

Manual del sistema agroforestal de cacao

AUTORES

Jairo **Rojas Molina**

Fabrizio Eulalio **Leite Carvalho**

Andrea Constanza **Montenegro**

Laura Dayana **Escobar Pachajoa**

Eliana Yadira **Báez Daza**

Genaro Andrés **Agúdelo Castañeda**

Felipe **Montealegre Bustos**

**FUNDO
AMBIENTAL**

AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria


Agricultura





Manual del sistema agroforestal de cacao

AUTORES

Jairo **Rojas Molina**

Fabricio Eulalio **Leite Carvalho**

Andrea Constanza **Montenegro**

Laura Dayana **Escobar Pachajoa**

Eliana Yadira **Báez Daza**

Genaro Andrés **Agudelo Castañeda**

Felipe **Montealegre Bustos**

**FUNDO
AMBIENTAL**

AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria


Agricultura

Manual del sistema agroforestal de cacao. / Jairo Rojas Molina [y otros seis] – Mosquera, (Colombia): AGROSAVIA, 2025.

104 páginas (Colección Alianzas AGROSAVIA)

Incluye referencias bibliográficas, ilustraciones y gráficos.

ISBN e-Book: 978-958-740-839-3

1. *Theobroma cacao* 2. Sistema agroforestal 3. Árbol forestal 4. Agricultura sostenible
5. Bioprospección 6. Cambio climático 7. Costos de producción

Palabras clave normalizadas según Tesauro Multilingüe de Agricultura -Agrovoc
Catalogación en la publicación – Biblioteca Agropecuaria de Colombia

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA

Centro de Investigación Tibaitatá. Kilómetro 14 vía Mosquera-Bogotá, Mosquera.
Código postal 250047, Colombia.

Centro de Investigación La Suiza. Kilómetro 32 vía al mar, vereda Galápagos, Rionegro-Santander.
Código postal 687511, Colombia

Esta publicación es resultado del convenio “Mejora de la sostenibilidad ambiental mediante implementación de tecnologías en el marco de la estrategia nacional para el cultivo del cacao”, Convenio 2035, entre el Fondo Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente y Acción Climática de Portugal y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA.

Colección: Alianzas AGROSAVIA
Tipología: Manual

Fecha de recepción: 29/04/2025
Fecha de evaluación: 15/05/2025
Fecha de aceptación: 29/05/2025

Publicado: septiembre de 2025

Preparación editorial
Editorial AGROSAVIA
editorial@agrosavia.co
Dirección editorial: Astrid Verónica Bermúdez Díaz
Editora: Nathalie De la Cuadra N.
Corrección de estilo: Andrés Castillo Brieve
Ilustraciones: Juan Felipe Martínez Tirado
Diseño de pauta: Janduy Barreto Páez
Diagramación: María Paula Berón
Fotos: Genaro Andrés Agudelo Castañeda,
Diomedes de Jesús Díaz,
Laura Dayana Escobar Pachajoa

Citación sugerida:

Rojas Molina, J., Leite Carvalho, F. E., Montenegro, A. C., Escobar Pachajoa, L. D., Báez Daza, E. Y., Agudelo Castañeda, G. A., & Montealegre Bustos, F. (2025). *Manual del sistema agroforestal de cacao*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7408393>

Cláusula de responsabilidad:

AGROSAVIA no es responsable de las opiniones y de la información recogida en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido ya sea este propio o de terceros, declarando en este último supuesto que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación. Igualmente, expresan que no existe conflicto de interés alguno, en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa, o penalmente frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros, relativa a los derechos de autor u otros derechos que se vulnere como resultado de su contribución.

Línea de atención al cliente: 01 8000 121515
atencionalcliente@agrosavia.co
<https://www.agrosavia.co/>



https://co.creativecommons.org/?page_id=13

Contenido

	Agradecimientos	8
	Autores	9
	Introducción	15
1	¿Qué es un sistema agroforestal?	19
2	Bases fisiológicas de los sistemas agroforestales	23
3	Variedades de cacao utilizadas en el modelo AGROSAVIA de sistemas agroforestales.....	29
	Manejo agronómico de las variedades.....	31
4	Especies forestales con potencial asocio en SAF de cacao.....	37
	Abarco (<i>Cariniana pyriformis</i> Miers).....	40
	Caoba (<i>Swietenia macrophylla</i> King)	48
	Cedro (<i>Cedrela odorata</i> L.)	53
	Roble (<i>Tabebuia rosea</i> [Bertol.] Bertero ex A. DC.).....	58
	Nogal cafetero (<i>Cordia alliodora</i> [Ruiz & Pav.] Oken).....	62

5 	Sistemas agroforestales: aplicaciones en bioprospección y fitorremediación para una agricultura sostenible.....	67
	Bioprospección	68
	Producción de compuestos químicos en SAF	69
	Beneficios de la producción de compuestos químicos en sistemas agroforestales	71
	Fitorremediación	72
	Casos de estudio	74
	Integración de bioprospección y fitorremediación en SAF	75
	Retos y oportunidades	75
	Conclusiones	75
 6 	 Incidencia del cambio climático en los costos de producción del SAF de cacao.....	 77
	Recomendaciones para La Niña	81
	Recomendaciones para El Niño	84
	Referencias	87

Lista de figuras

Figura 1	Planta de cacao (<i>Theobroma cacao</i>) afectada por exceso de luz, municipio de El Carmen de Chucurí, Santander	26
Figura 2	Genotipos de cacao de AGROSAVIA	32
Figura 3	Granos de cacao fermentados y secos de las variedades de cacao especiales de AGROSAVIA	35
Figura 4	Abarco (<i>Cariniana pyriformis</i>) en sistema agroforestal de cacao, municipio de Rionegro, Santander	40
Figura 5	Mapa de distribución del abarco (<i>Cariniana pyriformis</i>) en Colombia	42
Figura 6	Diseño de siembra con abarco (<i>Cariniana pyriformis</i>), modelo productivo para el cultivo de cacao (<i>Theobroma cacao</i>) en el departamento de Santander	45
Figura 7	Caoba (<i>Swietenia macrophylla</i>) en sistema agroforestal de cacao, municipio de San Vicente de Chucurí, Santander	48
Figura 8	Mapa de distribución de caoba (<i>Swietenia macrophylla</i>) en Colombia	50
Figura 9	Sistema agroforestal de cacao (<i>Theobroma cacao</i>) con cedro (<i>Cedrela odorata</i> L.), municipio de Convención, Norte de Santander	53
Figura 10	Mapa de la distribución del cedro (<i>Cedrela odorata</i>) en Colombia	55
Figura 11	Sistema agroforestal de cacao (<i>T. cacao</i>) con roble (<i>Tabebuia rosea</i>), municipio de Sardinata, Norte de Santander	58
Figura 12	Mapa de la distribución del roble (<i>Tabebuia rosea</i>) en Colombia.	60
Figura 13	Sistema agroforestal de cacao (<i>T. cacao</i>) con nogal cafetero (<i>Cordia alliodora</i>) en el Centro de Investigación El Nus	62

Figura 14	Mapa de distribución del nogal (<i>Cordia alliodora</i>) en Colombia	64
Figura 15	Mecanismos de fitorremediación	73
Figura 16	Composición de costos totales	78
Figura 17	La finca como una empresa	78
Figura 18	Incidencia en las labores del fenómeno de El Niño	79
Figura 19	Incidencia en las labores del fenómeno de La Niña	80
Figura 20	Establecimiento de drenajes	81
Figura 21	Mayor monitoreo de plagas y enfermedades	82
Figura 22	Manejo de arvenses	83
Figura 23	Establecimiento de riego	84
Figura 24	Construcción de reservorios	85
Figura 25	Establecimiento de SAF	86

Lista de tablas

Tabla 1	Principales características de productividad en las variedades de AGROSAVIA	31
Tabla 2	Intercompatibilidad sexual de las variedades de cacao recomendadas	33





Agradecimientos

La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA expresa su sincero agradecimiento al Fondo Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente y Acción Climática de Portugal por el valioso respaldo financiero, fundamental para la realización del proyecto “Mejora de la sostenibilidad ambiental mediante implementación de tecnologías en el marco de la estrategia nacional para el cultivo del cacao”. Asimismo, manifiesta un reconocimiento y agradecimiento a los productores de cacao que colaboraron activamente en este proyecto en municipios incluidos en los Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial (PDET) del Catatumbo (Convencion, Teorama, Tibú y Sardinata), en el departamento de Norte de Santander, Colombia.





Autores

Jairo Rojas Molina

Correo: jrojas@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3929-9487>

Ingeniero agrónomo de la Universidad del Tolima con maestría en Agroforestería Tropical del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), de Costa Rica, y candidato a doctor del programa de Ciencias Agrarias con énfasis en Fisiología de la Producción Vegetal de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL), sede Medellín. Trabaja como investigador máster sénior en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA desde 2007. Ha recibido entrenamiento en investigación en cacao, en el Centro de Investigación en Cacao (Ceplac), Estado de Bahía, Brasil. Se ha desempeñado como profesor en las maestrías de Sistemas Agroforestales de la Universidad de la Amazonia, la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA) y la Universidad de los Llanos. En cacao, ha trabajado con diseños de sistemas agroforestales, fertilidad en suelos, manejo de cultivos y determinación de servicios ecosistémicos para los sistemas agroforestales (carbono, biodiversidad, etc.). Ha participado en la construcción del modelo productivo de cacao Huila, modelo productivo de cacao Santander y modelo productivo de cacao Boyacá, y publicado en las revistas internacionales *Crop Protection*, *Plant Disease*, *Environmental and Experimental Botany*, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *Floresta e Ambiente*, *Tropical and Subtropical Agroecosystems* y *Frontiers in Plant Science*. También ha publicado en las revistas nacionales *Agronomía Colombiana*, *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, *Acta Agronómica* y *Revista de Ciencias Agrícolas*, entre otras, sobre temas relacionados con el cultivo de cacao. Está vinculado a la Red de Cacao y trabaja en el Centro de Investigación La Suiza de AGROSAVIA, en Rionegro, Santander.



Fabrizio Eulalio Leite Carvalho

Correo: fcarvalho@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7815-0082>

Biólogo con maestría y doctorado en Bioquímica Vegetal de la Universidad Federal de Ceará (Brasil), donde ha trabajado en fisiología vegetal y mecanismos de respuesta de plantas a estreses abióticos. Realizó una pasantía doctoral en la Queen Mary University of London (Reino Unido), donde profundizó en técnicas de evaluación de la fotosíntesis y estrés lumínico. Desde 2021, es investigador PhD asociado a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, con sede en el Centro de Investigación La Suiza, donde apoya proyectos relacionados con la resiliencia de cultivos tropicales, especialmente cacao, frente a condiciones de estrés hídrico, metales pesados, y limitaciones nutricionales. Su trabajo integra enfoques ecofisiológicos y biotecnológicos, con énfasis en la sostenibilidad de los sistemas productivos y el aprovechamiento eficiente de recursos locales. Cuenta con más de 1.500 citas académicas, un índice *h* de 24, y participa en comités editoriales de revistas como *Environmental and Experimental Botany* y *Frontiers in Plant Science*.



Andrea Constanza Montenegro

Correo: amontenegro@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2634-2151>

Química de la Universidad de Nariño y doctora en Ciencias Químicas de la Universidad de Buenos Aires, con énfasis en Química Inorgánica, Analítica y Física. Realizó una estancia posdoctoral en el Instituto de Investigaciones en Biociencias Agrícolas y Ambientales (INBA), donde trabajó en dinámica y movilidad de metales y metaloides (As, Pb, Cr, Cu) en suelos y matrices vegetales. Ha participado en entrenamientos en la Universidad de Florida (EE. UU.), en la parte de contaminantes y nanotecnología. Desde 2015 es investigadora PhD en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, en el Centro de Investigación Tibaitatá, donde lidera proyectos de investigación que incluyen estudios en inocuidad y calidad agroalimentaria, con enfoque en la detección de contaminantes químicos (Cd, As, Pb, Hg, Cr) y residuos de plaguicidas, y en la caracterización nutricional (vitamina C, polifenoles, micronutrientes, entre otros) de alimentos agrícolas y pecuarios (cacao, arroz, caña panelera, papa, hortalizas, leche). Tiene trayectoria en el uso de técnicas instrumentales avanzadas, incluidas ICP-OES, ICP-MS, AAS, HPLC-DAD/MS, GC-FID/MS, espectroscopía UV-Vis, FTIR, NIR, Raman, RMN, así como microscopía electrónica (SEM, TEM) y difracción de rayos X (XRD), herramientas que aplica a la investigación en química agrícola, ambiental y de alimentos. Su trabajo se extiende al área de bioprospección de metabolitos secundarios en especies vegetales con potencial bioactivo, y colabora con redes científicas nacionales e internacionales en temas estratégicos como seguridad alimentaria, sostenibilidad agroambiental y salud pública.

