Al mismo tiempo, los sectores forestal, textil, cosmético y de biomateriales dependen de la diversidad botánica, que representa cerca del 2 % del PIB mundial (FAO, 2024).

4.4 Fuente inagotable de compuestos bioactivos y biotecnología

Más del 60 % de los fármacos oncológicos aprobados entre 1980-2022 derivan parcial o totalmente de metabolitos vegetales. La minería genómica de angiospermas ha revelado rutas biosintéticas inéditas para alcaloides, terpenoides y flavonoides con actividad antimicrobiana y anticancerígena (de Lemos et al., 2024). Paralelamente, la síntesis heteróloga de estos compuestos en plataformas bioingenierizadas abre nuevas fronteras para la industria farmacéutica y de biomateriales sostenibles.

4.5 Costos de la erosión de la diversidad vegetal

La degradación de hábitats y el cambio de uso del suelo han colocado a una de cada cinco especies de plantas en riesgo de extinción; las pérdidas proyectadas de servicios ecosistémicos equivalen a 4-6 % del PIB global anual (Kuang et al., 2024). Además, la homogeneización genética en la agricultura incrementa la vulnerabilidad a plagas y eventos climáticos extremos, multiplicando el costo de adaptaciones futuras.

Reflexión integradora

La **diversidad vegetal** no solo sostiene la estructura y el metabolismo de los ecosistemas; también constituye la infraestructura bioeconómica que alimenta, cura y da empleo a la humanidad. Protegerla es, por tanto, un imperativo científico, ético y económico que trasciende fronteras disciplinarias y geopolíticas.

5. Desafíos y estrategias en la conservación de la diversidad de plantas

“La pérdida de diversidad vegetal no es simplemente un fenómeno biológico; es la erosión de los fundamentos mismos que sostienen los sistemas ecológicos y las economías humanas.” – IPBES (2023)

5.1 Complejo panorama de amenazas contemporáneas

La integridad del Reino Plantae se enfrenta a un cóctel de presiones antrópicas cuyos efectos interactivos amplifican la velocidad y la magnitud de la extinción. El cambio climático –con sus gradientes térmicos y alteraciones hidrológicas– obliga a migraciones altitudinales y latitudinales para las que la mayoría de las especies carece de corredores adecuados; se prevé que, bajo el escenario RCP 8.5, una tercera parte de las plantas vasculares perderá más de la mitad de la idoneidad climática de su rango antes de 2070. A esta amenaza global se suma la fragmentación de hábitats, particularmente intensa en los trópicos, donde la deforestación avanza al ritmo de 0,8 % anual, generando islas de vegetación aisladas y empobrecidas genéticamente (Pendrill et al., 2022).

El comercio ilegal y la sobreexplotación de especies ornamentales y maderables, con tasas de crecimiento superiores al 15 % anual, erosionan poblaciones silvestres antes de que puedan evaluarse formalmente. A ello se añaden patógenos emergentes –como *Xylella fastidiosa*– y especies invasoras, factores que desencadenan mortalidades masivas y desplazan a la flora nativa. Finalmente, el déficit taxonómico (“brecha Linneana”) deja sin diagnóstico de riesgo a un tercio de las especies ya descritas, retardando cualquier medida de conservación (Gallagher et

al., 2023). La confluencia de estos vectores configura un escenario de “deuda de extinción” cuya amortización exige acciones inmediatas y coordinadas.

5.2 Estrategias in situ: sostener la evolución en su cuna natural

Las estrategias in situ, al preservar las interacciones ecológicas donde evolucionaron las especies, constituyen la piedra angular de cualquier programa de conservación.

- **Áreas protegidas dinámicas.** El rediseño adaptativo de reservas mediante la incorporación de corredores altitudinales y latitudinales ha demostrado mejorar sustancialmente la viabilidad poblacional. El caso mesoamericano de *Quercus rugosa* ilustra el impacto: la expansión y conexión de parques nacionales permitió la supervivencia de 62 % de sus poblaciones proyectadas a 2050 (López-Mendoza et al., 2022).
- **Restauración asistida con base climática.** El manejo adaptativo selecciona genotipos tolerantes a altas temperaturas y déficit hídrico. Ensayos en Brasil aumentaron en 27 % la supervivencia de *Araucaria angustifolia* al introducir procedencias preadaptadas a escenarios futuros (Wilson et al., 2019).

- **Conservación comunitaria y pagos por servicios ecosistémicos.** Integrar conocimientos indígenas y mecanismos REDD+ ha reducido la deforestación a menos del 0,5 % anual en territorios amazónicos, demostrando que la gobernanza local puede ser tan efectiva como la protección estricta (Wilson et al., 2019).

Estas acciones confirman que la resiliencia ecológica y sociocultural se refuerzan mutuamente cuando la conservación se diseña como proceso co-evolutivo entre naturaleza y sociedad.

5.3 Estrategias ex situ y biotecnológicas: la salvaguarda fuera del hábitat

Cuando la supervivencia in situ es improbable, la conservación ex situ y las tecnologías de punta actúan como red de seguridad genética.

- **Crioconservación de semillas recalcitrantes.** Protocolos de vitrificación a -196°C ya permiten almacenar *Theobroma cacao* sin pérdida de viabilidad, garantizando reservas para futuros programas de reintroducción (Fang et al., 2004).
- **Micropropagación masiva.** El cultivo in vitro en biorreactores temporales ha multiplicado en 300 % las plántulas sanas de *Cedrela odorata*, acelerando la reforestación y

reduciendo la presión sobre poblaciones silvestres (Santos Junior et al., 2021).

Aunque poderosas, estas herramientas requieren un marco ético y normativo que garantice transparencia, acceso equitativo y evitar la biopiratería.

5.4 Monitoreo de precisión: del análisis molecular al espectro satelital

La eficacia de cualquier estrategia depende de un seguimiento robusto y de alta resolución temporal:

- El eDNA metabarcoding permite detectar especies raras u ocultas con una sensibilidad diez veces superior a los muestreos tradicionales, transformando arroyos y lagos en "sensores biológicos" (Banerjee et al., 2022).
- Los satélites hiperespectrales (EnMAP, NASA SBG) generan mapas de riqueza florística a 30 m, fundamentando sistemas de alerta temprana contra la deforestación y el blanqueamiento de sabanas (Everest et al., 2025).

Estas innovaciones convierten la vigilancia de la biodiversidad en un esfuerzo interdisciplinario, donde la inteligencia artificial complementa la ciencia ciudadana y la taxonomía clásica.

5.5 Gobernanza y financiación: del compromiso político a la acción operacional

La adopción del Marco Global de Biodiversidad Kunming-Montreal (2022), con la meta “30×30”, marca un compromiso sin precedentes; sin embargo, su éxito dependerá de la movilización de recursos y de la implementación de instrumentos financieros innovadores, como los bonos de biodiversidad y los fondos basados en desempeño, los cuales pretenden canalizar más de USD 20 000 millones anuales hacia restauración y bioeconomía verde (Rodríguez, 2024). El Plant Conservation Strategy 2030 de BGCI introduce, además, objetivos específicos para bancos de semillas, formación taxonómica y participación ciudadana en datos abiertos, cimentando una arquitectura global colaborativa para la protección de la flora.

Reflexión conclusiva

La magnitud de los desafíos exige un paradigma de conservación integradora que combine rigurosidad científica, innovación tecnológica y justicia socioambiental. Cada futuro profesional de la Botánica debe concebirse no solo como investigador, sino como garante de la continuidad evolutiva de las plantas y, por consiguiente, de los procesos que sustentan la civilización humana. El éxito o fracaso de esta empresa definirá la línea entre un planeta funcional y uno ecológicamente empobrecido.

Reflexión de cierre

La preservación de la diversidad vegetal exige una síntesis estratégica: ciencia de vanguardia, gobernanza ambiciosa, financiamiento sostenido y participación social inclusiva. Falla uno de estos pilares y el colapso de servicios ecosistémicos se vuelve cuestión de tiempo. El desafío es inédito; sin embargo, las herramientas y el conocimiento científico reunidos en las últimas dos décadas ofrecen una oportunidad histórica para salvaguardar el patrimonio verde del planeta y con él, el futuro de la humanidad.

Elementos de cierre

Este segundo capítulo ha profundizado en la organización taxonómica y la riqueza evolutiva del Reino Plantae, adoptando un enfoque filogenético moderno. Se examinaron las características diagnósticas, los ciclos de vida y la importancia ecológica de las principales divisiones: las briofitas no vasculares, las pteridofitas como primeras plantas vasculares, las gimnospermas con su innovación de la semilla desnuda, y las angiospermas, el grupo más diverso y dominante. Se analizaron las metodologías contemporáneas que integran datos morfológicos, anatómicos, fitoquímicos y moleculares para robustecer la clasificación. Finalmente, se argumentó sobre la criticidad de la diversidad vegetal como pilar de los servicios

ecosistémicos y se introdujeron los complejos desafíos que enfrenta su conservación a escala global.

Transición al siguiente capítulo

Con un entendimiento claro de la clasificación y la diversidad de los grandes linajes vegetales, la investigación botánica se orienta hacia el "cómo": los procesos funcionales que permiten a estos organismos vivir, crecer y adaptarse. El Capítulo 3 se adentrará en la Fisiología Vegetal para desentrañar los mecanismos bioquímicos y biofísicos detrás de la fotosíntesis, el transporte de nutrientes, la regulación hormonal y la respuesta al estrés. Comprender el funcionamiento interno de las plantas es el paso lógico siguiente para poder manipular y aprovechar sus capacidades en la biotecnología y la agricultura.

Preguntas de revisión

Opción múltiple

1. ¿Cuál de los siguientes grupos posee semillas desnudas?
a) Pteridofitas b) Briofitas c) Gimnospermas d) Angiospermas
2. El *DNA barcoding* emplea principalmente:
a) Genes ribosómicos 5S b) Genes cloroplásticos matK/rbcL c) ARNt-Lys
d) Microsatélites nucleares

3. La función ecológica más directamente asociada a la diversidad vegetal es:
- a) Circulación termohalina
 - b) Productividad primaria
 - c) Erosión hídrica
 - d) Magnetismo terrestre

Verdadero / Falso

1. Las briofitas presentan tejidos vasculares diferenciados.
2. El sistema APG IV se basa exclusivamente en caracteres morfológicos.
3. Las estrategias in situ implican la conservación fuera del hábitat natural de la especie.

Respuesta abierta

1. Describa dos ventajas y una limitación del análisis morfológico frente al molecular en taxonomía vegetal.
2. Explique la importancia económica de conservar los parientes silvestres de los cultivos.
3. Proponga un ejemplo concreto de cómo los satélites hiperspectrales pueden apoyar la conservación de plantas endémicas.