Laura Dayana Escobar Pachajoa

Correo: ldescobarp@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9825-461X>

Ingeniera agroforestal egresada de la Universidad de Nariño. Profesional de apoyo a la investigación en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, donde hace parte del grupo de investigación Raíces del Futuro-Manejo de Suelo, Agua y Planta. Formación académica orientada al desarrollo sostenible del sector agrícola, con enfoque en el estudio de los caracteres funcionales de las plantas y su papel en la respuesta al estrés, y en la provisión de servicios agroecosistémicos en un contexto de cambio climático. Desarrollo profesional en caracterización, establecimiento, manejo y evaluación de sistemas productivos que contribuyen al desarrollo de modelos agroforestales con un enfoque ambiental, sociocultural y económico, en pro del mejoramiento de la calidad de vida de los agricultores, el suministro de alimentos y la conservación de la biodiversidad.

Eliana Yadira Baez Daza

Correo: ebaez@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1059-1604>

Ingeniera agrónoma de la Universidad de Pamplona con maestría en Agroforestería Tropical con énfasis en Sistemas Agroforestales de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA), sede Bogotá. Cuenta con experiencia en manejo de recurso genético como curador del Banco de Germoplasma Vegetal (BGV) de la colección de cacao y caña panelera; caracterización morfológica de materiales; selección de materiales genéticos de cacao con requerimientos de producción, calidad y factores climáticos; manejo de cosecha y poscosecha de cacao; modelos agroforestales asociados a cacao con maderas finas tropicales, y manejo productivo del cultivo de cacao bajo SAF. Es autora de dos variedades de cacao Agrosavia TCS (*Theobroma* Corpoica La Suiza), ha publicado artículos científicos en revistas indexadas y es autora de diferentes publicaciones referentes a este cultivo. Actualmente se desempeña como investigadora máster vinculada a la Red de Cacao del Centro de Investigación La Suiza de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, en Rionegro, Santander.



Genaro Andrés Agudelo Castañeda

Correo: gagudelo@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0469-1406>

Ingeniero agrónomo con maestría en Fisiología Vegetal con énfasis en Ecofisiología de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). Cuenta con experiencia en la evaluación y selección de genotipos de cacao adaptados a diferentes condiciones agroecológicas, estrés abiótico en plantas, modelos agroforestales de cacao con maderas finas tropicales, manejo agronómico del cultivo de cacao bajo sistemas agroforestales, rehabilitación de cultivos improductivos, manejo de viveros y producción de material vegetal para el establecimiento de nuevos cultivos. Es autor de cuatro variedades de cacao de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, y ha publicado artículos científicos en revistas indexadas, videos, pódcast, manuales y libros con resultados de investigación relacionados con el cultivo de cacao. Actualmente, se desempeña como investigador máster asociado, vinculado a la Red de Cacao en el Centro de Investigación La Suiza de AGROSAVIA, en Rionegro, Santander.

Felipe Montealegre Bustos

Correo: fmontealegre@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7757-6508>

Economista de la Universidad del Tolima y magíster en Economía de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente de la Universidad de Concepción, Chile. Cuenta con una sólida fundamentación teórico-práctica en investigación económica, especialmente en el área socioeconómica, economía ambiental, economía de recursos naturales y valoración económica. En Chile y Colombia se ha desempeñado como docente en varias universidades e investigador en proyectos financiados por entidades públicas y privadas de los órdenes nacional e internacional. Desde 2018 hace parte del equipo de investigadores de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, en el Centro de Investigación La Suiza, donde forma parte de la Red de Cacao y participa en procesos de investigación relacionados con cultivos como cacao, frutales y agricultura familiar.





Introducción

Los sistemas agroforestales (SAF) representan una estrategia clave para el desarrollo sostenible del sector cacaotero, al combinar la producción agrícola con la conservación del medioambiente. Este manual ofrece una guía integral sobre el establecimiento y manejo de los SAF de cacao, y en él se destaca su impacto en la productividad, la biodiversidad y la resiliencia ante el cambio climático.

En el capítulo I, se introducen los conceptos básicos de los SAF y su importancia en la producción sostenible. El capítulo II profundiza en las bases fisiológicas que rigen la interacción entre el cacao y las especies acompañantes dentro del SAF. Posteriormente, el capítulo III presenta las variedades de cacao utilizadas en el modelo de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, junto con su manejo agronómico para optimizar el rendimiento y la calidad del cultivo.

El capítulo IV explora las especies asociadas que complementan la producción de cacao en los SAF, y promueve la diversificación y estabilidad del sistema. En el capítulo V, se abordan innovaciones en bioprospección y fitorremediación, y se destaca el potencial de los SAF en la generación de compuestos bioactivos y su capacidad para mejorar la calidad del suelo y el ambiente. Finalmente, el capítulo VI analiza el impacto del cambio climático en los costos de producción del cacao dentro de los SAF, y propone estrategias de mitigación y adaptación.

Este manual está dirigido a productores, investigadores, técnicos y tomadores de decisiones interesados en mejorar la sostenibilidad y rentabilidad del cultivo de cacao a través de enfoques agroforestales innovadores. Con un enfoque basado en la ciencia y la experiencia en campo, busca fomentar prácticas agrícolas que garanticen la conservación de los recursos naturales y el bienestar de los productores.









Capítulo I



¿Qué es un sistema agroforestal?

Los SAF son una integración intencionada de árboles o arbustos con cultivos o ganado a escala de parcela, finca o paisaje. Constituyen una estrategia potencial de adaptación al cambio climático para aumentar la resiliencia de los agricultores y los sistemas agrícolas, al proporcionar una serie de beneficios biofísicos y socioeconómicos (Quandt et al., 2023). A medida que aumenta la variabilidad climática y los fenómenos meteorológicos extremos son más frecuentes y graves, es necesario determinar opciones de adaptación para ayudar a los más vulnerables a mitigar sus efectos (Lasco et al., 2014).

La agroforestería presenta sinergias con la reducción del cambio climático mediante el secuestro de carbono, la mejora de la seguridad alimentaria, las oportunidades de ingresos, la prestación de servicios ecosistémicos y la conservación de la biodiversidad (Oliver et al., 2024). El diseño del sistema agroforestal puede adaptarse para satisfacer las necesidades y los objetivos específicos de los agricultores, al proporcionar fuentes adicionales de ingresos, mejorar la seguridad alimentaria o aumentar la resistencia a las variaciones del clima y el mercado (Oliver et al., 2024). En el caso de los SAF de cacao, los objetivos principales son mejorar la producción mediante variedades de alta productividad y calidad; diversificar la producción con el uso de especies asociadas que presenten alto valor económico, y aprovechar la oferta ambiental de las zonas con el uso y la estructuración de diseños agroforestales para cada región (Jaimes Suárez et al., 2022b).

Los SAF pueden mejorar los medios de vida de los agricultores a través del autoconsumo de los subproductos del sistema como plátanos, naranjas y chontaduro. El problema surge a la hora de su evaluación, ya que los SAF se centran en los rendimientos del cacao sin la valoración de los rendimientos de los subcultivos (Cerdeira et al., 2014).

Aproximadamente el 70% del cacao se cultiva con algunos niveles de sombra (Gockowski & Sonwa, 2011), que pueden optimizar el rendimiento mientras minimizan la degradación del medio ambiente (Andres et al., 2016; Somarriba et al., 2013). La investigación sugiere que en los SAF donde la sombra no se elimina, después la madurez del fruto puede contribuir a una matriz de paisaje que conserve altos niveles de biodiversidad a través de zonas de amortiguamiento y refugio para la vida silvestre (Asare, 2005; Saj et al., 2017). Los SAF también contribuyen a una mayor resiliencia a las enfermedades y plagas, al cambiar la disponibilidad de recursos y el microclima (Andres et al., 2016). Además, los SAF diversificados de producción con cacao, que incluyen agricultura comercial y producción para autoconsumo (maderas, alimentos, aromáticas), permiten a los agricultores satisfacer sus necesidades básicas aun en tiempos de crisis, debido a los usos múltiples de la tierra, la venta de diversos productos y la provisión de alimentos básicos (seguridad alimentaria) (Abbott et al., 2018). Está demostrado que la composición y la estructura de los SAF de cacao desempeñan un papel importante en la regulación natural de plagas y enfermedades, en el consiguiente aborto de frutos y en la pérdida durante la maduración (Bos et al., 2007; Gidoín et al., 2014).

Hay evidencia que sugiere que los SAF (incluidos los de cacao) proveen diferentes servicios ecosistémicos como polinización, secuestro de carbono, regulación del recurso hídrico y conservación de la biodiversidad (Mortimer et al., 2018; Vaast & Somarriba, 2014). Por lo tanto, se considera que los SAF de



cacao ayudan a mantener la diversidad biológica en paisajes donde los hábitats de bosque han disminuido debido a la presión de uso de la tierra por el ser humano (Saj et al., 2017). En vista de lo anterior, existe un interés creciente por el diseño y manejo de los sistemas desde un enfoque holístico, con el fin de mejorar y diversificar la productividad de las fincas y del paisaje, para asegurar su sostenibilidad y brindar los servicios ecosistémicos mencionados (Mortimer et al., 2018).

La implementación de un SAF es de gran importancia por sus múltiples ventajas ambientales y económicas. Esto inicia con la identificación, selección y multiplicación de las especies forestales adecuadas por zona agroecológica para la asociación con este sistema productivo (Somarriba & Beer, 2011). Además, para los sistemas de producción actuales bajo arreglos agroforestales, es necesario diseñar nuevos sistemas de producción de cacao que permitan escalar la productividad y asegurar su sostenibilidad económica como cultivo perenne (Nunoo & Owusu, 2017; Obiri et al., 2007). De esta manera se evita recomendar de forma indiscriminada el uso de un solo sistema productivo a nivel regional (agroforestal o intensivo), y se pueden formular consejos basados en las condiciones particulares de suelo y clima, a fin de posibilitar sistemas productivos sostenibles (Vaast & Somarriba, 2014).

Inspirarse en los SAF como un medio de producción alternativo a la propuesta de cacaocultura intensiva significa proponer modelos que concilien producción de cacao con la provisión de servicios ecosistémicos. Lo anterior se hace necesario ya que los eslabones esenciales del sector cacao tienen objetivos convergentes: producir más cacao de manera sostenible minimizando los impactos ambientales, en lo que se ha definido como la *intensificación ecológica del cultivo*.





Capítulo II



Bases fisiológicas de los sistemas agroforestales

En los sistemas agroforestales, la hipótesis de competencia versus complementariedad es fundamental para entender la respuesta fisiológica del cacao y su productividad. La *complementariedad* ocurre cuando las especies explotan recursos como agua, luz y nutrientes de manera diferenciada, y maximizan la eficiencia y sostenibilidad del sistema. En contraste, la *competencia* emerge cuando las plantas comparten recursos limitados, y reducen la productividad y viabilidad del sistema. Por ello, la investigación busca mitigar la competencia y potenciar la complementariedad mediante tecnologías que optimicen los sistemas. Un proceso fisiológico crítico en este contexto es la fotosíntesis, que depende de la luz para convertir CO_2 en biomasa. La fotosíntesis se divide en dos fases: la *fotooxidativa*, cuando la luz excita electrones de clorofila y produce energía química (adenosín trifosfato [ATP] y nicotinamida adenina dinucleótido fosfato [NADPH]), y la *reductora*, que usa esta energía para sintetizar azúcares esenciales para el crecimiento. La luz, por tanto, es vital para la productividad y sostenibilidad de los sistemas agroforestales.

Debido a su origen evolutivo en condiciones forestales, y según estudios de respuesta clásicos, se considera que la luz óptima para el crecimiento del cacao se da con 40-70 % de sombra (Beer et al., 1997). Sin embargo, es muy importante resaltar que las intensidades de luz ambiental son extremadamente dinámicas y pueden variar según la región geográfica, especialmente por factores como altitud, latitud, nubosidad, temporada climática y orientación de pendientes.

Dada la gran heterogeneidad entre los genotipos de cacao, que difieren en anatomía y arquitectura del dosel, resulta difícil establecer un criterio universal sobre la intensidad de sombra óptima para su cultivo. Las plantas no son organismos estáticos, sino increíblemente dinámicos y capaces de adaptarse a su entorno. En SAF de cacao, la luz requerida para la saturación fotosintética puede variar entre 200 y 300 μmol de fotones $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, lo que representa apenas entre 10 y 20 % de la luz incidente máxima en muchas zonas de Colombia (Carvalho et al., 2023). Sin embargo, el cultivo bajo plena exposición solar puede estimular procesos plásticos de aclimatación a la luz, lo cual puede duplicar el requerimiento lumínico para una saturación fotosintética de 500 a 600 μmol de fotones $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Generalizar una sola intensidad de luz ideal para el cultivo es tan complejo como determinar el porcentaje óptimo de sombrío. Otros factores ambientales también influyen en la intensidad lumínica efectiva que perciben las plantas de cacao, y permiten indicar la necesidad o no de un mayor porcentaje de sombra. Los siguientes son algunos de ellos:

- **Alta incidencia de nubes y lluvias:** las nubes pueden actuar como una segunda capa de filtro de luz al reducir la intensidad efectiva en la superficie de las hojas.
- **Altitud y pendiente:** la menor altura y las pendientes pronunciadas que proyectan sombra durante el día también pueden reducir la intensidad real de la luz que incide sobre las hojas.
- **Poda y arquitectura de la planta:** en vista de que los diferentes genotipos de cacao a veces presentan diferencias en la arquitectura de la copa y que esto incluso puede afectar el ángulo de inclinación de las hojas, es importante considerar esta especificidad como criterio para determinar la intensidad del sombreado. El autosombrío puede ser un factor determinante para reducir la luz efectiva sobre la planta de cacao.
- **El tipo de dosel de la especie arbórea asociada:** influye sobre la irradiancia total que recibe el cacao, la cual oscila entre 4 y 80%. La fotosíntesis no responde de forma inmediata a estas fluctuaciones, que pueden afectar sustancialmente la producción del cultivo (Durand et al., 2021).