Ejercicios aplicados

Ejercicio 1 - Estudio comparativo de divisiones

Elaborar un cuadro sinóptico que relacione para cada división (Briofitas, Pteridofitas, Gimnospermas, Angiospermas):

- Innovaciones evolutivas clave
- Tipo de hábitat predominante
- Ejemplo de especie emblemática y su uso humano

Ejercicio 2 - Análisis de caso de conservación

Seleccione un proyecto de restauración vegetal reciente (artículo o informe técnico). Evalúe:

- a) Objetivo de conservación
- b) Metodología utilizada
- c) Resultados preliminares
- d) Factores de éxito o fracaso
- e) Recomendaciones de mejora basadas en lo aprendido en este capítulo

Autoevaluación

Marque ✓ si:

Competencia

Lograda

Distingo rasgos diagnósticos de las cuatro divisiones principales

—

Comprendo el fundamento genético del *DNA barcoding*

—

Competencia

Lograda

Puedo explicar tres servicios ecosistémicos vinculados a la diversidad vegetal ____

Identifico al menos dos amenazas críticas para las plantas a escala global ____

Puedo esbozar una estrategia integrada de conservación para una especie nativa ____

Reflexión final

“Clasificar las plantas no es un mero ejercicio taxonómico; es cartografiar los cimientos mismos de la vida terrestre y trazar las rutas de supervivencia de nuestra propia especie. Preservar la diversidad vegetal es asegurar el pulso ecológico y económico del planeta.”

Referencias bibliográficas

- Angiosperm Phylogeny Group IV. (2016). An update of the APG classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181(1), 1–20. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>
- Antonelli, A., Smith, R. J., Fry, C., Simmonds, M. S. J., Kersey, P. J., Pritchard, H., ... Willis, K. J. (2020). *State of the world's plants and fungi 2020*. Royal Botanic Gardens, Kew. <https://doi.org/10.34885/172>
- Banerjee, P., Stewart, K. A., Dey, G., Antognazza, C. M., Sharma, R. K., Maity, J. P., Saha, S., Doi, H., de Vere, N., Chan, M. W. Y., Lin, P.-Y., Chao, H.-C., & Chen, C.-Y. (2022). Environmental DNA analysis as an emerging non-destructive method for plant biodiversity monitoring: A review. *AoB Plants*, 14(4), plac031. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plac031>
- Cahyaningsih, R., Compton, L. J., Rahayu, S., Magos Brehm, J., & Maxted, N. (2022). DNA barcoding medicinal plant species from Indonesia. *Plants*, 11, 1375. <https://doi.org/10.3390/plants11101375>

- Cárdenas, G. G., & Lehtonen, S. (2023). The third opinion on fern phylogenetics with novel insights into their mitogenome evolution. *Phytotaxa*, 625(3), 227-247. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.625.3.1>
- Cortés, A. J., & López-Hernández, F. (2021). Harnessing crop wild diversity for climate change adaptation. *Genes*, 12(5), 783. <https://doi.org/10.3390/genes12050783>
- de Lemos, S. M. C., Paschoal, A. R., Guyot, R., Medema, M., & Domingues, D. S. (2024). Genome mining of metabolic gene clusters in the Rubiaceae family. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 23, 22-33. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2023.11.034>
- Elbasiouny, H., El-Ramady, H., Elbehiry, F., Rajput, V. D., Minkina, T., & Mandzhieva, S. (2022). Plant nutrition under climate change and soil carbon sequestration. *Sustainability*, 14(2), 914. <https://doi.org/10.3390/su14020914>
- Everest, J. J., Van Cleemput, E., Beamish, A. L., Spasojevic, M. J., Humphries, H. C., & Elmendorf, S. C. (2025). Evaluating the utility of hyperspectral data to monitor local-scale β -diversity across space and

time. *Remote Sensing of Environment*, 316, 114507.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114507>

Fang, J.-Y., Wetten, A., & Hadley, P. (2004). Cryopreservation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) somatic embryos for long-term germplasm storage. *Plant Science*, 166(3), 669-675.

<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.11.002>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *The state of food and agriculture 2024: Value-driven transformation of agrifood systems*. FAO.

<https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd3007en>

Gallagher, R. V., Allen, S. P., Govaerts, R., Rivers, M. C., Allen, A. P., Keith, D. A., Merow, C., Maitner, B., Butt, N., Auld, T. D., Enquist, B. J., Eiserhardt, W. L., Wright, I. J., Mifsud, J. C. O., Espinosa-Ruiz, S., Possingham, H., & Adams, V. M. (2023). Global shortfalls in threat assessments for endemic flora by country. *Plants, People, Planet*, 5(6), 885-898. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10369>

Jones, L., Baker, B., Chuter, A., de Vere, N., ... Twyford, A. (2021). Barcode UK: A complete DNA barcoding resource for the flowering plants and conifers of the United

Kingdom. *Molecular Ecology Resources*, 21(6), 2050-2062.
<https://doi.org/10.1111/1755-0998.13388>

Judd, W. S., Campbell, C. S., Kellogg, E. A., Stevens, P. F., & Donoghue, M. J. (2015). *Plant systematics: A phylogenetic approach* (4.^a ed.). Oxford University Press.

Kuang, Y., Zhou, H., & Yin, L. (2024). Assessment of the impact of land use on biodiversity based on multiple scenarios—A case study of Southwest China. *Diversity*, 16(10), 630.
<https://doi.org/10.3390/d16100630>

Liu, L., Chen, M., Folk, R. A., Wang, M., Zhao, T., Shang, F., Soltis, D. E., & Li, P. (2023). Phylogenomic and syntenic data demonstrate complex evolutionary processes in early radiation of the rosids. *Molecular Ecology Resources*, 23(5), 1673-1688.
<https://doi.org/10.1111/1755-0998.13833>

López-Mendoza, A., Oyama, K., Pineda-García, F., & Aguilar-Romero, R. (2022). Defining conservation priorities for oak forests in Central Mexico based on networks of connectivity. *Forests*, 13(7), 1085.
<https://doi.org/10.3390/f13071085>

Millard, J., Outhwaite, C. L., Kinnersley, R., Freeman, R., Gregory, R. D., Adedoya, O.,

... Newbold, T. (2021). Global effects of land-use intensity on local pollinator biodiversity. *Nature Communications*, 12, 2902. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23228-3>

One Thousand Plant Transcriptomes Initiative. (2019). One thousand plant transcriptomes and the phylogenomics of green plants. *Nature*, 574, 679-685. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1693-2>

Pendrill, F., Gardner, T. A., Meyfroidt, P., Persson, U. M., Adams, J., Azevedo, T., Bastos Lima, M. G., Baumann, M., Curtis, P. G., De Sy, V., Garrett, R., Godar, J., Goldman, E. D., Hansen, M. C., Heilmayr, R., Herold, M., Kuemmerle, T., Lathuillière, M. J., Ribeiro, V., ... West, C. D. (2022). Disentangling the numbers behind agriculture-driven tropical deforestation. *Science*, 377(6611), eabm9267. <https://doi.org/10.1126/science.abm9267>

Renzaglia, K. S., Browning, W. B., & Merced, A. (2020). With over 60 independent losses, stomata are expendable in mosses. *Frontiers in Plant Science*, 11, 567. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00567>

Rodriguez, S. (2024, septiembre 19). Biodiversity finance grew ahead of COP16 but came

mostly as loans, says OECD. *Climate Home News*.

<https://www.climatechangenews.com/2024/09/19/biodiversity-finance-grew-ahead-of-cop16-but-came-mostly-as-loans-says-oecd-report/>

Santos Junior, C. F. dos, Costa, M. D., Rech, T. D., Boff, P., & Boff, M. I. C. (2021). Use of micropropagation in the vegetative rescue of adult trees of *Cedrela odorata* L. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 16(4), e8944.

<https://doi.org/10.5039/agraria.v16i4a8944>

Slik, J. W. F., Arroyo-Rodríguez, V., Aiba, S.-I., Alvarez-Loayza, P., Alves, L. F., Ashton, P., ... Venticinque, E. (2015). An estimate of the number of tropical tree species. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(24), 7472-7477.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1423147112>

Soltis, P. S., & Soltis, D. E. (2021). Plant genomes: Markers of evolutionary history and drivers of evolutionary change. *Plants, People, Planet*, 3(1), 74-82.

<https://doi.org/10.1002/ppp3.10159>

Wan, T., Liu, Z.-M., Li, L.-F., Leitch, A. R., Leitch, I. J., Lohaus, R., ... Wang, X.-W. (2022). Evolution of complex genome architecture

in gymnosperms. *GigaScience*, 11, giac078.

<https://doi.org/10.1093/gigascience/giac078>

Wilson, O. J., Walters, R. J., Mayle, F. E., Lingner, D. V., & Vibrans, A. C. (2019). Cold spot microrefugia hold the key to survival for Brazil's Critically Endangered Araucaria tree. *Global Change Biology*, 25(12), 4339-4351. <https://doi.org/10.1111/gcb.14755>

Yao, T., Feng, K., Xie, M., Barros, J., Tschaplinski, T. J., Tuskan, G. A., & Chen, J.-G. (2021). Phylogenetic occurrence of the phenylpropanoid pathway and lignin biosynthesis in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 704697. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.704697>

Capítulo 3: Fisiología vegetal: procesos vitales y adaptaciones

Introducción

La Fisiología vegetal estudia los procesos que permiten a las plantas captar, transformar y distribuir la energía y la materia, así como responder de manera dinámica a los estímulos ambientales. A lo largo de este capítulo se examinarán los mecanismos que subyacen a la fotosíntesis, la respiración, el transporte de agua y solutos, el crecimiento y el desarrollo, y las respuestas al estrés abiótico. Comprender estos procesos resulta esencial para diseñar estrategias de agricultura sostenible, restauración ecológica y mejoramiento genético en un contexto de cambio climático acelerado.

El análisis fisiológico proporciona una comprensión integral de cómo las plantas integran señales externas e internas para regular su funcionamiento, desde la apertura estomática hasta la producción de hormonas y la modificación de su arquitectura. Estos mecanismos de autorregulación permiten a las plantas maximizar su eficiencia en el uso de recursos y adaptarse a una amplia variedad de ambientes, incluidos aquellos caracterizados por condiciones extremas de temperatura, salinidad, déficit hídrico o radiación. Por tanto, el estudio de la fisiología vegetal no solo aborda funciones básicas, sino que también explica la plasticidad

fenotípica y los mecanismos de supervivencia en ecosistemas complejos.

En este marco, la fisiología vegetal se consolida como una disciplina puente entre la biología molecular, la ecología y las ciencias agronómicas. Las investigaciones contemporáneas permiten el desarrollo de cultivares más resistentes y eficientes mediante el aprovechamiento del conocimiento fisiológico combinado con tecnologías ómicas y enfoques biotecnológicos. Así, el presente capítulo no solo se orienta a describir los procesos fisiológicos fundamentales, sino también a fomentar una visión crítica sobre su aplicación en desafíos globales como la seguridad alimentaria, la conservación de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático.

Esquema del capítulo

- Fotosíntesis y respiración: flujo de energía en la planta
- Transporte de agua y solutos: fisiología del xilema y floema
- Crecimiento y desarrollo: regulación hormonal y genética
- Respuestas a estímulos y estrés: señalización y plasticidad
- Adaptaciones fisiológicas: estrategias CAM, C₄, xerófitas y halófitas

Preguntas guía

¿Cómo convierten las plantas la energía luminosa en energía química utilizable?