Además, es muy importante resaltar que los conceptos de *exceso* y *deficiencia de luz* son dinámicos y no dependen únicamente de la intensidad lumínica que incide sobre la superficie de las hojas. La luz óptima para el cacao es aquella que proporciona suficiente energía fotoquímica para satisfacer las demandas metabólicas primarias y secundarias de la planta, asociadas a la síntesis de biomoléculas esenciales para su supervivencia, crecimiento y desarrollo (Barber, 2009). Así, el exceso de luz se puede definir como toda intensidad lumínica que excede la demanda metabólica de la planta y puede generar estrés lumínico. Por el contrario, la deficiencia lumínica es cualquier condición de luz que no es capaz de satisfacer energéticamente las demandas de las actividades metabólicas de la planta.

Factores como las altas temperaturas y los eventos de déficit hídrico, comúnmente asociados a eventos climáticos extremos, afectan negativamente la demanda metabólica del cacao, reducen la demanda de luz y aumentan el estrés por exceso lumínico. El microclima que producen las especies de sombra asociadas al sistema agroforestal puede reducir sus temperaturas promedio diarias y provocar menores tasas de evapotranspiración asociadas al cacao. Estas condiciones permiten conservar la humedad del suelo por más tiempo y retrasan la incidencia del estrés por exceso de luz relacionado con el déficit hídrico. Por el contrario, las plantas de cacao expuestas al sol son más exigentes en términos de agua y nutrición, ya que necesitan mantener un equilibrio favorable entre el alto aporte de energía luminosa y la demanda metabólica. Si no se logra este equilibrio, la planta tiende a presentar síntomas de estrés. Aunque estos no se notan de forma inmediata en la producción de frutos y granos, sí se reflejan en una menor longevidad, como lo reportan ampliamente diversos estudios (Niether et al., 2020; Obiri et al., 2007). De hecho, la aceleración de las etapas de desarrollo y reproducción en condiciones de estrés moderado es una respuesta común en distintas especies vegetales, considerada una estrategia de escape al estrés (Kazan & Lyons, 2016).

Por lo anterior, se recomienda que la proporción de sombra se ajuste a las condiciones de luz, agua y fertilidad del suelo de cada sistema específico. Así se promueve un equilibrio entre cantidad de luz incidente y demanda metabólica de la planta de cacao, útil para los procesos de crecimiento y desarrollo. ¿Cómo saber si el sistema presenta exceso o deficiencia de luz? Una forma muy efectiva de determinarlo —dado que se trata de un concepto dinámico— es observar el comportamiento del cacao en busca de síntomas de estrés lumínico por alta o baja luz.

El estrés provocado en las plantas por la alta intensidad lumínica puede traducirse en una serie de síntomas fisiológicos, morfológicos y bioquímicos, relacionados por lo general a un exceso de energía lumínica, superior a la que puede utilizar la planta. Los síntomas más visibles relacionados con el exceso de

luz incluyen daños foliares (como las quemaduras solares), que se manifiestan como manchas necróticas o zonas descoloridas (blanqueadas o marrones) en las hojas expuestas directamente a la luz intensa. Otro signo común es la clorosis, caracterizada por el color amarillento de las hojas debido a la degradación de la clorofila, especialmente en los tejidos más sensibles. También puede presentarse secamiento o marchitamiento localizado, con márgenes o puntas de hojas afectadas por la alta transpiración y la pérdida de agua (figura 1).

Figura 1. Planta de cacao (*Theobroma cacao*) afectada por exceso de luz, municipio de El Carmen de Chucurí, Santander.

Foto: Laura Dayana Escobar Pachajoa



Durante el crecimiento se produce una reducción del desarrollo foliar, con hojas más pequeñas o deformadas, ya que la planta dirige la energía a los mecanismos de defensa. Otra respuesta común consiste en aumentar la producción de carotenoides y antocianinas, pigmentos que protegen el aparato fotosintético al absorber el exceso de luz. Esta acumulación puede dar lugar a tonos rojizos o anaranjados en las hojas, síntoma fácilmente observable en campo con un análisis cuidadoso. La incidencia del estrés por exceso de luz se corrobora en laboratorio con la medición de la fotoinhibición, que implica daño al fotosistema II (PSII) debido a la producción excesiva de especies reactivas de oxígeno (ROS), cuyo resultado es





la fotooxidación y la reducción de la eficiencia del PSII. Esto también conduce a una caída en la tasa de fotosíntesis, ya que el daño al aparato fotosintético y el cierre de las estomas perjudican la asimilación de carbono.

El estrés por baja luz ocurre cuando la planta no recibe suficiente radiación lumínica para cubrir sus demandas fotosintéticas, lo que afecta su metabolismo, crecimiento y desarrollo. En el caso del cacao, uno de los principales síntomas es el alargamiento excesivo de los tallos, que se vuelven delgados y frágiles. Esto sucede porque la planta dirige sus recursos hacia el crecimiento en altura, en un intento por alcanzar fuentes de luz. Otro signo es la clorosis, cuando las hojas se tornan amarillas o se despigmentan debido a la reducción de la síntesis de clorofila, lo que compromete aún más la eficiencia fotosintética. Las hojas también se vuelven más delgadas y adquieren una mayor superficie, una adaptación para maximizar la captura de luz, aunque siguen siendo frágiles y menos densas. También puede producirse caída prematura de hojas, en especial de aquellas más viejas o menos expuestas a la luz, ya que la planta es incapaz de mantener el coste metabólico de estas estructuras. Además, la poca luz reduce la tasa de fotosíntesis, lo que limita la producción de energía y dificulta el crecimiento y la acumulación de biomasa. La reducción de la floración y la fructificación también es común. Los procesos reproductivos dependen de una energía fotosintética adecuada y esto da como resultado frutos pequeños o menos numerosos. Otro efecto es un cambio en la arquitectura de la planta. Se produce un alargamiento exagerado de los entrenudos, a veces con aumento de la ramificación lateral, y un hábito de crecimiento más horizontal y escaso. Los tallos, a su vez, tienden a volverse más delgados y menos robustos, con dificultad para proporcionar soporte estructural a la planta. Estas adaptaciones pueden comprometer el desarrollo general: hacen que las plantas sean más susceptibles a plagas, enfermedades y otras condiciones adversas.

Además de la luz, otros dos factores importantes influyen en el diseño del SAF de cacao: la temperatura y el agua. La sombra que proyecta el SAF tiene el potencial de reducir la temperatura alrededor del cacao y las tasas de evapotranspiración, y aumentar así la disponibilidad de agua (Hatfield & Dold, 2019). Adicionalmente, en condiciones de plena exposición solar, con temperaturas más elevadas, la difusión de CO_2 a la atmósfera tiende a ser más lenta y esto perjudica su captura por parte de las plantas de cacao.

Finalmente, los cambios de temperatura también afectan la regulación hormonal de la planta y de procesos fisiológicos cruciales como la floración y la maduración del fruto (Santosa et al., 2018). Estos fenómenos dependen de la respiración nocturna de la planta (Amthor, 1984). Aunque se sabe que las altas temperaturas afectan el crecimiento y el rendimiento del cacao, todavía no se

comprende del todo su efecto sobre la fisiología (Lahive et al., 2019). En estudios de laboratorio, se observó que al aumentar la temperatura máxima de 36 a cerca de 39 °C, la producción de biomasa se redujo significativamente. Sin embargo, en condiciones de campo, hay regiones del mundo donde las temperaturas de verano superan los 40 °C, y no se han reportado efectos negativos sobre el crecimiento o los rendimientos del cacao (Hebbar et al., 2020). Se sabe que tanto el área foliar como la fotosíntesis son sensibles al calor, y que el rango óptimo de temperatura para la fotosíntesis en el cacao está entre 31 y 35 °C (Balasimha et al., 1991). Algunos estudios también han señalado beneficios en términos de productividad cuando la temperatura desciende a 24.5 °C (Santosa et al., 2018). En Colombia, se ha recomendado un rango de temperatura entre 18 y 32 °C como adecuado para el cultivo de cacao.

Por eso, es importante saber reconocer los principales síntomas del estrés térmico en el cacao, para idear alternativas que ayuden a mitigar sus efectos. Entre los síntomas más comunes están el marchitamiento por pérdida excesiva de agua a través de la transpiración, las quemaduras en las hojas que se manifiestan como manchas marrones o secas, el crecimiento reducido —que puede dar lugar a plantas atrofiadas—, y la caída de hojas y flores (abscisión), un mecanismo de protección para reducir la demanda de agua. En general, para reducir el impacto del calor, se recomienda garantizar un buen suministro de agua —incluido riego complementario si es necesario— y aumentar el nivel de sombra en el SAF, con el fin de evitar daños en el aparato fotosintético.

En cuanto al agua, pueden darse relaciones tanto de complementariedad espacial como de competencia entre las plantas, y estas pueden variar con el tiempo. Por ejemplo, los árboles del SAF pueden reducir el nivel freático, y esto, en condiciones climáticas extremas, podría llevar a la muerte regresiva de los mismos árboles. Para mitigar estos efectos, es posible aplicar medidas de gestión adicionales, como barreras de raíces de árboles, poda de las copas, uso de diferentes especies arbóreas, ajuste en la densidad y distribución de los árboles, y un uso eficaz del agua de escorrentía.

Aun así, los estudios sobre la eficiencia en el uso del agua en SAF de cacao siguen siendo escasos para comprender a cabalidad sus interacciones e implicaciones. Algunas especies maderables, como el abarco (*Cariniana pyriformis*), tienen el potencial de influir en la apertura de las estomas del cacao y aumentar su eficiencia en el uso del agua a nivel foliar (Carvalho et al., 2023). Estos efectos posiblemente podrían estar relacionados con la química del suelo alrededor del sistema radicular de los árboles de sombra





Capítulo III



Variedades de cacao utilizadas en el modelo AGROSAVIA de sistemas agroforestales

Colombia produjo en 2023 un total de 59.831 t de cacao seco. Los principales departamentos productores son Santander, con 20.603 t, seguido de Arauca (9.995), Antioquia (5.200), Huila (5.137) y Nariño (3.874) (Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao], 2022). Los genotipos de cacao de origen regional son considerados de aroma fino y su uso principal es la fabricación de chocolates. Colombia, Brasil y México son países de América Latina donde el consumo y la transformación crecen día a día. Además, el país es reconocido por el panel de expertos como exportador de cacao fino de aroma en un 80 % (Organización Internacional del Cacao [ICCO], 2024).

En la década de los cuarenta, en Colombia se realizó una recolección de materiales genéticos denominados *de origen regional*, nombrados según las zonas de colecta, entre ellas Palmira, Cauca y Tuluá. Entre los años cincuenta y ochenta se extendieron las colectas a los departamentos de Amazonas, Vaupés, Guaviare, Putumayo, Choco y Caquetá, logrando reunir un total de 191 materiales (Rodríguez-Medina et al., 2019). En la década de los ochenta, se recolectaron materiales adicionales en los departamentos de Cundinamarca, La Guajira, Huila, Norte de Santander y Magdalena (Rodríguez-Medina et al., 2019). Desde la década de los noventa hasta 2014, se introdujeron genotipos internacionales, entre ellos CCN 51 (Colección Castro Naranjal), ICS 1, ICS 95, EET 8 (Estación Experimental Tropical), ICS 60 (Imperial Collage Selection), TSH 565 (Trinidad Selection Hybrida), IMC 67 (Iquitos Maraón Collection). También se incorporaron algunos genotipos regionales como el SCC 61 (Selección Colombia Corpoica), especialmente en la zona de Santander (Mejía et al., 2019). Actualmente, estos genotipos son conservados en el Banco Nacional de Germoplasma de la especie *Theobroma cacao*, en el Centro de Investigación La Suiza de AGROSAVIA (Rionegro, Santander). Allí se resguardan 513 materiales genéticos, tanto regionales como introducidos.

Los resultados de investigación para el mejoramiento genético a través de la selección varietal participativa permitieron el registro de nuevas variedades regionales de cacao en Colombia. La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica, hoy AGROSAVIA) inició este registro en 2014 con la inclusión de las variedades TCS 01 (*Theobroma* Corpoica la Suiza) y TCS 06 en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). Posteriormente, en 2017, se incluyeron las variedades TCS 13 y TCS 19. Actualmente, Colombia dispone de veinte variedades de cacao con registro ICA, entre ellas cuatro de AGROSAVIA, catorce de Fedecacao y dos de la Compañía Nacional de Chocolates.

Las variedades de cacao especiales utilizadas en el modelo AGROSAVIA para el establecimiento de sistemas agroforestales con maderas finas tropicales, apuntan a obtener cacao de aroma fino, para acceder a mercados especializados en la producción de chocolates. En la tabla 1 se relacionan los genotipos de AGROSAVIA disponibles con registro ICA en Colombia, con sus principales características de productividad, implementados en diferentes regiones bajo modelos agroforestales.



Tabla 1. Principales características de productividad en las variedades de AGROSAVIA

Variedad	Origen	Rendimiento kg/ha/año	ig*	im*	Compatibilidad
TCS 01	Coper (Boyacá)	3.300	3,0	10	AC
TCS 06	Coper (Boyacá)	2.000	2,0	12	AI*
TCS 13	Rionegro (Santander)	1.500	1,8	14	AC*
TCS 19	Lebrija (Santander)	1.800	1,6	16	AC*
*ig: índice de grano; im: índice de mazorca; AC: autocompatible; AI: autoincompatible. Fuente: Jaimes Suárez et al. (2022a)					

Manejo agronómico de las variedades

El manejo agronómico de las variedades de cacao es similar; sin embargo, puede variar según ciertas características genéticas como la arquitectura de la planta, la reacción a enfermedades y plagas, la exposición a la luz, la compatibilidad, la fermentación, entre otras. En cuanto a la arquitectura, el genotipo TCS 19 presenta baja vigorosidad y tamaño pequeño de la copa (AGROSAVIA, 2024), por lo que se recomienda efectuar podas de formación a partir de los seis meses de establecido en campo. Se deben seleccionar tres ramas principales a partir de los 50 cm de altura y despuntar las principales para fortalecer el crecimiento de las ramas productivas. Posteriormente, se recomienda hacer podas de mantenimiento dos veces al año, al final de las épocas secas, con un reparto adecuado de las ramas secundarias y terciarias, sin excesos de poda y cortes agresivos.

Los genotipos TCS 06 y TCS 13 presentan vigorosidad intermedia. Se recomienda también iniciar podas de formación después de seis meses del establecimiento en campo, seleccionar tres ramas principales desde los 50 cm de altura, realizar podas de mantenimiento dos veces al año y efectuar entresaques esporádicos según el desarrollo de nuevas ramas, con el fin de evitar crecimientos excesivos.

Por último, el TCS 01 es de alta vigorosidad, por lo cual requiere una poda de formación oportuna —seleccionando las ramas principales a partir de 50 cm de altura—, podas de mantenimiento bien realizadas dos veces al año y despuntes periódicos para evitar ramas con elongaciones largas y decumbentes (figura 2).



Figura 2. Genotipos de cacao de AGROSAVIA. a. TCS 01; b. TCS 06; c. TCS 13; d. TCS 19.

Fotos: Genaro Andrés Agudelo Castañeda (a, c y d), Diomedes de Jesús Díaz (b).



De acuerdo con las enfermedades limitantes en el cultivo de cacao, TCS 06 es considerado como *resistente*; TCS 19 como *tolerante* a moniliasis (*Moniliophthora roreri*), y TCS 01 *tolerante* a escoba de bruja (*Moniliophthora perniciosa*). Según lo anterior, se recomienda el establecimiento combinado de TCS 19 y TCS 06 en zonas de alta humedad relativa y alta presencia de moniliasis. La variedad TCS 01 no se aconseja para zonas de alta humedad y presión de la enfermedad. El control cultural de las enfermedades limitantes se debe realizar mediante remoción semanal de frutos enfermos durante los picos de fructificación y desarrollo de los frutos y remoción quincenal en las épocas próximas a la cosecha.

En cuanto a la exposición a la luz, se sugiere establecer las variedades bajo modelos agroforestales con maderas finas tropicales, donde los sombríos disminuyan de 30 a 40 % de la radiación total, según la zona del cultivo. Los genotipos TCS 01 y TCS13 presentan mayor tolerancia a la exposición solar, mientras que TCS 19 tiene una tolerancia intermedia y TCS 06 es susceptible a la exposición solar (por ningún motivo, debe establecerse bajo esta condición).

Para el establecimiento de los cultivos es importante tener en cuenta las características de compatibilidad sexual de las variedades, ya que de ellas depende la productividad (Agudelo-Castañeda et al., 2023). En la tabla 2 se presenta la intercompatibilidad sexual de las variedades de cacao recomendadas por AGROSAVIA.

Tabla 2. Intercompatibilidad sexual de las variedades de cacao recomendadas

Clon		MADRE ♀			
		TCS 01	TCS 06	TCS 13	TCS 19
PADRE ♂	TCS 01	AC*	IC*	IC	II
	TCS 06	II	AI	II	IC
	TCS 13	II	IC	AC	II
	TCS 19	IC	IC*	IC	AC*

AC	Autocompatible
AC*	Autocompatible >70 %
AI	Autoincompatible
IC	Intercompatible
IC*	Intercompatible >70 %
II	Interincompatible

Fuente: Elaboración propia

Según la tabla 2, las variedades TCS 01 y TCS 19 pueden establecerse como cultivos monoclonales; es decir, se puede establecer una sola variedad en cultivos independientes ya que el porcentaje de autofecundación es superior al 60 % y la productividad no se ve afectada por esta condición (Agudelo Castañeda et al., 2021). Por su parte, aunque la variedad TCS 13 es autocompatible, se recomienda establecerla en combinación con TCS 01 y TCS 19 para aumentar su potencial productivo, debido a que su porcentaje de autofecundación es del 35 %.

En cambio, la variedad TCS 06 es autoincompatible, y por ningún motivo debe establecerse en cultivos monoclonales. Su siembra debe hacerse en combinación con TCS 19 y TCS 01 para lograr una productividad adecuada. Además, en zonas de alta humedad y presión de inóculo por moniliasis, solo debe combinarse con TCS 19 (Jaimes Suárez et al., 2022b).

Además del manejo agronómico de las variedades, es necesario tener en cuenta parámetros de poscosecha para garantizar que el producto final sea catalogado como fino de aroma. Durante la fermentación, el aumento de temperatura es esencial para un proceso homogéneo y favorecer la liberación de precursores de sabor. Esto ocurre junto con una liberación de CO_2 y agua, lo que eleva la temperatura por encima de 45 °C. El proceso tiene una duración de 6 a 7 días, con variaciones de temperatura según la disponibilidad de oxígeno y la acción de microorganismos que activan los precursores de aroma.

Las pruebas de corte en la fermentación permiten observar el cambio de color, que pasa de violeta a café oscuro, provocando la muerte del embrión y el hinchamiento del grano (Jaimes Suárez et al., 2022a). Después de la fermentación, se procede a realizar secado sobre madera y se continúa con los volteos cada 1 a 2 horas durante el periodo de mayor luminosidad del día. Este proceso se repite hasta determinar el porcentaje óptimo de humedad, entre 7 y 7,5 %. Para verificarlo, es necesario tener un detector de humedad para grano seco o realizar la prueba de puño que emplean los productores para detectar el secado en valores aproximados a este rango.

Para la fermentación de variedades como TCS 06, TCS 13 y TCS 19, se pueden aplicar metodologías ajustadas y homogéneas en los procesos de fermentación y secado, ya que estas variedades no presentan alteraciones durante el proceso. El genotipo TCS 01 se caracteriza por tener un grano de mayor tamaño y una cobertura de mucilago densa, por lo cual requiere un mayor número de volteos en la fermentación (cada 1 o 2 horas durante el primer día), con el fin de lograr una mayor fricción y facilitar el escurrimiento de mucilago y el incremento de la temperatura. En cuanto al secado, se aconsejan volteos más frecuentes, especialmente durante los dos primeros días. En la figura 3 se muestran granos de cacao seco de cada una de las variedades especiales de AGROSAVIA.



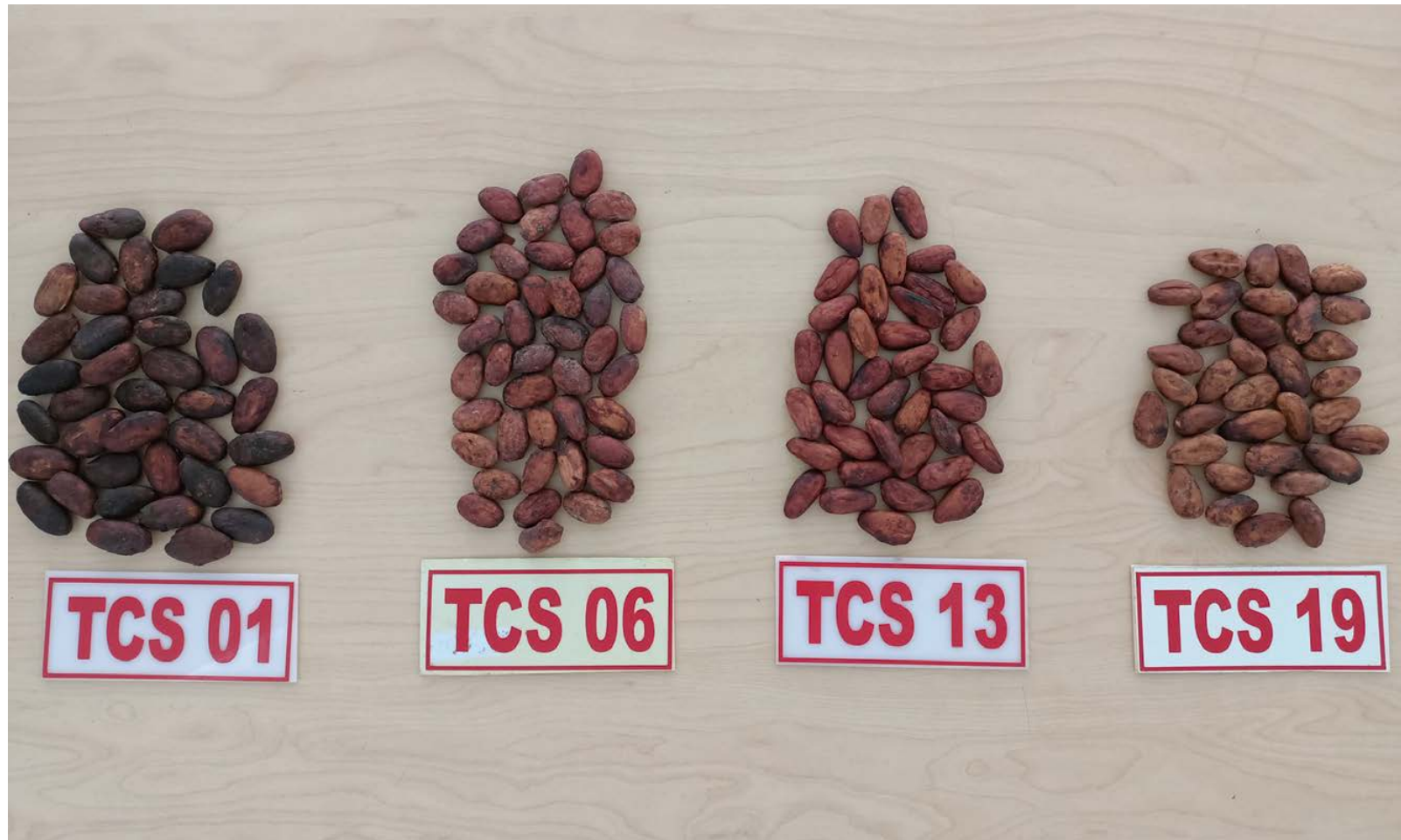


Figura 3. Granos de cacao fermentados y secos de las variedades de cacao especiales de AGROSAVIA.

Foto: Jiner Niño





Capítulo IV



Especies forestales con potencial asocio en SAF de cacao

A nivel mundial, se cultivan aproximadamente 11 millones de hectáreas de cacao, de las cuales se estima que el 31 % (3,4 millones de hectáreas) se produce bajo árboles de sombra, es decir, en SAF (Somarriba et al., 2024; Somarriba & López-Sampson, 2018).

En Colombia, alrededor del 90 % de las 190.000 ha sembradas se encuentran bajo SAF, caracterizados por una gran diversidad de especies arbóreas y frutales en los arreglos y diseños (Rojas Molina et al., 2021). La decisión de establecer cultivos de cacao en monocultivo o en sistemas agroforestales ha sido objeto de análisis y discusión en diversos contextos productivos y académicos. Un metaanálisis realizado por Niether et al. (2020) encontró que, aunque la producción de cacao en SAF fue en promedio un 25 % menor que en monocultivos, los rendimientos totales del sistema resultaron hasta diez veces superiores. Esto se traduce en una mayor contribución a la seguridad alimentaria y a la diversificación de los ingresos de los agricultores.