¿Qué fuerzas impulsan el ascenso de la savia bruta desde la raíz hasta la copa de un árbol?

¿De qué manera las hormonas vegetales coordinan el crecimiento y la respuesta a señales ambientales?

¿Qué adaptaciones fisiológicas permiten a ciertas plantas prosperar en condiciones extremas de sequía o salinidad?

¿Cómo se aprovechan los conocimientos de fisiología vegetal en la ingeniería de cultivos resistentes al estrés?

Objetivos de aprendizaje

Al finalizar el capítulo, el estudiante podrá:

- Analizar los flujos de energía en la planta, explicando los procesos de fotosíntesis y respiración y su balance en la productividad vegetal.
- Examinar los mecanismos biofísicos y moleculares que regulan el transporte de agua y solutos a través del xilema y el floema, y su implicancia en la respuesta al estrés hídrico.

- Correlacionar la regulación hormonal y genética con los procesos de crecimiento, desarrollo y plasticidad fenotípica de las plantas frente a estímulos ambientales.
- Fundamentar, a partir de los principios fisiológicos de adaptación (metabolismos C_4 y CAM, xerofitismo), las estrategias biotecnológicas para la ingeniería de cultivos resilientes al cambio climático

Competencias esperadas

- Comprende de forma crítica los procesos fisiológicos fundamentales.
- Integra evidencias experimentales para explicar fenómenos adaptativos.
- Aplica principios fisiológicos al diseño de investigaciones y soluciones agro-ambientales.

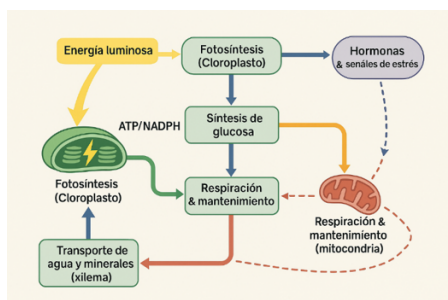


Figura 1. Diagrama sistémico de los flujos energéticos y de materia en la fisiología vegetal

Fuente: Los autores.

Cita motivadora / problema disparador

“La eficiencia con la que una planta captura luz y agua determina en gran medida su éxito evolutivo y el sustento de toda la biosfera.”– (Taiz et al., 2022)

1. Fotosíntesis y respiración: flujo de energía en la planta

1.1 Panorama general

La **fotosíntesis** y la **respiración** vegetal constituyen el núcleo del metabolismo energético de las plantas. La primera transforma la energía luminosa en compuestos químicos mediante la fijación del dióxido de carbono, mientras que la segunda oxida los productos fotosintéticos para liberar energía en forma de ATP, esencial para funciones celulares como el crecimiento, la diferenciación y la respuesta al estrés. El equilibrio entre ambos procesos determina la productividad neta del ecosistema y el rol de las plantas como sumideros o fuentes de carbono (Lambers & Oliveira, 2019).

Términos clave: complejos antena, centros de reacción, cadena de transporte de electrones, fotofosforilación, Ciclo de Calvin-Benson, fotorrespiración, cociente fotosíntesis/respiración (P/R).

1.2 Reacciones luminosas: captura y conversión de energía

Las **reacciones dependientes de la luz** ocurren en las membranas tilacoidales del cloroplasto, donde los **fotosistemas II y I** capturan fotones, excitan electrones y activan una cadena de transporte que culmina con la síntesis de **ATP y NADPH**. El agua actúa como donador de electrones, generando oxígeno como subproducto (Taiz et al., 2022). La **eficiencia cuántica máxima** se alcanza en condiciones de baja irradiancia, pero en ambientes de alta intensidad lumínica, las plantas despliegan mecanismos de protección como la **disipación no fotoquímica** para evitar el daño por exceso de energía (Rehaman et al., 2019).

1.3 Reacciones oscuras: fijación de CO₂

El **Ciclo de Calvin-Benson**, localizado en el estroma cloroplastidial, utiliza ATP y NADPH para reducir el CO₂ atmosférico a triosa-fosfatos mediante la enzima **Rubisco**. Sin embargo, la Rubisco también puede fijar O₂, generando un proceso menos eficiente conocido como **fotorrespiración**, que disminuye la productividad neta de las plantas C₃ (Gao, Li, Zhang, & Yang, 2024). Como respuesta adaptativa, han evolucionado las rutas **C₄** y **CAM**, que minimizan la pérdida de carbono al concentrar CO₂ en los sitios de carboxilación (Edwards et al., 2004).

1.4 Respiración: liberación controlada de energía

La **respiración mitocondrial** incluye la glicólisis en el citosol, el ciclo de Krebs en la matriz mitocondrial y la **cadena de transporte de electrones**, donde se sintetiza ATP por fosforilación oxidativa. Las plantas poseen vías respiratorias alternativas como la **oxidasa alternativa (AOX)**, que reduce la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y permite disipar calor, fenómeno observado en inflorescencias termogénicas como las de *Arum titan* (Vanlerberghe, 2013).

Dato curioso: Las inflorescencias del *Arum titan* pueden elevar su temperatura $> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima del ambiente gracias a la AOX, favoreciendo la volatilización de olores que atraen polinizadores.

1.5 Integración fotosíntesis-respiración y balance P/R

Durante el día, parte del ATP mitocondrial apoya procesos como la exportación de azúcares, mientras que durante la noche la respiración es vital para el reciclaje de intermediarios metabólicos (Noguchi et al., 2005). El cociente entre la tasa fotosintética (P) y la respiratoria (R) indica el rendimiento neto de una planta. En condiciones de estrés hídrico o salino, se incrementa el consumo energético para reparar estructuras celulares, reduciendo la eficiencia

fotosintética y alterando el balance P/R (Flexas & Medrano, 2002).

1.6 Ejemplos de investigación actual

Estudios recientes muestran que la **edición génica** mediante **CRISPR-Cas9** ha sido usada para optimizar la disipación de exceso de luz y mejorar el crecimiento bajo alta irradiancia, como en el caso del *tabaco modificado con reguladores de NPQ* (Murchie & Ruban, 2020). También se ha reportado que la **sobreexpresión de Rubisco activasa** mejora la fotosíntesis en arroz bajo estrés térmico (Qu et al., 2021). A nivel ecológico, la deposición de polvo urbano ha demostrado reducir la capacidad fotosintética en árboles urbanos como *Quercus robur*, lo que plantea desafíos para la gestión de bosques en entornos antropizados (Czaja, Kolton, & Muras, 2020).

Preguntas de reflexión

1. ¿Qué limitaciones impone la fotorrespiración a los cultivos C_3 y cómo podrían superarse?
2. ¿Por qué la disipación no fotoquímica es un arma de doble filo para la productividad vegetal?
3. ¿Cómo se ve afectado el cociente P/R en condiciones ambientales extremas?

Actividad aplicada

Diseña un experimento comparativo entre una planta C_3 (*Spinacia oleracea*) y una C_4 (*Zea mays*), midiendo su tasa fotosintética neta a diferentes intensidades de luz. Emplea sensores IRGA o datos simulados. Representa los resultados en una curva luz-respuesta y discute sus implicaciones fisiológicas.

2. Transporte de agua y solutos: fisiología del xilema y floema

2.1 Introducción general

El transporte de agua, nutrientes minerales y fotoasimilados en las plantas es esencial para mantener su homeostasis, crecimiento y respuesta adaptativa. Estos procesos ocurren a través de dos tejidos vasculares diferenciados: el **xilema**, encargado del ascenso del agua desde las raíces hasta los órganos fotosintéticos, y el **floema**, responsable de la distribución de compuestos orgánicos, principalmente azúcares, desde las hojas a los órganos no fotosintéticos (Taiz et al., 2022). Ambos flujos obedecen principios biofísicos que permiten la circulación sin gasto directo de energía en trayectos largos.

2.2 Transporte de agua por el xilema

El agua se mueve desde el suelo hasta las hojas impulsada por un gradiente de potencial hídrico.

Este flujo está mediado por tres fuerzas principales:

- **Absorción radicular pasiva** mediante ósmosis.
- **Capilaridad** y cohesión-adhesión en las paredes celulares.
- **Transpiración foliar**, que genera tensión negativa en la columna de agua.

El modelo **cohesión-tensión** propuesto por Dixon y Joly a finales del siglo XIX sigue vigente, aunque complementado por investigaciones recientes sobre la vulnerabilidad a la cavitación (Brodersen & McElrone, 2013). Durante estrés hídrico, las plantas activan mecanismos de cierre estomático y embolismo reversible.

Nota: La conductancia hidráulica total está determinada tanto por la arquitectura vascular como por la porosidad de las membranas celulares radiculares.

2.3 Movimiento de solutos en el floema

A diferencia del xilema, el **floema** transporta solutos desde las hojas (fuentes) hacia los órganos de consumo o almacenamiento (sumideros), como raíces, flores, frutos y semillas. Este transporte es **bidireccional** y se explica por el **modelo de presión de flujo de Munch**: la carga activa de azúcares en las células cribosas reduce el potencial hídrico, atrayendo agua desde el

xilema y generando presión que impulsa el flujo hacia los sumideros (Turgeon & Wolf, 2009).

La carga del floema puede ser:

- **Simbiótica** (por difusión a través de plasmodesmos).
- **Apoplástica** (por transporte activo con gasto de ATP y uso de cotransportadores H^+ /sacarosa).

2.4 Regulación hormonal y respuestas adaptativas

Las **hormonas vegetales** como el **ácido abscísico (ABA)** regulan el transporte vascular. En condiciones de sequía, el ABA induce cierre estomático, reduce la transpiración y modifica la expresión de **acuaporinas** en raíces, disminuyendo la absorción y el flujo de agua (Shatil-Cohen, Attia, & Moshelion, 2011).

2.5 Aplicaciones y relevancia ecológica

El conocimiento de la fisiología del transporte vegetal permite optimizar el riego en cultivos, seleccionar genotipos resistentes a la sequía y diseñar estrategias de manejo del estrés abiótico. Además, el estudio de la hidráulica vegetal es clave para comprender la resiliencia de los bosques frente al cambio climático.

Investigación destacada

Un estudio en *Vitis vinifera* (vid) demostró que los genotipos con mayor densidad de vasos xilemáticos presentaban mayor eficiencia hidráulica pero también mayor vulnerabilidad a la cavitación, lo que plantea un dilema adaptativo frente a escenarios de sequía extrema (Choat et al., 2012).

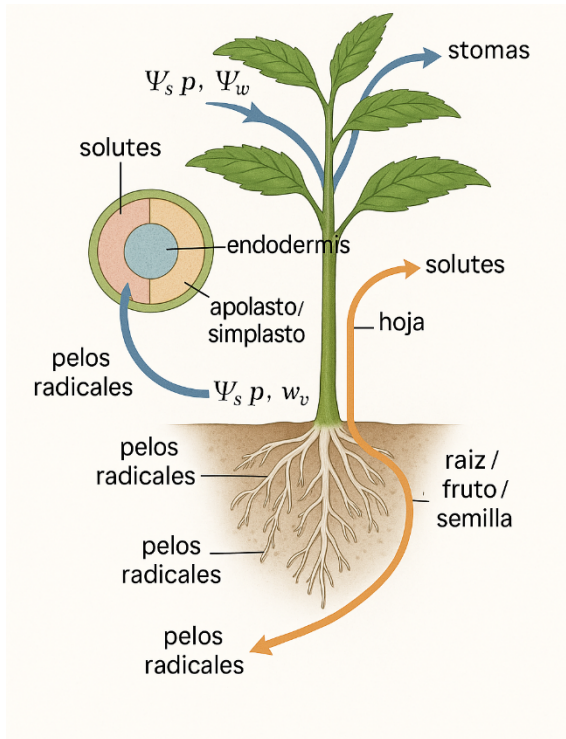


Ilustración 1. Esquema de transporte de agua y solutos en una planta. El diagrama describe los dos sistemas de transporte a larga distancia en las plantas vasculares. El flujo de agua en el xilema,

que se representa como la corriente de transpiración, moviliza el agua desde la raíz hasta las hojas. Este ascenso se explica por la teoría de la cohesión-tensión, impulsada por un gradiente de potencial hídrico (Ψ_w) generado por la evaporación del agua a través de los estomas. En paralelo, la translocación de solutos en el floema mueve los fotosintatos (principalmente sacarosa) desde los órganos fuente (hojas) hacia los órganos sumidero (raíces, frutos). Este proceso se rige por el modelo de flujo por presión, donde un gradiente de presión osmótica impulsa la savia elaborada a través del sistema vascular.

Fuente: Los autores.

Preguntas de reflexión

1. ¿Por qué las plantas tolerantes a la sequía suelen reducir su tasa de crecimiento?
2. ¿Qué ventajas y desventajas presenta un sistema vascular con alta conductividad hidráulica?
3. ¿Cómo afecta la actividad estomática al transporte en ambos tejidos vasculares?

2.8 Actividad aplicada

Práctica experimental simulada o de laboratorio:

- Usa una planta de frijol o tomate para observar el movimiento del agua con colorantes (azul de metileno en agua).
- Diseña un ensayo comparativo con dos condiciones: humedad del 100 % vs. 30 %.
- Mide pérdida de masa por transpiración, apertura estomática, y analiza la relación con el transporte de agua.

3. Crecimiento y desarrollo vegetal: regulación hormonal y genética

3.1 Introducción general

El crecimiento y desarrollo vegetal son procesos altamente regulados, que permiten a las plantas aumentar de tamaño, diferenciar tejidos y órganos, y adaptarse a su entorno durante todo su ciclo de vida. Estas etapas se rigen por programas genéticos, influencias ambientales y una sofisticada red de hormonas vegetales que modulan la expresión génica, la división y elongación celular, y la formación de estructuras especializadas (Taiz et al., 2022; Salaün, Lepiniec, & Dubreucq, 2021).

3.2 Fases del crecimiento vegetal

El crecimiento se define como un aumento irreversible en masa o volumen y consta de tres fases:

- **División celular** (zona meristemática): se produce en los meristemas apicales del tallo y raíz, donde las células madre se multiplican activamente.
- **Elongación celular:** incremento del tamaño por absorción de agua y relajación de la pared celular mediada por expansinas.
- **Diferenciación:** especialización estructural y funcional en tejidos (xilema, floema, parénquima, etc.).

Estas fases están influenciadas por factores como la luz, la temperatura, y el potencial hídrico del entorno (Lambers & Oliveira, 2019).

3.3 Regulación hormonal

Las plantas producen fitohormonas que actúan como señales químicas reguladoras. Cada una tiene múltiples funciones, que dependen de su concentración, interacción con otras hormonas, y el tejido donde actúa:

Tabla 1. Interacciones hormonales en plantas.

Hormona	Función principal	Ejemplo funcional
Auxinas (IAA)	Elongación celular, tropismos, dominancia apical	Fototropismo en <i>Arabidopsis</i>
Giberelinas (GA)	Elongación del tallo, floración, germinación	Ruptura de dormancia en semillas
Citocininas	División celular, retraso de senescencia	Producción en raíces y transporte al brote
Ácido abscísico (ABA)	Respuesta al estrés, cierre estomático, inhibición del crecimiento	Acumulación en sequía
Etileno	Maduración de frutos, senescencia, respuesta al estrés mecánico	Triple respuesta en plántulas

Fuente: Vanneste & Friml, 2009.

Las interacciones hormonales son clave: por ejemplo, el balance auxina/citocinina regula la

formación de raíces vs. brotes en cultivo in vitro (Benková & Hejátko, 2009).

3.4 Control genético del desarrollo

El desarrollo vegetal está controlado por redes genéticas reguladoras activadas por señales internas y externas. Genes como WUSCHEL, CLAVATA, LEAFY y KNOX coordinan el patrón del crecimiento apical, la formación floral y la identidad foliar (Coen & Meyerowitz, 1991).

3.5 Luz, fotoperiodo y relojes circadianos

El desarrollo está sincronizado con el ambiente a través de receptores de luz como los fitocromos (luz roja/lejana roja) y criptocromos (luz azul), que regulan la fotomorfogénesis, la germinación, la floración y la senescencia.

El fotoperiodo activa rutas hormonales dependientes de genes como CONSTANS y FLOWERING LOCUS T (FT), permitiendo la floración en función de la duración del día (Andrés & Coupland, 2012).

3.6 Aplicaciones prácticas

El conocimiento del crecimiento y desarrollo vegetal tiene múltiples aplicaciones:

- **Biotechnología** agrícola:
modificación de genes

relacionados con floración, maduración, y tamaño de fruto.

- **Cultivo in vitro:** manipulación hormonal para regeneración y micropropagación.
- **Agricultura de precisión:** uso de reguladores de crecimiento para controlar altura, floración o senescencia.

Ejemplo: la edición genética del gen *GA20ox* en tomate resultó en plantas compactas sin afectar la producción (Tiwari, Singh, & Behera, 2023).

Nota destacada

El desarrollo vegetal no es una secuencia lineal, sino un programa flexible que responde a señales genéticas, hormonales y ambientales integradas.

Preguntas de reflexión

1. ¿Cómo se integra la señal hormonal con la expresión génica durante el desarrollo?
2. ¿Qué ventajas evolutivas ofrece a las plantas una regulación hormonal plástica?
3. ¿En qué situaciones agrícolas se usan inhibidores de giberelinas y por qué?

Actividad aplicada

Simulación de cultivo in vitro hormonal:

- Investiga y diseña una tabla de tratamiento con distintas proporciones de auxina y citocinina para inducir la formación de raíces, brotes o callo en explantes de *Nicotiana tabacum*.
- Compara tus resultados hipotéticos con estudios reales sobre regeneración vegetal.
- Discute qué combinaciones son más eficientes y por qué.

4. Respuestas a estímulos y estrés: señalización y plasticidad vegetal

4.1 Introducción general

Las plantas, como organismos sésiles, enfrentan continuamente cambios ambientales que afectan su supervivencia y rendimiento. Para afrontar estas condiciones, han desarrollado una extraordinaria plasticidad fisiológica y molecular que les permite percibir estímulos, transducir señales y activar respuestas adaptativas. Estas respuestas pueden ser inmediatas o inducir ajustes a largo plazo en crecimiento, metabolismo o morfogénesis (Wang et al., 2023; Taiz et al., 2022).

4.2 Percepción de estímulos ambientales

Las plantas detectan señales del entorno mediante receptores especializados ubicados en membranas, citoplasma o núcleo. Estos receptores responden a:

- **Luz:** fitocromos (luz roja), criptocromos (azul), fototropinas.
- **Gravedad:** estatolitos en células de la raíz.
- **Contacto mecánico:** mecanorreceptores en la membrana.
- **Temperatura, agua, nutrientes, salinidad:** sensores osmorreguladores y canales iónicos.

La activación de estos receptores genera cascadas de transducción mediadas por segundos mensajeros como Ca^{2+} , ROS y ácido abscísico (ABA) (Ranty et al., 2016).

4.3 Estrés abiótico y fisiología adaptativa

Las respuestas adaptativas dependen de la intensidad, duración y tipo de estrés, así como de la fase de desarrollo de la planta. Los principales estreses abióticos que afectan a las plantas incluyen:

Tabla 2. Tipo de estrés y su efecto fisiológico.

Tipo de estrés	Efecto fisiológico	Mecanismo de respuesta
Sequía	Pérdida de turgencia, cierre estomático	Acumulación de ABA, activación de acuaporinas, síntesis de prolina
Salinidad	Toxicidad iónica, desbalance osmótico	Exclusión de Na ⁺ , compartimentación vacuolar, síntesis de osmoprotectores
Frío/calor	Daño estructural en membranas y proteínas	Expresión de proteínas LEA y HSP, acumulación de azúcares
Radiación UV	Daño en ADN y cloroplastos	Producción de flavonoides, reparación de ADN, activación de antioxidantes

Fuente: Ranty et al., 2016.

4.4 Estrés biótico: defensa frente a patógenos y herbívoros

Las plantas poseen mecanismos de inmunidad innata que se dividen en dos niveles:

1. **PTI (Immunity Triggered by Pathogen-associated molecular patterns):** reconoce patrones comunes en patógenos.
2. **ETI (Effector-triggered immunity):** responde a efectores específicos mediante genes R.

Estas defensas activan la producción de fitoalexinas, compuestos fenólicos y proteínas PR, muchas veces mediadas por ácido jasmónico, etileno y ácido salicílico (Jones & Dangl, 2006).

Ejemplo: el ácido jasmónico se acumula rápidamente ante daño mecánico o masticación de insectos, activando defensas localizadas y sistémicas (Howe et al., 2018).

4.5 Plasticidad fenotípica y memoria del estrés

La plasticidad fenotípica permite ajustar morfología y fisiología según el entorno, como modificar la orientación de hojas, desarrollar raíces más profundas o ajustar la densidad estomática. Además, algunas especies desarrollan una memoria del estrés, mediada por

cambios epigenéticos que facilitan una respuesta más eficiente ante exposiciones subsecuentes (Crisp et al., 2016).

Ejemplos de investigación actual

- En *Arabidopsis thaliana*, la sobreexpresión del gen DREB1A ha mejorado la tolerancia al frío y la sequía mediante activación de genes reguladores de estrés (Kasuga et al., 1999).
- En arroz, la edición del gen OsHKT1;5 ha permitido mejorar la tolerancia a salinidad controlando el transporte de Na⁺ hacia las hojas (Kumar et al., 2018).
- Estudios recientes han demostrado que exposiciones leves a estrés térmico inducen marcas de histona H3K4me3 en genes de respuesta, favoreciendo la memoria térmica (Lämke & Bäurle, 2017).