En este contexto, el nivel de cobertura arbórea se ha considerado un factor clave, que puede influir positiva o negativamente en la producción de un SAF con cacao. Blaser et al. (2018) proponen que, con una cobertura de hasta 30 %, los SAF son superiores a los monocultivos. Si bien la producción de cacao es ligeramente menor, los sistemas proporcionan beneficios ambientales, sirven como mecanismo de adaptación y mitigación del cambio climático, contribuyen a la conservación de la biodiversidad y generan fuentes de ingresos alternas para los productores.

La presencia de árboles en el estrato superior del sistema productivo ofrece beneficios importantes como la sombra, que reduce la intensidad de la radiación lumínica y ayuda a moderar el estrés asociado a la exposición directa a la luz solar. Esto contribuye a crear un microclima más estable. Según Niether et al. (2020), la humedad relativa media y el déficit de presión de vapor no muestran diferencias entre los SAF de cacao y los monocultivos.

Algunos parámetros morfológicos de los árboles de sombra, como la altura y el tamaño de la copa, influyen en las condiciones microclimáticas del cultivo, y por ende en el crecimiento del cacao y su producción (Asante et al., 2021; Blaser-Hart et al., 2021; Kohl et al., 2024). Esta influencia depende, en gran medida, de la proximidad entre el árbol de sombra y las plantas de cacao, ya que una distribución inadecuada genera competencia por el agua, los nutrientes y la luz (Blaser et al., 2018; Kohl et al., 2024). Por ello, la selección apropiada de árboles de sombra y su diseño de siembra en SAF es fundamental para maximizar sus beneficios y minimizar posibles efectos negativos.

Los árboles aportan múltiples servicios ecosistémicos: 1) provisión de sombra; 2) mantenimiento de la fertilidad del suelo a través del ciclo de nutrientes; 3) conservación y aumento de la biodiversidad; 4) secuestro de carbono; 5) ingresos adicionales para el productor a través de la venta de madera, leña, medicina tradicional, materiales de construcción, herramientas para la artesanía (Asare 2005; Dago et al., 2024), y de productos forestales no madereros como metabolitos secundarios, aceites esenciales, resinas, alcaloides, flavonoides y fenoles, que pueden usarse en las industrias farmacéutica, agrícola y cosmética (Devappa et al., 2015) (capítulo V); 6) sirven como especies fitorremediadoras, ya que a través de sus tejidos extraen, traslocan y compartimentalizan grandes concentraciones de metales pesados, en especial cadmio (Pizarro et al., 2016) (capítulo V).

La selección de especies arbóreas en SAF de cacao está influenciada por una combinación de factores socioeconómicos, culturales y ambientales. Los agricultores toman decisiones basadas en el acceso al mercado, el conocimiento de las especies, las estrategias de mitigación de riesgos, las oportunidades comerciales asociadas a productos distintos a la madera, así como en condiciones familiares y capacidad adquisitiva (Sanial et al., 2023). Por ejemplo, se ha observado



que en Costa de Marfil los agricultores de origen indígena tienden a conservar una mayor diversidad de árboles dentro del cultivo de cacao que quienes no lo son (Kouadio et al., 2025). Este contexto resalta la importancia de una selección apropiada de especies forestales, ya que esto influye directamente en el éxito del SAF. Vinceti et al. (2024) desarrollaron una herramienta de selección de especies forestales con rasgos funcionales, conocimiento local y escenarios climáticos, que permite recomendaciones adaptadas a las condiciones y objetivos de cada productor. Además, muchos proyectos enfocados en la promoción de especies arbóreas buscan potenciar el conocimiento tradicional y las prácticas locales para aumentar la productividad del cacao de forma sostenible, promover la diversidad arbórea y fortalecer la provisión de servicios ecosistémicos (Smith Dumont et al., 2014).

La implementación de un SAF es de gran importancia por sus múltiples ventajas ambientales y económicas. Para lograr una adecuada integración con el cultivo, es esencial identificar, seleccionar y multiplicar especies forestales apropiadas para cada zona agroecológica (Somarriba & Beer, 2011). En este capítulo se presentan algunas de estas especies comúnmente asociadas al cacao en SAF de los Santanderes, destacadas por los agricultores por tener aspectos relevantes para sus sistemas productivos. Su uso no debe generalizarse, ya que su desempeño depende de condiciones particulares de suelo y clima (Vaast & Somarriba, 2014).

Abarco (*Cariniana pyriformis* Miers)



Figura 4. Abarco (*Cariniana pyriformis*) en sistema agroforestal de cacao, municipio de Rionegro, Santander.

Foto: Laura Dayana Escobar Pachajoa

Nombre científico: *Cariniana pyriformis* Miers.

Nombres comunes: abarco (Colombia), chibugá, cocoabarco, piloncillo, castaño, caobano, fono, pona, bacú (Venezuela), caspi (Perú), yesquero (Bolivia), jequitiva (Brasil), *colombian mahogany* (Estados Unidos) (Bernal et al., 2013, Prance & Mori, 1979).

Taxonomía

Orden: Ericales

Familia: Lecythidaceae

Género: *Cariniana*

Especie: *C. pyriformis* Miers, 1874



Descripción botánica

Basada en Cárdenas (2016), Cárdenas et al. (2015) y Gómez (2010). Árbol de gran porte con alturas máximas de 30 a 50 m y diámetros de 100 a 200 cm. Sistema radicular pivotante que se extiende hacia capas profundas del suelo en busca de estabilidad y nutrientes. Copa aparasolada con una amplitud media entre 7 y 14 m. Tronco recto y cilíndrico, con una base de pequeños aletones. Corteza externa de color marrón oscuro, caracterizada por fisuras espaciadas y poco profundas. Corteza interna de color blanco cremoso y apariencia fibrosa.

Hojas simples, alternas, con borde aserrado, dísticas y sin estípulas, tamaño pequeño con 7 cm de largo en promedio por 3 cm de ancho, redondas en la base y acuminadas en el ápice (figura 4). Flores con cáliz de color vistoso blanco-amarillento y dispuestas en panículas terminales con un raquis principal de 4 a 10 cm de longitud y pedicelo de 5 mm de longitud. Son actinomorfas, globosas, de 2 cm de largo, con 5 o 6 pétalos y estambres numerosos. Fruto en pixidio leñoso de forma ovoide o piriforme, su tamaño varía entre 6 y 8 cm de longitud aproximadamente. Es un fruto dehiscente con 8 a 25 semillas aladas que facilitan su dispersión por el viento.

Fenología

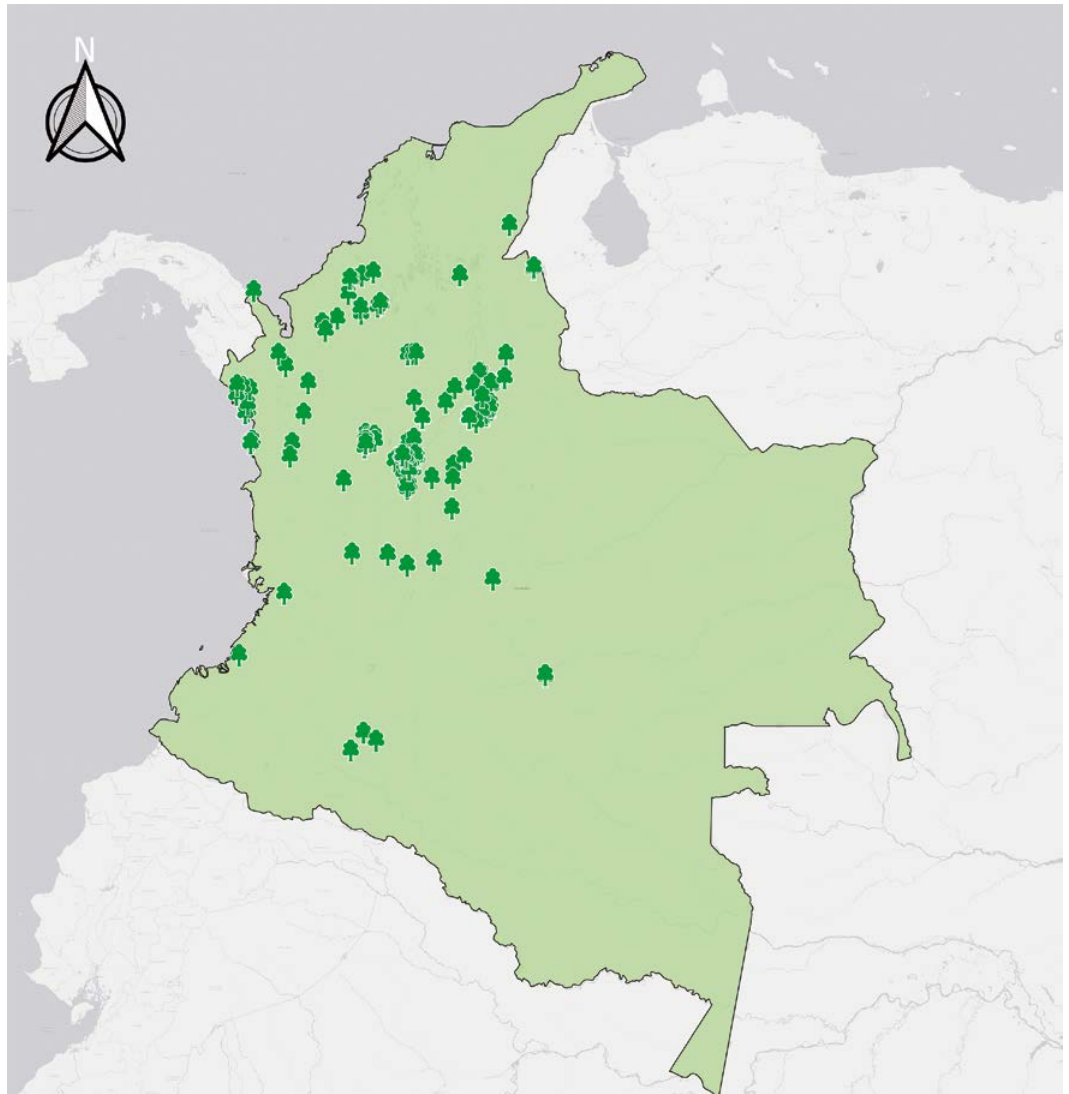
Basada en Cárdenas et al. (2015), Gómez (2010), Gómez & Toro (2007) y Silva et al. (1996). Su periodo de floración se presenta en época de lluvias y la fructificación en temporada seca. Debido a ese comportamiento general, los meses para cada fase varían de acuerdo con la localización geográfica. Gómez & Toro (2007) reportan frutos en el departamento de Antioquia durante los meses de agosto y septiembre. En el Guaviare se ha registrado floración entre agosto y septiembre, y fructificación de octubre a febrero. En el medio Magdalena y Urabá, florece en noviembre y diciembre, y fructifica entre enero y marzo. En la zona del Catatumbo se han observado individuos con frutos en octubre. En el Chocó, la floración se presenta de septiembre a diciembre con maduración de frutos entre noviembre y marzo (Silva et al., 1996). Por otra parte, de acuerdo con el Sistema de Información de Maderas Tropicales, la fructificación tiene su pico más alto en los meses de febrero y marzo, aunque se produce de forma continua cuando existen porcentajes altos de pluviosidad. Los botones florales aparecen en agosto con máxima floración en diciembre.

Distribución y ecología

Basada en Cárdenas et al. (2015) y Galeano et al. (2007). Su distribución geográfica abarca la parte noroccidental de América del Sur, con reportes en Panamá, Costa Rica, Colombia, Venezuela, Brasil, Perú y Bolivia. En Colombia se encuentran colecciones de Chocó, Urabá, valle del río Sinú, cuenca Cauca-Magdalena, región del Catatumbo, así como en los valles de los ríos León y Amazonas (figura 5).

Figura 5. Mapa de distribución del abarco (*Cariniana pyriformis*) en Colombia.

Fuente: Sistema Global de Información sobre Biodiversidad (GBIF, 2025a)



El abarco se distribuye en regiones de clima cálido correspondientes a bosques húmedos y muy húmedos tropicales, con temperatura superiores a 24 °C, precipitaciones por encima de 1.500 mm y altitud de 50 a 800 m. Crece en suelos moderadamente profundos y bien drenados de textura franco-arcillosa



a areno-arcillosa y tolera suelos ácidos con pH entre 4,5 y 5,5. Se ha encontrado asociado a especies como ceiba amarilla (*Hura crepitans*), caucho (*Ficus* sp.), guayabo (*Calycophyllum* sp.), palma helecho (*Cyathea petiolata*), *Magnolia* sp., *Brownea* sp., palo de lacandón (*Dialium guianense*), choibá (*Dipteryx oleífera*), bálsamo de Tolú (*Myroxylon balsamum*) y balaústre (*Centrolobium paraense*).

Es una especie heliófita durable que se desarrolla rápidamente en áreas abiertas, aunque tolera cierto porcentaje de sombra en sus etapas juveniles, lo cual favorece su establecimiento.