Nota destacada

Las plantas no huyen del peligro: lo enfrentan activando redes moleculares tan complejas como las de los animales, pero sin sistema nervioso.

Preguntas de reflexión

1. ¿Qué ventajas ofrece una respuesta de estrés inducible frente a una respuesta constitutiva?

2. ¿De qué manera se relacionan las hormonas ABA, etileno y ácido jasmónico en la respuesta al estrés combinado?
3. ¿Cómo puede aprovecharse el conocimiento de la memoria del estrés en el mejoramiento vegetal?

Actividad aplicada

Análisis de caso: Investiga una especie vegetal cultivada (ej. arroz, tomate, quinoa) y documenta:

- Tipo de estrés que enfrenta en su entorno.
- Respuestas fisiológicas registradas.
- Genes o vías bioquímicas involucradas.
- Aplicaciones en biotecnología agrícola.

Realiza una presentación corta (esquema o infografía) explicando cómo podría mejorarse su tolerancia.

5. Adaptaciones fisiológicas: estrategias para la vida en condiciones extremas

5.1 Introducción general

Las plantas han colonizado los ecosistemas más desafiantes del planeta gracias a adaptaciones fisiológicas que les permiten sobrevivir en ambientes áridos, salinos, pobres en nutrientes, o con temperaturas extremas. Estas adaptaciones abarcan mecanismos morfoanatómicos, ajustes

metabólicos, y modificaciones en la fotosíntesis, como la aparición de los ciclos C_4 y CAM, que mejoran la eficiencia del uso del agua y del carbono (Lambers & Oliveira, 2019; Taiz et al., 2022).

5.2 Plantas C_4 : eficiencia en ambientes cálidos y soleados

El metabolismo C_4 representa una adaptación fotosintética que reduce la fotorrespiración mediante la separación espacial de la fijación inicial del CO_2 y el Ciclo de Calvin. Este mecanismo se caracteriza por:

- Fijación inicial en mesófilo vía **PEP carboxilasa** → ácido oxaloacético.
- Transporte a células de la **vaina del haz** donde opera la Rubisco.
- Alta eficiencia fotosintética y menor pérdida de agua.

Ejemplos: *Zea mays* (maíz), *Sorghum bicolor*, *Amaranthus spp.*

Ventaja adaptativa: Productividad superior en climas cálidos y con alta radiación (Sage et al., 2012).

5.3 Plantas CAM: eficiencia hídrica extrema

Las plantas CAM (Metabolismo Ácido de las Crasuláceas) presentan una separación temporal en la captura y uso del CO₂:

- **Noche:** Estomas abiertos, captación de CO₂ → conversión en malato → almacenamiento en vacuolas.
- **Día:** Estomas cerrados, liberación de CO₂ desde el malato para el Ciclo de Calvin.

Ejemplos: *Opuntia ficus-indica*, *Ananas comosus*, *Kalanchoë spp.*

Ventaja adaptativa: Altísima eficiencia en uso del agua; ideal para regiones áridas o con alta evapotranspiración (Borland et al., 2009).

5.4 Plantas xerófitas: vida en desiertos

Las **xerófitas** presentan múltiples adaptaciones morfológicas y fisiológicas:

Adaptación	Función
Cutícula gruesa	Reduce la transpiración
Estomas hundidos o escasos	Menor pérdida de agua
Parénquima acuífero	Almacena agua
Raíces profundas/extensas	Accede a fuentes subterráneas

5.5 Plantas halófitas: tolerancia a suelos salinos

Las **halófitas** sobreviven en ambientes con alta concentración de sales (NaCl), lo que provoca estrés osmótico e iónico. Sus adaptaciones incluyen:

- **Bombas de iones** (H^+ -ATPasa, antiportadores Na^+/H^+).
- **Exclusión radicular** o compartimentalización de sales en vacuolas.
- Síntesis de **osmoprotectores** (prolina, glicina-betaína).
- Glandulas o tricomas secretoras de sal.

Ejemplos: *Salicornia spp.*, *Avicennia germinans*, *Suaeda spp.*

Su estudio es clave para el desarrollo de cultivos tolerantes a salinidad (Flowers & Colmer, 2015).

5.6 Plantas hiperacumuladoras y serpentinófitas

Algunas especies vegetales han evolucionado para crecer en suelos ricos en metales pesados o con deficiencia nutricional. Estas plantas:

- Toleran altas concentraciones de Zn, Ni, Cd, etc.
- Poseen mecanismos de quelación y secuestro en vacuolas.

- Contribuyen a la fitorremediación de suelos contaminados.

Ejemplos: *Thlaspi caerulescens*, *Pteris vittata*, *Alyssum spp.*

Aplicación: Biorremediación ambiental y minería vegetal (Liu et al., 2020).

5.7 Aplicaciones en agricultura y biotecnología

El estudio de estas adaptaciones fisiológicas tiene implicaciones directas:

- **Ingeniería de cultivos C₄:** incorporación de rutas eficientes en especies C₃ (Hibberd et al., 2008).
- **Mejoramiento de CAM inducible:** optimización de eficiencia hídrica.
- **Cultivo en suelos marginales:** uso de halófitas o genotipos resistentes.
- **Producción de biomasa en zonas secas:** uso de agaves o nopales como cultivos energéticos.

Nota destacada

Las adaptaciones fisiológicas de las plantas revelan estrategias evolutivas complejas para prosperar en condiciones que matarían a la mayoría de los organismos.

Elementos de cierre

Resumen del capítulo 3

Este capítulo ha explorado los procesos fisiológicos que sustentan la vida de las plantas. Se inició con el análisis del metabolismo energético, detallando las reacciones luminosas y de fijación de carbono de la fotosíntesis, así como las vías de la respiración celular, cuyo balance determina la productividad primaria. Posteriormente, se examinaron los mecanismos biofísicos del transporte de agua y solutos a través de los sistemas vasculares del xilema y el floema, explicando la homeostasis hídrica. Se profundizó en la regulación del crecimiento y desarrollo, mediada por una compleja red de fitohormonas y genes que responden a señales ambientales como la luz y el fotoperiodo. Finalmente, se abordaron las estrategias de plasticidad y adaptación a estrés abiótico y biótico, incluyendo mecanismos de defensa y adaptaciones especializadas como los metabolismos C_4 y CAM, que permiten la supervivencia en condiciones extremas.

Transición al siguiente capítulo

El dominio de los principios fisiológicos –desde la captura de energía y la síntesis de metabolitos hasta las respuestas adaptativas al entorno– constituye el prerrequisito indispensable para la innovación en Botánica Aplicada. El Capítulo 4 se

dedicará a explorar cómo este conocimiento de los mecanismos internos de las plantas se traduce en soluciones tangibles para la sociedad. Se demostrará cómo la manipulación de rutas metabólicas permite obtener nuevos fármacos, cómo la comprensión de la respuesta al estrés guía el mejoramiento de cultivos, y cómo la función de las plantas en los ecosistemas es clave para la mitigación del cambio climático y la conservación.

Preguntas de reflexión

1. ¿Qué ventajas y desventajas representa el metabolismo CAM frente al C_4 en ambientes áridos?
2. ¿Cómo podrían aprovecharse las halófitas para enfrentar el avance de la salinización agrícola?
3. ¿Qué limitaciones técnicas y éticas implica transferir genes adaptativos entre especies vegetales?

Actividad aplicada

Análisis comparativo:

Selecciona tres especies adaptadas a diferentes tipos de estrés (una C₄, una CAM y una halófito) y realiza una ficha comparativa que incluya:

- Ecosistema de origen.
- Tipo de estrés dominante.
- Adaptaciones morfofisiológicas.
- Posibles aplicaciones agrícolas

Referencias bibliográficas

- Andrés, F., & Coupland, G. (2012). The genetic basis of flowering responses to seasonal cues. *Nature Reviews Genetics*, 13(9), 627-639. <https://doi.org/10.1038/nrg3291>
- Benková, E., & Hejácíko, J. (2009). Hormone interactions at the root apical meristem. *Plant Molecular Biology*, 69(4), 383-396. <https://doi.org/10.1007/s11103-008-9393-6>
- Borland, A. M., Griffiths, H., Hartwell, J., & Smith, J. A. C. (2009). Exploiting the potential of plants with crassulacean acid metabolism for bioenergy production on marginal lands. *Journal of Experimental Botany*, 62(3), 1953-1967. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp118>
- Brodersen, C. R., & McElrone, A. J. (2013). Maintenance of xylem network transport capacity: A review of embolism repair in vascular plants. *Frontiers in Plant Science*, 4, Article 108. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00108>
- Choat, B., Jansen, S., Brodribb, T. J., Cochard, H., Delzon, S., Bhaskar, R., Bucci, S. J., Feild, T. S., Gleason, S. M., Hacke, U. G., Jacobsen, A. L., Lens, F., Maherali, H., Martínez-Vilalta,

- J., Mayr, S., Mencuccini, M., Mitchell, P. J., Nardini, A., Pittermann, J., ... Zanne, A. E. (2012). Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, 491(7426), 752-755.
<https://doi.org/10.1038/nature11688>
- Coen, E. S., & Meyerowitz, E. M. (1991). The ABC model of floral development. *Current Biology*, 1(5), 327-332.
[https://doi.org/10.1016/0960-9822\(91\)90007-G](https://doi.org/10.1016/0960-9822(91)90007-G)
- Crisp, P. A., Ganguly, D., Eichten, S. R., Borevitz, J. O., & Pogson, B. J. (2016). Reconsidering plant memory: Intersections between stress recovery, RNA turnover, and epigenetics. *Science Advances*, 2(2), e1501340.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1501340>
- Czaja, M., Kołton, A., & Muras, P. (2020). The complex issue of urban trees—Stress factor accumulation and ecological service possibilities. *Forests*, 11(9), 932.
<https://doi.org/10.3390/f11090932>
- Edwards, G. E., Franceschi, V. R., & Voznesenskaya, E. V. (2004). Single-cell C4 photosynthesis versus the dual-cell (Kranz) paradigm. *Annual Review of Plant Biology*, 55, 173-196.

<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141725>

- Flexas, J., & Medrano, H. (2002). Drought-inhibition of photosynthesis in C₃ plants: Stomatal and non-stomatal limitations revisited. *Annals of Botany*, 89(2), 183-189. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf027>
- Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2015). Plant salt tolerance: Adaptations in halophytes. *Annals of Botany*, 115(3), 327-331. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu267>
- Gao, X., Li, H., Zhang, Y., & Yang, J. (2024). The ternary complex consists of CBF-DREB2A-SnRK2.6 enhances drought tolerance by modulating PIP2;5 phosphorylation and inducing tolerance to cold stress. *Trends in Plant Science*, 29(5), 456-468. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2024.01.003>
- Hibberd, J. M., Sheehy, J. E., & Langdale, J. A. (2008). Using C₄ photosynthesis to increase the yield of rice—Rationale and feasibility. *Current Opinion in Plant Biology*, 11(2), 228-231. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2007.11.002>
- Howe, G. A., Major, I. T., & Koo, A. J. (2018). Modularity in jasmonate signaling for multistress resilience. *Annual Review of*

Plant Biology, 69, 387-415.
<https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040047>

Jones, J. D. G., & Dangl, J. L. (2006). The plant immune system. *Nature*, 444(7117), 323-329. <https://doi.org/10.1038/nature05286>

Kasuga, M., Liu, Q., Miura, S., Yamaguchi-Shinozaki, K., & Shinozaki, K. (1999). Improving plant drought, salt, and freezing tolerance by gene transfer of a single stress-inducible transcription factor. *Nature Biotechnology*, 17(3), 287-291. <https://doi.org/10.1038/7036>

Kumar, V., Jain, M., & Tyagi, A. K. (2018). CRISPR-Cas9 directed genome engineering for enhancing salt tolerance in rice. *Biotechnology Advances*, 36(7), 2060-2075. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.08.004>

Lambers, H., & Oliveira, R. S. (2019). *Plant physiological ecology* (3.^a ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-29639-1>

Lämke, J., & Bäurle, I. (2017). Epigenetic and chromatin-based mechanisms in environmental stress adaptation and stress memory in plants. *Genome Biology*, 18,

Article 124.
<https://doi.org/10.1186/s13059-017-1263-6>

Liu, Y., Zhang, Y., Wang, L., & Chen, X. (2020). Visualizing hotspots and future trends in phytomining research through scientometrics. *Sustainability*, 12(11), 4593.
<https://doi.org/10.3390/su12114593>

Murchie, E. H., & Ruban, A. V. (2020). Dynamic non-photochemical quenching in plants: From molecular mechanism to productivity. *The Plant Journal*, 101(4), 885-896.
<https://doi.org/10.1111/tpj.14601>

Noguchi, K., Taylor, N. L., Millar, A. H., Lambers, H., & Day, D. A. (2005). Response of mitochondria to light intensity in the leaves of sun and shade species. *Plant, Cell & Environment*, 28(6), 760-771.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01322.x>

Qu, Y., Sakoda, K., Fukayama, H., Kondo, E., Suzuki, Y., Makino, A., Terashima, I., & Yamori, W. (2021). Overexpression of both Rubisco and Rubisco activase rescues rice photosynthesis and biomass under heat stress. *Plant, Cell & Environment*, 44(7), 2308-2320.
<https://doi.org/10.1111/pce.14051>

- Ranty, B., Aldon, D., Cotellet, V., Galaud, J.-P., Thuleau, P., & Mazars, C. (2016). Calcium sensors as key hubs in plant responses to biotic and abiotic stresses. *Frontiers in Plant Science*, 7, Article 327. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00327>
- Rehaman, A., Mishra, A. K., Ferdose, A., Per, T. S., Hanief, M., Jan, A. T., & Asgher, M. (2020). Melatonin in plant defense against abiotic stress. *Forests*, 12(10), 1404. <https://doi.org/10.3390/f12101404>
- Sage, R. F., Sage, T. L., & Kocacinar, F. (2012). Photorespiration and the evolution of C4 photosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, 63, 19-47. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105511>
- Salaün, C., Lepiniec, L., & Dubreucq, B. (2021). Genetic and molecular control of somatic embryogenesis. *Plants*, 10(7), 1467. <https://doi.org/10.3390/plants10071467>
- Shatil-Cohen, A., Attia, Z., & Moshelion, M. (2011). Bundle-sheath cell regulation of xylem-mesophyll water transport via aquaporins under drought stress: A target of xylem-borne ABA? *The Plant Journal*, 67(1), 72-80. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2011.04576.x>

- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2022). *Plant physiology and development* (7th ed.). Sinauer Associates.
- Tiwari, J. K., Singh, A. K., & Behera, T. K. (2023). CRISPR/Cas genome editing in tomato improvement: Advances and applications. *Frontiers in Plant Science*, 14, Article 1121209.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1121209>
- Turgeon, R., & Wolf, S. (2009). Phloem transport: Cellular pathways and molecular trafficking. *Annual Review of Plant Biology*, 60, 207-221.
<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.043008.092045>
- Vanlerberghe, G. C. (2013). Alternative oxidase: A mitochondrial respiratory pathway to maintain metabolic and signaling homeostasis during abiotic and biotic stress in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(4), 6805-6847.
<https://doi.org/10.3390/ijms14046805>
- Vanneste, S., & Friml, J. (2009). Auxin: A trigger for change in plant development. *Cell*, 136(6), 1005-1016.
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2009.03.001>

Wang, L., Li, Y., Chen, J., Zhang, Y., & Liu, H.
(2023). The molecular basis of heat stress
responses in plants. *Plant
Communications*, 4(5), 100345.
<https://doi.org/10.1016/j.xplc.2023.100345>

Capítulo 4: Botánica aplicada, ciencia vegetal para el desarrollo sostenible

Introducción

En el contexto actual de crisis ambiental, inseguridad alimentaria y desigualdades en el acceso a la salud, la botánica ha dejado de ser una ciencia puramente descriptiva para convertirse en una herramienta estratégica para el desarrollo sostenible. Desde la producción de fármacos vegetales hasta la restauración ecológica y la bioeconomía circular, las aplicaciones de la botánica están transformando sectores clave en la sociedad moderna. Este capítulo final explora cómo el conocimiento vegetal impulsa soluciones científicas y tecnológicas orientadas a la sostenibilidad, integrando saberes ancestrales, avances moleculares y desafíos globales.

El valor de la botánica aplicada radica en su capacidad para articular múltiples escalas de acción: desde el estudio celular de metabolitos secundarios hasta el diseño de sistemas agroecológicos resilientes y políticas públicas de conservación. Al promover un enfoque integrador entre ciencia, cultura y territorio, esta disciplina permite repensar la relación entre el ser humano y la naturaleza. Comprender cómo las plantas contribuyen activamente al bienestar humano, la mitigación del cambio climático, la recuperación de ecosistemas y la generación de alternativas

productivas sostenibles es esencial para formar profesionales comprometidos con un futuro socialmente justo y ecológicamente equilibrado. Este capítulo invita a explorar las múltiples formas en que la botánica puede convertirse en una ciencia al servicio de la vida.

Esquema del capítulo

1. Botánica y salud humana
2. Botánica y seguridad alimentaria
3. Botánica y conservación ecológica
4. Botánica y cambio climático

Preguntas guía

- ¿Qué aportes concretos hace la botánica a los Objetivos de Desarrollo Sostenible?
- ¿Cómo contribuyen las plantas medicinales y alimenticias al bienestar de las poblaciones vulnerables?
- ¿De qué manera las investigaciones botánicas ayudan a restaurar ecosistemas degradados y mitigar el cambio climático?
- ¿Qué oportunidades abre la biotecnología vegetal en la generación de productos verdes?

Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

- Analizar el impacto de la botánica aplicada en la salud humana, evaluando el rol de los metabolitos secundarios, la fitoterapia y la etnobotánica en el descubrimiento y desarrollo de fármacos.
- Evaluar el uso de la diversidad vegetal y el mejoramiento genético como herramientas estratégicas para garantizar la seguridad alimentaria, la biofortificación de cultivos y la resiliencia de los sistemas agrícolas.
- Integrar los principios de la botánica en el diseño de estrategias de conservación ecológica y restauración de ecosistemas, valorando el papel de los jardines botánicos y los conocimientos bioculturales.
- Diseñar propuestas de base botánica para la mitigación y adaptación al cambio climático, aplicando conceptos como la captura de carbono, la fitorremediación y el modelado de distribución de especies

Competencias esperadas

- Aplica el conocimiento botánico en escenarios interdisciplinarios.
- Interpreta evidencias científicas que vinculan a las plantas con la salud humana y ambiental.
- Plantea propuestas éticas y sostenibles basadas en el uso de recursos vegetales.
- Comunica de manera argumentada el valor estratégico de la flora en contextos locales y globales.

Cita motivadora o desafío global

“Las plantas constituyen el fundamento de la vida en la Tierra. Preservarlas y comprenderlas no es solo un deber científico, sino un acto urgente de responsabilidad hacia el futuro de la humanidad.”– Antonelli et al. (2020)

4.1 Botánica y salud humana

Desde tiempos remotos, las plantas han constituido la base del tratamiento de enfermedades, proporcionando compuestos activos que inspiran medicamentos modernos y prácticas terapéuticas. La botánica médica es una disciplina que vincula la sistemática vegetal, la fisiología y la fitoquímica con la salud humana, permitiendo identificar, analizar y utilizar especies vegetales con propiedades bioactivas. En la actualidad, el 25 % de los fármacos prescritos en el mundo proviene directa o indirectamente de fuentes vegetales (Newman & Cragg, 2020).

4.1.1 Fármacos derivados de plantas

Muchas sustancias de origen vegetal han sido fundamentales en el desarrollo de la farmacología moderna. A continuación, se presentan ejemplos destacados:

Fármaco	Planta fuente	Aplicación médica
Morfina	<i>Papaver somniferum</i>	Analgésico opiáceo
Paclitaxel	<i>Taxus brevifolia</i>	Quimioterapia (cáncer)
Artemisinina	<i>Artemisia annua</i>	Tratamiento de malaria
Digoxina	<i>Digitalis purpurea</i>	Insuficiencia cardíaca
Ácido acetilsalicílico	<i>Salix alba</i> (precursor: salicina)	Antiinflamatorio, analgésico

El estudio etnobotánico ha sido clave en la identificación de nuevas especies medicinales, combinando conocimientos ancestrales con validación científica (Powers, R. 2014).

4.1.2 Fitoterapia y medicina tradicional

La fitoterapia es el uso racional de extractos y principios activos de plantas para la prevención o tratamiento de enfermedades. Según la OMS (2023), el 80 % de la población mundial recurre a la medicina tradicional como recurso primario de atención sanitaria. En América Latina, especies como *Uncaria tomentosa* (uña de gato), *Baccharis trimera* (carqueja) y *Mimosa tenuiflora* (tepezcohuite) son utilizadas para tratar inflamaciones, trastornos digestivos y lesiones cutáneas, respectivamente.

Nota destacada: La integración de la fitoterapia en sistemas de salud exige criterios de seguridad, estandarización y evidencia clínica para garantizar su uso efectivo y ético (WHO, 2013).

4.1.3 Metabolitos secundarios: moléculas bioactivas

Las plantas sintetizan una amplia variedad de metabolitos secundarios (alcaloides, flavonoides, terpenos, fenoles, entre otros) con efectos farmacológicos comprobados:

Tabla 1. Metabolitos secundarios con acción terapéutica.

Tipo de compuesto	Acción terapéutica	Ejemplo
Alcaloides	Neuroactiva, antitumoral	Vinblastina (<i>Catharanthus roseus</i>)
Flavonoides	Antioxidante, antiinflamatoria	Quercetina (<i>Allium cepa</i>)
Terpenos	Antimicrobiana, anticancerígena	Limoneno (<i>Citrus spp.</i>)
Taninos	Astringente, antidiarreico	Ácido gálico (<i>Hamamelis virginiana</i>)

Fuente: Bhatti et al., 2022.