Usos

Basado en Cárdenas et al. (2015), Gerry (1952) y Penna (2017). El abarco es una especie altamente valorada por la calidad de su madera, caracterizada por su durabilidad y resistencia. Con una densidad de 0,55 g/cm³, se usa especialmente en aserrío y varas rollizas para construcción de viviendas, puentes y estructuras. En Colombia también se utiliza para carrocerías de grandes camiones (Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas [Sinchi] 2015), y para construcción pesada, liviana y naval, y en ebanistería, carpintería, fabricación de pisos y tornería. La madera se puede manipular fácilmente con herramientas manuales, aunque trabajar con ella de forma mecánica requiere herramientas especiales por su alto contenido de sílice.

El fruto es utilizado por indígenas para elaborar “cocas artesanales”, un juego de entretenimiento; las semillas ocasionalmente son consumidas como nueces y son ricas en grasas. La corteza viva se utiliza en tratamientos contra infecciones digestivas, mediante la cocción de la corteza en agua.

Por otra parte, esta especie tiene un uso ambiental importante en procesos de restauración ecológica, provisión de servicios ecosistémicos y establecimiento de SAF.

Establecimiento y manejo

Basado en Cárdenas et al. (2015), Díaz & Moreno (1998), Gómez (2010), Gómez & Toro (2007), Jaimes Suárez et al. (2022a), Morales (2017), Silva et al. (1996) y Silva et al. (1996). El método de propagación más utilizado en la especie abarco consiste en recolectar semillas de árboles de muy buena calidad. Estas semillas son ortodoxas y se pueden conseguir en casas comerciales que especifican las recomendaciones de manejo y almacenamiento a fin de conservar su viabilidad. Para la propagación de abarco por semilla se recomienda realizar una primera fase de germinación y luego trasplantar las plántulas a bolsas en vivero, ya que por ser una especie susceptible al ataque de hormigas y roedores, no se recomienda su siembra directa en campo.

Se ha reportado que las semillas no requieren ningún tratamiento pregerminativo y pueden brotar en total oscuridad o en plena exposición solar. Las semillas se siembran en hileras separadas por 5 cm, con una distancia de 1 cm entre semillas. La germinación comienza 12 días después de la siembra y se prolonga hasta los 27 días. Se recomienda trasplantar a bolsas cuando aparezca el primer par de hojas verdaderas o estas alcancen una altura de 10 cm. Es aconsejable enriquecer el sustrato de las bolsas con materia orgánica. Las plántulas trasplantadas deben ser colocadas bajo malla polisombra de alta densidad o bajo cobertura vegetal. El riego diario siempre será necesario y debe disminuirse paulatinamente conforme aumente la luminosidad, antes de ser llevada al sitio de plantación. Además, es importante considerar labores de fertilización edáfica o foliar para garantizar el óptimo desarrollo de la plántula y posteriormente trasplantarla a campo.

El trasplante se realiza cuando las plántulas alcanzan 30 cm de altura, a una edad aproximada de 4 a 5 meses. En el proceso de siembra en sitio definitivo se debe considerar la correcta ejecución de labores culturales, como un buen ahoyado y aplicación de materia orgánica al suelo. Se sugiere emplear un kilogramo de materia orgánica por plántula. Se ha reportado el uso de micorrizas como fuente natural para mejorar la absorción de nutrientes y promover el buen crecimiento de las plántulas.

El control de arvenses es importante durante los primeros años. Según el grado de competencia que ejerzan sobre las plántulas, se necesitarán entre dos o tres limpiezas anuales, durante los tres primeros años. Posteriormente, se puede realizar una limpieza anual hasta que las copas sean dominantes.

De acuerdo con el modelo desarrollado por AGROSAVIA (2024) en Santander, el cacao es sembrado con doble surco forestal. El abarco se establece en dirección norte-sur, o según curvas de nivel en terrenos con pendientes fuertes. Los surcos dobles de abarco se siembran a una distancia de 16 m entre surcos y de 4 m entre árboles (figura 6), dejando espacio para la siembra de los cultivos de sombrío transitorio, pancoger y para cinco surcos de cacao.

Es fundamental contar con una adecuada planificación para el establecimiento de SAF. Deben tenerse en cuenta diversos factores para diseñar un arreglo acorde con los objetivos del productor y ajustado a las condiciones agroambientales de la zona. El modelo propuesto por AGROSAVIA con abarco puede adaptarse con una mayor distancia entre surcos y árboles, según las particularidades de cada territorio (figura 6).



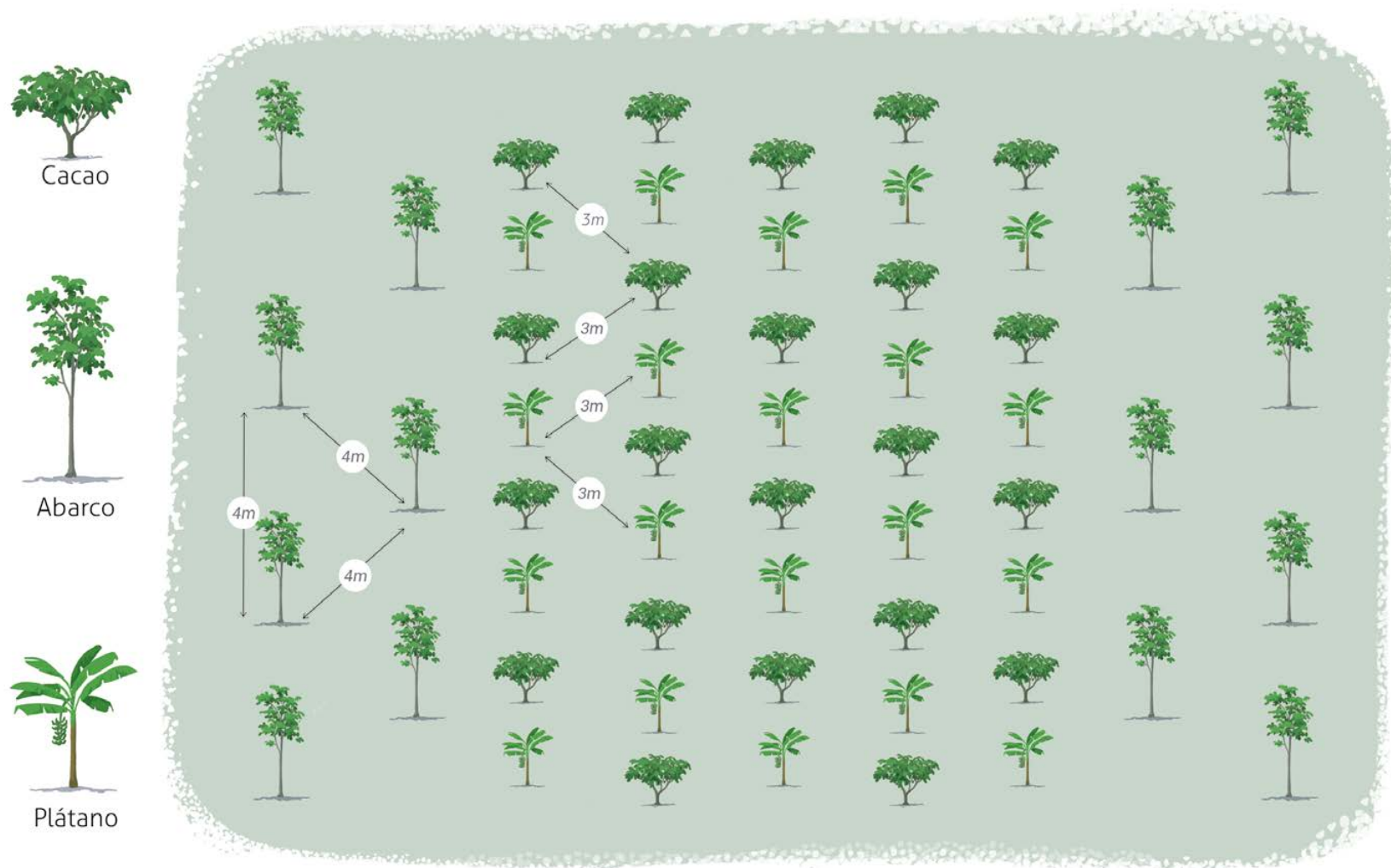


Figura 6. Diseño de siembra con abarco (*Cariniana pyriformis*), modelo productivo para el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) en el departamento de Santander.

Fuente: Elaboración propia con base en Jaimes Suárez et al. (2022a)

Podas: el abarco es susceptible a la bifurcación temprana, y es fundamental el monitoreo y la poda de formación durante los primeros años de establecimiento. Es importante tener en cuenta que la poda de formación no debe superar el 40 o 50 % del follaje.

Esta labor de manejo implica costos adicionales que el productor debe considerar en su análisis costo-beneficio. Sin embargo, es importante entender que representa una inversión para asegurar el adecuado crecimiento del árbol, cuya presencia en el SAF aporta múltiples beneficios productivos y ecosistémicos.

Limitaciones (plagas o enfermedades)

Basado en Cárdenas et al. (2015) y Silva et al. (1996). En cuanto a la sanidad del abarco, se reporta que la semilla puede ser atacada por hongos de los géneros *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium* y *Spicaria* y diversas bacterias, y por esto se recomienda su desinfección antes de la siembra. Por otro lado, durante la germinación es fundamental desinfectar el almácigo para prevenir la aparición de hongos, particularmente *Rhizoctonia* sp., que provoca pudrición del cuello de la raíz.

Estado de conservación

C. pyriformis fue categorizada como Casi Amenazado (*Near Threatened-NT*) por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) en 1998 (World Conservation Monitoring Centre, 1998). A nivel nacional, estudios más recientes indican que la especie ha experimentado una disminución significativa en su población, estimada en un 80 % en los últimos 100 años, debido principalmente a la sobreexplotación y la destrucción de su hábitat. Por esta razón, en el *Libro rojo de plantas de Colombia* está clasificado como En Peligro Crítico (CRA2cd+4cd) (Cárdenas & Salinas, 2007).

Funciones en sistemas agroforestales

Sombrío: Agudelo-Castañeda et al. (2018) reportan que las plantas de cacao, bajo arreglos con *C. pyriformis*, exhiben una mejor relación fotosintética en las estaciones húmedas y secas. Esto también se asoció con un mayor uso eficiente del agua (UEA) y una mejor actividad fisiológica del cacao durante todo el año.

Aporte de nutrientes: un estudio determinó el aporte nutricional de N, P, K, Mg, B, Ca y Mn presentes en la hojarasca de un SAF de cacao asociado con abarco en las localidades de Rionegro (Santander) y Muzo (Boyacá). Se encontró que el abarco realiza un mayor aporte tanto en materia seca como en contenidos nutricionales de la hoja, principalmente en el diseño de siembra de surco doble (Báez-Daza, 2018).





Almacenamiento de carbono: en un estudio de interacciones interespecíficas en SAF de cacao bajo sombrío de tres especies forestales, Carvalho et al. (2023) reportan que los sistemas más prometedores en términos de secuestro de carbono y uso eficiente de agua incluyen el genotipo TCS01 asociado a *C. pyriformis*.

Carranza y Zuluaga (2017), para un SAF de dos hectáreas de abarco y cacao con cuatro años en San José del Guaviare, proyectaron a 20 años el crecimiento y la captura de carbono del abarco. Estimaron una producción de 1,35 m³ de madera por árbol, de modo que, en una explotación final con 569 árboles por hectárea, se proyectó una producción de 770,259 m³ de madera en pie. Estas proyecciones sugieren un potencial significativo de captura y almacenamiento de carbono a largo plazo.

En el Valle de Aburra, Henao y Pérez (2022) identificaron el potencial de 206 especies arbóreas para capturar carbono. Reportan que *C. pyriformis* es la especie que presentó mayor almacenamiento de carbono a medida que crecía. Esto evidencia su potencial en la prestación de servicios ecosistémicos, que pueden ser integrados en SAF de cacao.



Caoba (*Swietenia macrophylla* King)

Nombre científico:

Swietenia macrophylla King

Nombre común:

caoba, cedro caoba (Colombia), palo santo, cedro carmín, cahoga (idioma embera), venadillo, cobilla (México), caoba del sur, caoba del Atlántico, aguano, oruba, mara, cobano (Ecuador), mara (Bolivia), *mahogany* (EE. UU.), mogno (Brasil) (Cárdenas et al., 2015).

Taxonomía

Familia: Meliaceae

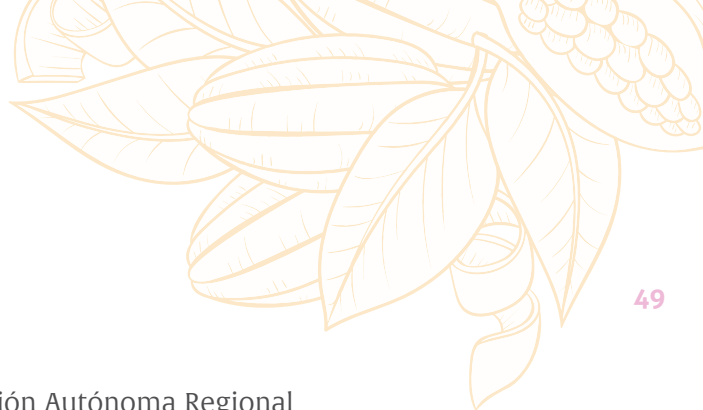
Orden: Sapindales

Género: *Swietenia*

Especie: *S. macrophylla* King

Figura 7. Caoba (*Swietenia macrophylla*) en sistema agroforestal de cacao, municipio de San Vicente de Chucurí, Santander.