Investigaciones recientes también destacan el uso de metabolómica vegetal para descubrir nuevos

principios activos y comprender sus rutas biosintéticas (Hall, 2021).

4.1.4 Ejemplos de investigación aplicada

1. **Estudio clínico con extracto de *Curcuma longa*:** Efecto antiinflamatorio comparable al ibuprofeno en artritis leve (Jurenka, 2009).
2. **Nanopartículas vegetales en medicina:** Uso de *Camellia sinensis* para biosíntesis de nanopartículas con actividad antibacteriana (Singh et al., 2023).
3. **Identificación de nuevos antitumorales:** Screening de metabolitos en *Tabebuia spp.* mostró actividad prometedora contra células de cáncer de mama (Topalović et al., 2024).

Preguntas de reflexión

1. ¿Qué ventajas y riesgos implica el uso de plantas medicinales sin validación científica?
2. ¿Cómo puede la botánica contribuir a reducir la dependencia de medicamentos sintéticos?
3. ¿Qué desafíos éticos plantea el aprovechamiento industrial de conocimientos tradicionales?

Actividad aplicada

Tarea de campo o revisión documental

Selecciona una planta medicinal de uso tradicional en tu región. Realiza una ficha que contenga:

- Nombre científico y común.
- Parte utilizada y forma de preparación.
- Principios activos conocidos.
- Evidencia científica de eficacia o toxicidad.
- Posible aplicación en la salud pública o farmacia natural

4.2 Botánica y seguridad alimentaria

La seguridad alimentaria, definida por la FAO como el acceso físico, social y económico a alimentos inocuos y nutritivos para todos en todo momento, depende en gran medida del conocimiento y uso sostenible de los recursos vegetales. La botánica juega un papel esencial en la identificación, domesticación, conservación y mejoramiento de especies vegetales, contribuyendo a enfrentar los retos del hambre, la desnutrición, el cambio climático y la pérdida de diversidad agrícola (FAO, 2021; Antonelli et al., 2020).

4.2.1 Cultivos nativos y biodiversidad agrícola

Los cultivos tradicionales o subutilizados, también llamados “especies huérfanas”, representan una fuente invaluable de nutrientes, adaptación ecológica y resistencia genética. Su aprovechamiento puede diversificar la dieta, mejorar la salud y fortalecer la soberanía alimentaria.

Tabla 2. Biodiversidad agrícola.

Cultivo nativo	Región	Potencial nutricional
Quinua (<i>Chenopodium quinoa</i>)	Andes	Alta en proteínas, aminoácidos esenciales
Moringa (<i>Moringa oleifera</i>)	África/Asia	Vitaminas A y C, calcio, hierro
Amaranto (<i>Amaranthus spp.</i>)	Mesoamérica	Proteína, calcio, lisina
Name (<i>Dioscorea spp.</i>)	África tropical	Fuente de carbohidratos complejos
Baobab (<i>Adansonia digitata</i>)	África subsahariana	Vitamina C, antioxidantes

Fuente: Murthy et al., 2020.

Nota destacada: La revalorización de estos cultivos requiere esfuerzos en conservación, promoción de mercados locales y políticas alimentarias sostenibles (Padulosi et al., 2013).

4.2.2 Mejoramiento genético y biofortificación

El mejoramiento vegetal busca incrementar la productividad, resistencia al estrés y valor nutricional de los cultivos. Existen múltiples estrategias:

- **Hibridación convencional:** cruzamiento selectivo.
- **Mutagénesis inducida:** generación de variabilidad genética.
- **Ingeniería genética y CRISPR-Cas9:** edición de genes específicos.
- **Biofortificación:** enriquecimiento nutricional de cultivos (e.g., arroz dorado con provitamina A, camote biofortificado con betacaroteno).

Ejemplo: El frijol biofortificado desarrollado por CIAT contiene hasta 80 % más hierro, contribuyendo a reducir la anemia infantil en comunidades rurales (Bouis & Welch., 2007).

4.2.3 Plantas y resiliencia climática

Las plantas juegan un rol estratégico en la resiliencia agrícola frente a fenómenos climáticos extremos como sequías, heladas, inundaciones o salinidad de suelos. Mediante la selección y domesticación de variedades resistentes, así como el rescate de especies adaptadas a ambientes extremos, es posible construir sistemas de producción más estables.

Ejemplo: *Eragrostis tef*, un cereal etíope tolerante a la sequía, está siendo promovido como cultivo emergente para zonas áridas debido a su valor nutricional y adaptabilidad (Gebremedhin et al., 2025).

Preguntas de reflexión

1. ¿Cómo contribuye la biodiversidad vegetal a una dieta saludable y sostenible?
2. ¿Qué desafíos técnicos y sociales plantea la implementación de cultivos biofortificados?
3. ¿Qué papel juegan los saberes ancestrales en la conservación de cultivos tradicionales?

Actividad aplicada

Investigación de caso local:

- Elige un cultivo nativo o subutilizado de tu región.
- Investiga su valor nutricional, situación agronómica y aceptación cultural.
- Propón una estrategia para su revalorización como parte de la seguridad alimentaria comunitaria.

4.3 Botánica y conservación ecológica

La pérdida acelerada de biodiversidad vegetal representa una amenaza directa para el equilibrio ecológico, la seguridad alimentaria y la estabilidad de los sistemas socioambientales. La botánica de la conservación es la disciplina encargada de estudiar, proteger y restaurar la diversidad vegetal, con el fin de asegurar su persistencia funcional y evolutiva. Su enfoque va más allá de la preservación de especies: integra conocimientos taxonómicos, ecológicos, genéticos y etnobotánicos para tomar decisiones informadas sobre el manejo de ecosistemas y recursos naturales (Mace et al., 2008; Antonelli et al., 2020).

4.3.1 Restauración ecológica y resiliencia vegetal

La restauración de ecosistemas degradados es una prioridad global, y las plantas son sus principales agentes. Para que estos procesos sean exitosos, es necesario:

- Identificar especies nativas clave (estructurales, funcionales y simbióticas).
- Evaluar la capacidad de regeneración natural.
- Considerar el contexto ecológico y sociocultural.

Ejemplo: En bosques secos del sur del Ecuador, especies como *Ceiba trischistandra* y *Bursera graveolens* se utilizan para reforestar áreas afectadas por tala y ganadería, debido a su resistencia y valor simbólico (Escribano et al., 2016).



Ilustración 1. *Ceiba trischistandra*

Fuente: los autores

4.3.2 Jardines botánicos y bancos de germoplasma

Los jardines botánicos y bancos de semillas cumplen un papel esencial en la conservación ex situ:

- Mantienen colecciones vivas de especies amenazadas.
- Realizan investigaciones sobre fenología, propagación y adaptación.

- Promueven educación ambiental y participación ciudadana.
- Respaldan programas de reintroducción y restauración.

Ejemplo destacado: El Banco Mundial de Semillas de Svalbard, en Noruega, alberga más de un millón de muestras genéticas de cultivos del mundo, funcionando como un “arca de Noé vegetal” ante catástrofes (Asdal., 2025).



Ilustración 2. El Banco Mundial de Semillas de Svalbard, en Noruega.

Fuente: Asdal., 2025.

4.3.3 Lista roja de especies y riesgo de extinción

La Lista Roja de la UICN es el sistema de referencia para evaluar el riesgo de extinción de especies. Entre los principales criterios utilizados están:

- Tamaño y tendencia de la población.
- Distribución geográfica.
- Fragmentación del hábitat.
- Presiones antrópicas.

Según BGCI (2020), el 40 % de las especies vegetales están en riesgo de extinción, muchas sin haber sido descritas formalmente. En América Latina, la expansión agrícola, la minería y el cambio climático son los principales motores de pérdida vegetal.

4.3.4 Botánica para la conservación biocultural

La conservación ecológica debe considerar no solo la diversidad biológica, sino también el conocimiento tradicional asociado. La conservación biocultural:

- Reconoce el rol de pueblos indígenas y comunidades locales en el manejo sostenible de especies.

- Rescata saberes sobre usos medicinales, alimentarios y ceremoniales.
- Fomenta procesos participativos en áreas protegidas y planes de manejo.

Nota destacada: Muchas especies silvestres útiles carecen de protección formal, pese a su alto valor cultural y ecológico (Díaz-Reviriego et al., 2019).

Preguntas de reflexión

1. ¿Cómo puede la botánica integrarse a políticas públicas de conservación?
2. ¿Qué ventajas ofrece la conservación ex situ frente a la conservación in situ?
3. ¿Por qué es esencial proteger el conocimiento tradicional asociado a la biodiversidad vegetal?

Actividad aplicada

Análisis de caso de conservación local:

- Investiga una especie vegetal en peligro en tu región.
- Describe sus características ecológicas, amenazas actuales y esfuerzos de conservación existentes.

- Propón estrategias desde la botánica (propagación, restauración, sensibilización) para su recuperación

4.4 Botánica y cambio climático

Introducción

El cambio climático es uno de los mayores desafíos de la humanidad en el siglo XXI, con consecuencias directas sobre los ecosistemas, la biodiversidad y la salud humana. La botánica, a través del estudio de las plantas y su interacción con el ambiente, es esencial para comprender los efectos del calentamiento global y para diseñar soluciones basadas en la naturaleza. Las plantas cumplen funciones clave en la regulación del ciclo del carbono, la adaptación de los agroecosistemas, y la mitigación de impactos ecológicos (IPCC, 2022).

4.4.1 Captura de carbono y vegetación terrestre

Las plantas absorben CO₂ atmosférico durante la fotosíntesis, funcionando como sumideros de carbono. Se estima que la vegetación terrestre capta alrededor del 30 % de las emisiones antropogénicas de CO₂, lo cual mitiga el avance del cambio climático (Pan et al., 2011).

Estrategias vegetales de captura de carbono:

- Reforestación y conservación de bosques.
- Agroforestería y sistemas silvopastoriles.
- Uso de cultivos perennes y cobertura vegetal.
- Restauración de humedales y manglares.

Ejemplo: Los manglares pueden almacenar hasta 1,000 toneladas de carbono por hectárea en su biomasa y suelos, convirtiéndose en ecosistemas altamente eficaces para mitigación climática (Donato et al., 2011).

4.4.2 Fitorremediación y descontaminación ambiental

La fitorremediación es el uso de plantas para remover, estabilizar o degradar contaminantes del suelo, agua y aire. Su utilidad se potencia en contextos de cambio climático, donde la degradación ambiental se agrava (Pulford & Watson., 2003).

Aplicaciones comunes:

- Fitoextracción de metales pesados (*Brassica juncea* para plomo y cadmio).

- Fitorrizodegradación de hidrocarburos (por rizobacterias asociadas).
- Fitofiltración de aguas residuales (*Eichhornia crassipes*).
- Bioindicadores de contaminación atmosférica (líquenes y musgos).

Nota destacada: La fitorremediación combina eficiencia ecológica, bajo costo y aplicabilidad local, alineándose con enfoques de desarrollo sostenible.

4.4.3 Cambios en la distribución de especies

El aumento de temperaturas y la alteración de los regímenes de precipitación están desplazando la distribución geográfica de muchas especies vegetales. Algunas migran hacia mayores altitudes o latitudes, mientras otras enfrentan el riesgo de extinción por incapacidad de adaptación o dispersión (Corlett & Westcott, 2013).

Modelos de distribución de especies (SDM) se utilizan para predecir escenarios futuros bajo distintas trayectorias climáticas, lo que permite:

- Priorizar áreas de conservación.
- Identificar especies vulnerables.
- Diseñar corredores ecológicos.

4.4.4 Adaptación de cultivos y resiliencia vegetal

El cambio climático impone desafíos a la agricultura, como estrés térmico, hídrico, salinidad y proliferación de plagas. La botánica ofrece herramientas para fortalecer la resiliencia de cultivos, como:

- Domesticación de especies tolerantes (*Setaria italica*, *Sorghum bicolor*).
- Uso de variedades adaptadas localmente.
- Conservación de semillas nativas.
- Manipulación genética para resistencia a estrés (CRISPR, marcadores moleculares).

Ejemplo: La tolerancia a calor en trigo ha sido mejorada mediante la selección asistida por marcadores del gen *HSP17*, asociado a proteínas de choque térmico (Bita & Gerats, 2013).

Preguntas de reflexión

1. ¿Qué papel juegan las plantas en la regulación climática del planeta?
2. ¿Cómo pueden los modelos de distribución vegetal apoyar la planificación ecológica frente al cambio climático?

3. ¿Qué riesgos conlleva depender exclusivamente de soluciones biotecnológicas en la agricultura climáticamente resiliente?

Actividad aplicada

Simulación de impacto climático:

- Utiliza una base de datos climáticos (WorldClim, GBIF o ClimateToolbox).
- Elige una especie vegetal nativa y modela su distribución actual y proyectada para 2050.
- Analiza los cambios esperados y propón medidas de conservación o uso sostenible en función del resultado.

Elementos de cierre - Capítulo 4

Resumen del capítulo

Este capítulo ha demostrado cómo la botánica trasciende el ámbito teórico y se proyecta como una ciencia fundamental para afrontar los desafíos sociales, ambientales y sanitarios del presente. En primer lugar, se exploraron las contribuciones de las plantas a la salud humana mediante metabolitos bioactivos, fitoterapia y producción farmacéutica. Luego, se analizó su rol en la seguridad alimentaria, a través del rescate de cultivos nativos, la biofortificación y la resiliencia

agrícola. También se abordó la conservación ecológica desde una perspectiva biocultural, destacando estrategias in situ y ex situ. Finalmente, se discutió cómo las plantas actúan como sumideros de carbono, bioindicadores y agentes de fitorremediación frente al cambio climático. Este enfoque integrador evidencia que la botánica aplicada es una aliada clave para construir un futuro más justo, saludable y sostenible.

Preguntas de revisión

1. ¿Cuáles son los principales compuestos vegetales utilizados en medicina moderna y qué plantas los producen?
2. ¿Qué beneficios ofrecen los cultivos nativos frente a los cultivos altamente industrializados?
3. ¿Cómo contribuyen los jardines botánicos a la conservación ex situ?
4. ¿Qué métodos vegetales se utilizan en la fitorremediación de suelos contaminados?
5. ¿Qué implicaciones tiene el desplazamiento de especies vegetales ante el cambio climático?

Ejercicios aplicados

Ejercicio 1: Análisis interdisciplinario

Elige una especie vegetal con aplicaciones en salud, alimentación o conservación. Describe:

- Su distribución geográfica.
- Usos tradicionales y modernos.
- Estado de conservación.
- Propuesta para su aprovechamiento sostenible desde la botánica aplicada.

Ejercicio 2: Proyecto de aula

Diseña una estrategia educativa para sensibilizar a tu comunidad sobre la importancia de las plantas en la mitigación del cambio climático. Incluye:

- Objetivos y públicos meta.
- Actividades (talleres, huertos, exposiciones).
- Indicadores de impacto.

Autoevaluación

Marca con una ✓ lo que consideres verdadero para ti:

Ítem	Sí	No	Parcialmente
Comprendo cómo los compuestos vegetales pueden			

convertirse en medicamentos.			
Reconozco al menos tres cultivos nativos con alto valor nutricional.			
Identifico estrategias de conservación vegetal que involucran a la sociedad.			
Conozco ejemplos de plantas utilizadas para fitorremediar suelos contaminados.			
Puedo proponer una acción concreta desde la botánica frente al cambio climático.			

Reflexión final del libro

“La botánica no solo estudia la vida de las plantas, sino que ofrece claves para preservar la nuestra. En un mundo fragmentado por crisis múltiples, comprender y valorar la inteligencia vegetal nos permite sembrar futuro con raíces profundas en la sostenibilidad.”

Este libro concluye con un llamado al compromiso: como estudiantes y futuros

Botánica Integral: Aplicaciones en farmacología, ecología y
biotecnología

profesionales de las ciencias de la vida, somos responsables de integrar el conocimiento botánico a la toma de decisiones que impactan la salud, la alimentación, los ecosistemas y la equidad. La botánica aplicada no es una opción académica, sino una necesidad ética y científica en la construcción de un mundo habitable para todas las formas de vida.

Referencias bibliográficas

- Antonelli, A., Smith, R. J., Fry, C., Simmonds, M. S. J., Kersey, P. J., Pritchard, H., ... Willis, K. J. (2020). *State of the world's plants and fungi 2020*. Royal Botanic Gardens, Kew. <https://doi.org/10.34885/172>
- Asdal, Å. (2025). The Svalbard Global Seed Vault – conserving plant genetic resources for European and global food security. *Genetic Resources*, (S2), 49–57. <https://doi.org/10.46265/genresj.EBBB2856>
- BGCI. (2020). *State of the world's plants and fungi 2020*. Botanic Gardens Conservation International. <https://www.bgci.org/>
- Bitá, C. E., & Gerats, T. (2013). Plant tolerance to high temperature in a changing environment: Scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. *Frontiers in Plant Science*, 4, 273. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00273>
- Bhatti, M. Z., Ismail, H., & Kayani, W. K. (2022). Plant secondary metabolites: Therapeutic potential and pharmacological properties. En *Secondary metabolites - trends and reviews* (capítulo). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.103698>

- Bouis, H. E., & Welch, R. M. (2007). HarvestPlus: Breeding crops for better nutrition. *Crop Science*, 47(S3), S88-S105.
<https://doi.org/10.2135/cropsci2007.09.020IPBS>
- Corlett, R. T., & Westcott, D. A. (2013). Will plant movements keep up with climate change? *Trends in Ecology & Evolution*, 28(8), 482-488.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2013.04.003>
- Díaz-Reviriego, I., Turnhout, E., & García-Llorente, M. (2019). Conservation of biocultural diversity in practice. *Conservation Biology*, 33(3), 634-645.
<https://doi.org/10.1111/cobi.13277>
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293-297.
<https://doi.org/10.1038/ngeo1123>
- Escribano-Ávila, G. (2016). El bosque seco neotropical de la provincia ecuatoriana: Un pequeño gran desconocido. *Ecosistemas*, 25(2), 1-4.
<https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-2.01>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *The state of food security and nutrition in the world 2021*. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb4474en>
- Gebremedhin, H., & Abraha, A. (2025). Teff: A healthy crop of the century - Challenges and opportunities for enhancing productivity under climate change. *Discover Agriculture*, 3, Article 31. <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00179-7>
- Hall, R. D. (2021). Plant metabolomics: From holistic hope, to hype, to hot topic. *New Phytologist*, 229(4), 1763-1780. <https://doi.org/10.1111/nph.16954>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the IPCC*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- Jurenka, J. S. (2009). Anti-inflammatory properties of curcumin, a major constituent of *Curcuma longa*: A review of preclinical and clinical research. *Alternative Medicine Review*, 14(2), 141-153.

- Mace, G. M., Collar, N. J., Gaston, K. J., Hilton-Taylor, C., Akçakaya, H. R., Leader-Williams, N., ... Milner-Gulland, E. J. (2008). Quantification of extinction risk: IUCN's system for classifying threatened species. *Conservation Biology*, 22(6), 1424-1442. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.01044.x>
- Murthy, N., Anand, S. R., & Prithviraj, S. K. (2020). Underutilized potential crops for food and nutritional security under changing climate. *Mysore Journal of Agricultural Sciences*, 54(1), 1-14.
- Newman, D. J., & Cragg, G. M. (2020). Natural products as sources of new drugs over the nearly four decades from 1981 to 2019. *Journal of Natural Products*, 83(3), 770-803. <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.9b01285>
- Padulosi, S., Thompson, J., & Rudebjer, P. (2013). *Fighting poverty, hunger and malnutrition with neglected and underutilized species (NUS): Needs, challenges and the way forward*. Bioversity International.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., ... Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045),

988-993.

<https://doi.org/10.1126/science.1201609>

Powers, R. (2014). The current state of drug discovery and a potential role for NMR metabolomics. *Journal of Medicinal Chemistry*, 57(14), 5860-5870.
<https://doi.org/10.1021/jm401803b>

Pulford, I. D., & Watson, C. (2003). Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees: A review. *Environment International*, 29(4), 529-540.
[https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00152-6](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00152-6)

Singh, P., Kumar, P., & Bhankar, V. (2023). Plant-mediated synthesis of nanoparticles and their applications. *Materials Research Bulletin*, 161, 112097.
<https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2023.112097>

Topalović, D., Živković, L., Borozan, S., Santibanez, J. F., & Spremo-Potparević, B. (2024). An *in vitro* evaluation of the cytotoxic potential of medicinal mushrooms against human breast cancer cell lines. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, 75(4), 297-302. <https://doi.org/10.2478/aiht-2024-75-3915>

World Health Organization. (2013). *WHO traditional medicine strategy: 2014-2023*.
World Health Organization.
<https://apps.who.int/iris/handle/10665/92455>



El BQF. Cristhian Arturo Zambrano Cabrera, Mgtr. Magister en Biotecnología; Magister en Ingeniería Ambiental y Seguridad Industrial; Diplomado Superior en Docencia Universitaria. Docente de las carreras de Bioquímica y Farmacia, Ingeniería Química, Ingeniería en Alimentos. Es autor de varios artículos científicos con una amplia trayectoria en la enseñanza e investigación; aportando en el avance de conocimientos y en la formación de futuros profesionales.



El BQF. Luiggi Oscar Solano Maza, Mgs, Magíster en Análisis Biológico y Diagnóstico de Laboratorio, es Bioquímico Farmacéutico y docente en la Carrera de Bioquímica y Farmacia, con una destacada trayectoria en el campo de laboratorio clínico. Es autor de artículos científicos y ha participado como ponente en eventos nacionales e internacionales, contribuyendo al avance del conocimiento en su área y formando futuros profesionales en el ámbito de la salud.

ISBN: 978-9942-53-114-8



Compás
capacitación e investigación