Foto: Laura Dayana Escobar Pachajoa



Descripción botánica

Basado en Brown et al. (2003), Cárdenas et al. (2015), Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR, 2019) e Instituto Nacional de Bosques (INAB, 2019). Árbol de gran tamaño con altura máxima de 50 m y diámetro de 300 cm. Sistema radicular con raíz pivotante que penetra profundamente en el suelo, permitiendo su fuerte anclaje y acceso a nutrientes de las capas profundas. Copa abierta y redonda con una amplitud promedio entre 7 y 14 m. Tronco generalmente largo, recto y cilíndrico; rasgos distintivos comercialmente y de gran importancia de asociación en SAF. Corteza externa fisurada de color marrón grisáceo oscuro e interna con coloración rosada a roja, fibrosa, amarga y astringente (figura 7).

Árbol con densidad de follaje alta, caducifolio, con hojas compuestas alternas, paripinnadas, de 16-40 cm de largo. Cada hoja tiene entre 3 y 6 pares de folíolos alargados, opuestos, glabros, con bordes enteros. Flores dispuestas en inflorescencias terminales tipo panícula. Las flores pequeñas, de color blanco amarillento, son unisexuales y pueden presentar pubescencia, cinco pétalos libres y estambres amarillos.

Frutos en forma de cápsulas alargadas, ovadas a piriformes, con 12-22 cm de largo, 6-10 cm de ancho y 300 g de peso, de color pardo grisáceo. Cuando maduran y se secan, se abren desde la base en cinco válvulas. Cada fruto contiene entre 45 y 70 semillas, alargadas y aladas en el extremo más angosto, de color café, rojizo o pardo. Se reportan entre 1.800 y 2.500 semillas por kilogramo, con un porcentaje de germinación de 80 a 95 %. Estas semillas se pueden conservar por largos periodos (8 años), en condiciones de baja humedad (3 a 7 %) y temperatura (3 °C), o por periodos más cortos (8 meses) a temperatura ambiente y en bolsas de papel.

Fenología

La floración generalmente ocurre al final de la temporada seca o al inicio de la lluviosa, dependiendo de la región. Después de la floración, los frutos maduran en un periodo de 8 a 12 meses. La CAR (2019) reporta que, en Colombia, se ha observado fructificación de caoba entre agosto y diciembre.

Distribución y ecología

Basado en CAR (2019), Cárdenas & Salinas (2007), Cárdenas et al. (2015), Whitmore (1983, citado por Céspedes et al., 2003) e INAB (2019). La caoba es una especie nativa que se distribuye desde América Central hasta Brasil y Bolivia. En Colombia se ha registrado en la costa Atlántica, el valle medio del río Magdalena, en los departamentos de Bolívar, La Guajira, Magdalena, Santander, Sucre y en el Chocó biogeográfico (figura 8).

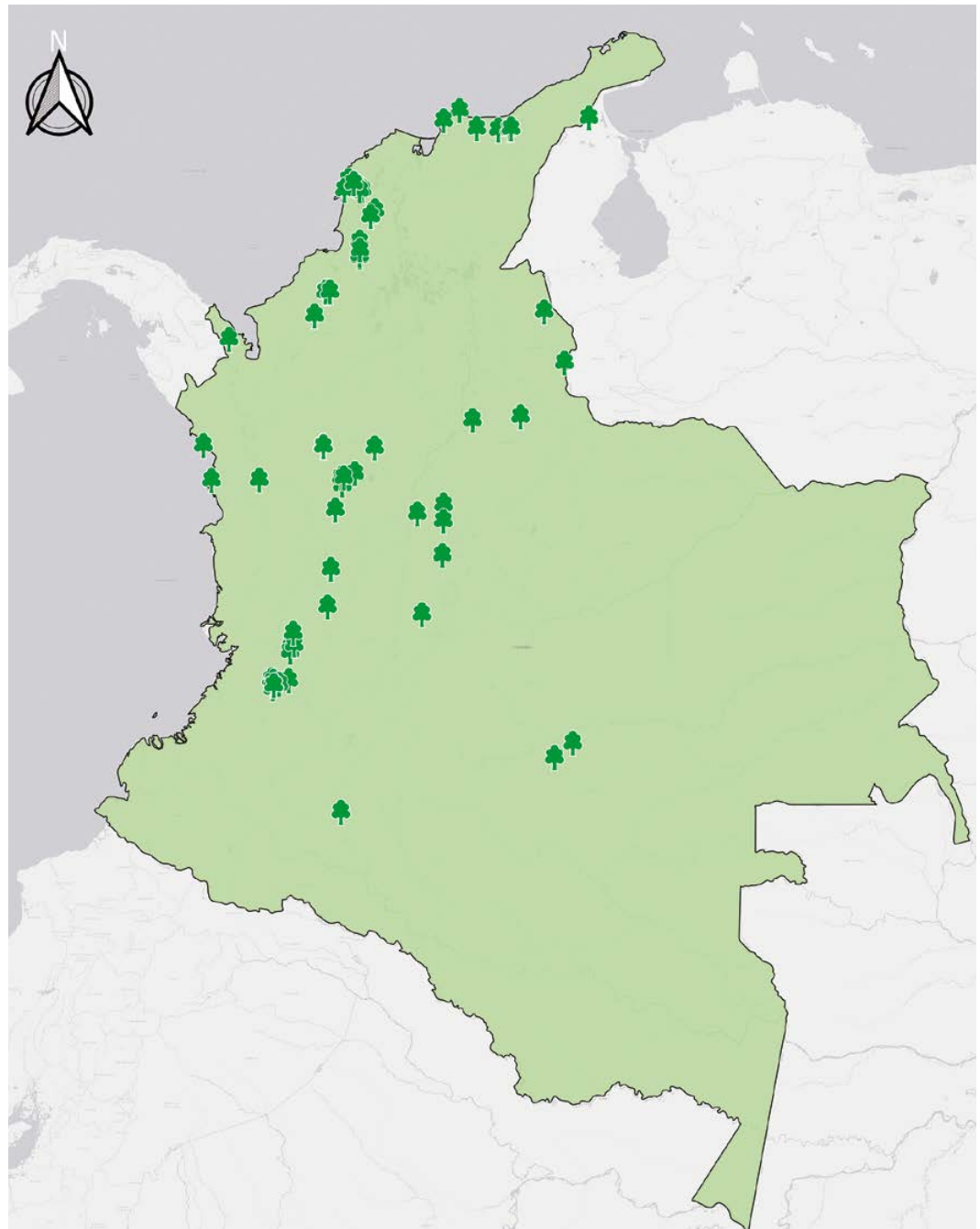


Figura 8. Mapa de distribución de caoba (*Swietenia macrophylla*) en Colombia.

Fuente: GBIF (2025b)

Similar al abarco, la caoba es una especie heliófila durable, que presenta un mejor desarrollo en áreas con buena disponibilidad de luz. Es una especie nativa que habita en zonas de clima seco o húmedo (bosque seco tropical [bs. -T], bosque húmedo tropical [bh-T] y bosque húmedo premontano [bh-PM]), entre 0 y 1.100 m s. n. m. Se desarrolla en zonas con temperatura media de 25 °C, lluvia



anual de 1.250 mm a 4.000 mm y es exigente en luz. Prefiere suelos aluviales francos o arcillosos, medianamente fértiles, profundos y húmedos, pero no tolera inundaciones.

Usos

Basado en Brown et al. (2003) y Cordero & Boshier (2003). Tiene una importancia comercial muy grande por las características de su madera, de alta durabilidad natural, fácil trabajo y alta estabilidad dimensional. Con una densidad de $0,56 \text{ g cm}^{-3}$, se usa en ebanistería, construcción ligera, embarcaciones, instrumentos musicales, modelos y maquetas.

De su madera, corteza y semillas, se extraen tintes, taninos y aceites empleados en la industria cosmética y medicinal. Existen reportes de infusiones de su corteza y semillas para tratar diarrea y fiebre

Establecimiento y manejo

Basado en CAR (2019), Cárdenas (2016), Hincapié (2022) y Navarro (1999). En cuanto a la propagación, la semilla no es exigente en tratamientos pregerminativos. Se puede hacer la siembra directa en el germinador o bolsa, o someter las semillas a inmersión en agua a temperatura ambiente por 48 horas, para una germinación más uniforme. Las semillas tardan entre 10 y 20 días en germinar y las plántulas presentan crecimiento inicial rápido, aunque son susceptibles a las condiciones lumínicas. Por esta razón, se recomiendan condiciones de sombra o semisombra durante las etapas iniciales.

El trasplante a sitio de siembra definitivo se realiza cuando alcanzan entre 30 y 50 cm de altura, entre 4 y 6 meses después de la siembra. En sus primeros años de establecimiento requiere un nivel de sombra, que se reduce al madurar, etapa en la cual necesita abundante luz. En esta especie son muy importantes las labores de poda de formación, principalmente hasta los 3 o 4 años (Hincapié, 2022).

Limitaciones (plagas o enfermedades)

Basado en Bauer & Francis (1998), CAR (2019, Cárdenas (2016), Gómez et al. (2013), Jara (1993) y Lopes et al. (2008). La especie caoba tiene una susceptibilidad muy alta al ataque del insecto plaga barrenador del cogollo (*Hypsipyla grandella*), principalmente en los primeros años. Por esta razón, no se recomienda su siembra en plantaciones puras ni en altas densidades, sino en asociación con otras especies forestales, ya que una alta diversidad y una baja densidad de individuos contribuyen a una reducción importante de los ataques. De igual manera, es importante el monitoreo y control de la plaga mediante manejo integrado, incluida una adecuada nutrición del árbol. No se debe limpiar

totalmente el lote de arvenses, ya que esto concentra el ataque del barrenador en los árboles. Se recomienda practicar limpiezas locales (desyerbas selectivas por calles y plateos), podar y eliminar ramas afectadas y aplicar insecticida cuando se necesite.

Estado de conservación

De acuerdo con la Lista Roja de Especies Amenazadas de la UICN, para 2023 *S. macrophylla* estaba catalogada como En Peligro (EN A2acd). A nivel nacional se categoriza como En Peligro Crítico (CR A2cd) debido a la reducción de sus poblaciones naturales en más del 80 %.

Funciones en sistemas agroforestales

Basado en Cordero & Boshier (2003), Jiménez (2012) y Salgado (2012). Escenarios de manejo agroforestal permiten obtener entre 22 y 29,3 m³ ha⁻¹ de madera aserrada con un potencial de fijación de carbono de 11 mg ha⁻¹ a los 21 años y una densidad máxima alcanzable por especie de 100 árboles ha⁻¹ y 48 % de cultivo cubierto de sombra. Algunos estudios sugieren que en el bosque natural los árboles de caoba requieren 60 a 100 años para alcanzar la talla comercial, mientras que en plantaciones y sistemas agroforestales pueden necesitar la mitad de ese tiempo.



Cedro (*Cedrela odorata* L.)



Figura 9. Sistema agroforestal de cacao (*Theobroma cacao*) con cedro (*Cedrela odorata* L.), municipio de Convención, Norte de Santander.

Foto: Laura Dayana Escobar Pachajoa

Nombre científico: *Cedrela odorata* L.

Nombre común: cedro, cedro rojo, cedro rosado, cedro cebollo, cedro amargo (CAR, 2019).

Taxonomía

Familia: Meliaceae

Orden: Sapindales

Género: *Cedrela*

Especie: *C. odorata* L.

Descripción botánica

Basado en CAR (2019), Cárdenas (2016), Cárdenas et al. (2015), Cárdenas & Salinas (2007), Gómez et al. (2013), y Morales & Varón (2013). Árbol deciduo de gran porte con altura de máximo 40 m y diámetro de 200 cm.

Copa redondeada con amplitud promedio de 7 a 14 m. Tronco recto y cilíndrico con presencia de contrafuertes en la base de árboles de gran tamaño. Corteza externa fisurada de color pardo oscura o gris; en la parte interna fibrosa, rosada, que oxida a rojo pardo. Produce un exudado escaso y gomoso que brota en puntos aislados. Árbol con densidad alta de follaje, hojas compuestas y alternas, sin estípulas. Cada hoja se compone de siete a quince pares de folíolos opuestos, lanceolados, con ápice acuminado y borde entero (figura 9).

Flores blancas dispuestas en inflorescencias terminales agrupadas en racimos florales o panícula. Son unisexuales, con cuatro sépalos en forma de copa, corola con apariencia tubular y cinco pétalos angostos pubescentes, de 6 a 9 mm de longitud.

Fruto en cápsulas leñosa dehiscentes de forma oblonga elipsoidal y 4 a 7 cm de longitud, con coloración pardo-verdosa o marrón negro. Al madurar presenta lenticelas marrón claras y entre 30 y 40 semillas fértiles, aladas, de 0,5 cm de largo. Un kilo contiene de 32.000 a 50.000 semillas.

Fenología del cedro

La floración suele darse durante la transición de la temporada seca a la húmeda y los frutos maduran en la estación seca. Su follaje cae durante la estación seca, y si se desea implementar, es aconsejable asociarla con otras especies forestales no caducifolias en esa época. Esta práctica no solo aporta a la cobertura de sombra, sino también a la diversificación del sistema productivo, con efectos positivos sobre la regulación natural de plagas del cedro (ver más adelante en sección “Limitaciones (plagas o enfermedades)”).

Distribución y ecología

Basado en CAR (2019), Cárdenas et al. (2015) e Instituto Nacional de Bosques (INAB, 2019). El cedro se encuentra desde el norte de México hasta el norte de Argentina. En Colombia se localiza en casi todo el territorio, en formaciones de bosque seco tropical, bosque húmedo premontano y bosque húmedo tropical, distribuido en un rango altitudinal de 0 a 1.200 m s. n. m. Requiere suelos profundos, fértiles, bien drenados y aireados, ricos en fósforo, potasio y calcio; precipitación anual de 1200-2400 mm y temperatura media anual de 20-32 °C (figura 10).



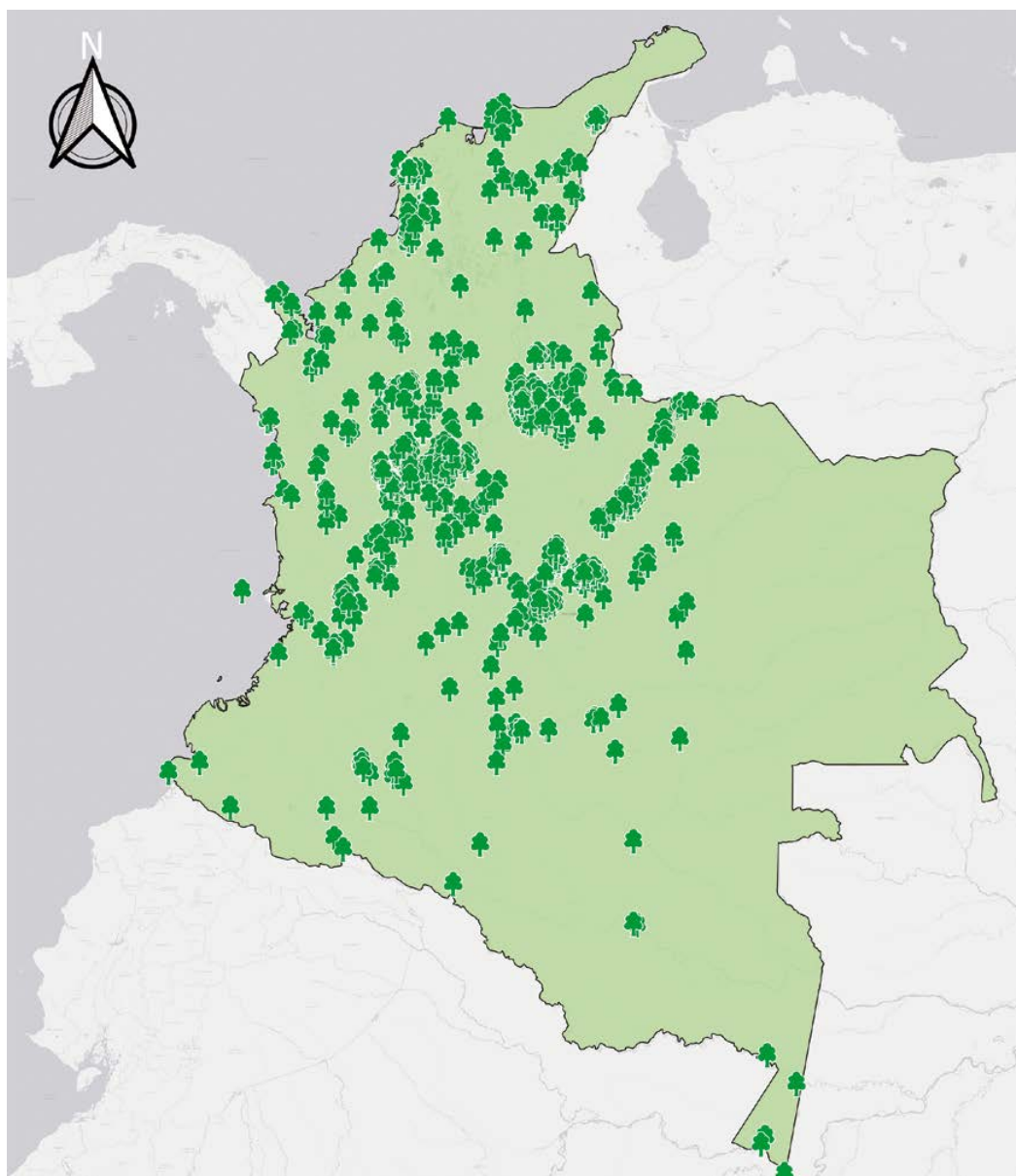


Figura 10. Mapa de la distribución del cedro (*Cedrela odorata*) en Colombia.

Fuente: GBIF (2025C)

Usos

Basado en Cárdenas et al. (2015) y Cordero & Boshier (2003). El cedro es una especie altamente valorada por su madera de alta calidad, de fácil trabajo, durable y fácil de secar; además es resistente al ataque de hongos e insectos. Con una densidad de $0,6 \text{ g cm}^{-3}$, se emplea en carpintería, en elaboración de muebles finos, botes, instrumentos musicales, artesanías y tableros de uso

general. Por otra parte, se ha reportado como un árbol melífero, empleado en cría de abejas para proveer néctar, polen y propóleos. También se registran propiedades medicinales como tónico, astringente, vermífuga, febrífuga y para tratar asma y artritis.

Establecimiento y manejo

Basado en Cárdenas et al. (2015), Cordero & Boshier (2003) e Hincapié (2022). La propagación de cedro mediante semilla se recomienda en camas de germinación con sustrato de textura arenosa, previamente desinfectado. Las semillas no requieren tratamiento pregerminativo, pero se recomienda la inmersión en agua a temperatura ambiente por 24 horas para que su germinación sea más rápida y uniforme. Esta ocurre entre seis y diez días después del trasplante a bolsas. Las plántulas permanecen en vivero de tres a cuatro meses.

En esta especie se recomiendan podas de formación durante los primeros cuatro años. En caso de presentarse el ataque del barrenador de cogollo, es aconsejable realizar podas fitosanitarias para eliminar las ramas afectadas.

Limitaciones (plagas o enfermedades)

Basado en CAR (2019), Cintron (1990), Escobar et al. (2007) y Toledo et al. (2008). El cedro pertenece a la familia Meliaceae y, como la caoba (*Swietenia macrophylla*), es susceptible al ataque de barrenador de cogollo (*Hypsiphila grandella*), que afecta su dominancia apical y compromete la forma del árbol. En este caso es importante tener en cuenta que en el área de siembra las condiciones de humedad no pueden ser muy altas, ya que esto implicaría un mayor riesgo de ataque. También es importante considerar una adecuada nutrición de las plantas para su óptimo crecimiento y un monitoreo y manejo integrado mediante labores de poda y eliminación de ramas afectadas.

La diversificación del SAF, mediante la asociación con otras especies forestales, puede ayudar a reducir los niveles de infestación, al generar una mayor heterogeneidad estructural y microclimática que dificulta el ciclo de vida de la plaga y la localización de los árboles susceptibles. Para el caso de sombrío de cacao (*T. cacao*), en Colombia se ha reportado la asociación de cedro con mónico negro (*Cordia gerascanthus*), roble (*Tabebuia* spp.), nogal cafetero (*Cordia alliodora*), cámbulo (*Erythrina* spp.), carbonero (*Albizia carbonaria*), guamos (*Inga* spp.), frijolito (*Schizolobium parahyba*), maíz (*Zea mays*), caña (*Saccharum officinarum*) y plátano (*Musa* spp.).



Estado de conservación

Basado en CAR (2019) y Cárdenas et al. (2015). Debido a la demanda de su madera a nivel mundial, las poblaciones de *C. odorata* se han visto afectadas. Actualmente se encuentra en la categoría de amenaza En Peligro (EN) según la UICN (CAR, 2019). En Colombia, corporaciones autónomas como la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de Bucaramanga (CDMB) prohíben el aprovechamiento de individuos de varias especies del género *Cedrela*. Sin embargo, existe una excepción para explotaciones forestales provenientes de SAF debidamente registrados (Acuerdo 887 del 28 de abril de 2000, citado en CAR, 2019).

Funciones en sistemas agroforestales

Basado en Gálvez et al. (2020). Con la integración en SAF se ha demostrado un mejor crecimiento y desarrollo del cedro, además de que provee sombrío, contribuye al ciclaje de nutrientes mediante la caída de sus hojas (que enriquecen el suelo al descomponerse) y favorece la biodiversidad como especie melífera y como hábitat para la fauna.

Roble (*Tabebuia rosea* [Bertol.] Bertero ex A. DC.)



Figura 11. Sistema agroforestal de cacao (*T. cacao*) con roble (*Tabebuia rosea*), municipio de Sardinata, Norte de Santander.

Foto: Laura Dayana Escobar Pachajoa

Nombre científico: *Tabebuia rosea* (Bertol.) Bertero ex A. DC.

Nombre común: roble, flor morado, roble sabanero, guayacán rosado, ocobo, cañaguate, apamate, chicalá.

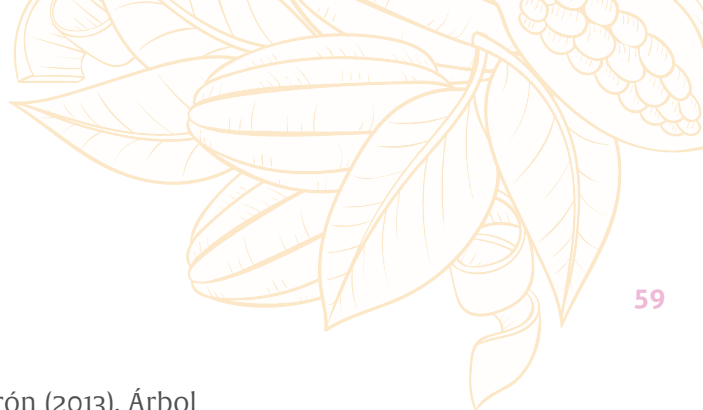
Taxonomía

Familia: Bignoniaceae

Orden: Lamiales

Género: *Tabebuia*

Especie: *T. rosea* (Bertol.) Bertero ex A. DC. 1845.



Descripción botánica

Basado en Cárdenas (2016), Gómez et al. (2013) y Morales & Varón (2013). Árbol caducifolio grande que puede alcanzar alturas de 40 m y diámetros de 100 cm. Copa ancha de forma ovalada, tronco cónico con ramificación simpódica que en la base puede presentar pequeños contrafuertes (figura 11). Corteza externa fisurada color gris oscura, que en su parte interna es laminada de color crema.

Follaje verde claro, con hojas compuestas y opuestas de 13 a 30 cm de longitud. Cada hoja se compone de cinco folíolos, lanceolados o elípticos con borde entero. Flores rosadas grandes de forma campanulada, agrupadas en panículas cortas. Fruto alargado en vaina que mide entre 22 y 38 centímetros de longitud. Contiene semillas aladas y delgadas de 2 a 3 cm de largo, entre 240 y 300 semillas por vaina.

Fenología del roble

Es una especie caducifolia que pierde sus hojas en época seca. Posterior a esto, ocurre la floración masiva, normalmente durante los periodos secos bien definidos. Los frutos maduran y las semillas se dispersan durante la estación seca (Calle & Murgueitio, 2020). El desarrollo de nuevos brotes y el crecimiento vegetativo se presentan con el inicio de la temporada de lluvias.

Distribución y ecología

Basado en Cárdenas (2016), Cárdenas et al. (2015), Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF, 1996), y Gómez et al. (2013).

Abarca desde el sur de México hasta el norte de Venezuela y del oeste de los Andes a las costas de Ecuador. Tiene un amplio rango altitudinal, de 0 a 2.000 m s. n. m. En Colombia se encuentra naturalmente en bosque seco tropical (bs-T), bosque húmedo tropical (bh-T), bosque húmedo premontano (bh-PM), bosque muy húmedo tropical (bmh-T) y bosque muy húmedo premontano (bmh-PM), con temperaturas superiores a 21 °C.

Habita bosques pantanosos o inundables y sitios planos; se encuentra en bosques de galería y también en potreros y tierras agrícolas abandonadas. Es capaz de desarrollarse en suelos pobres o degradados, siempre que haya suficiente humedad, y alcanza mejor desarrollo en suelos con textura franca, franco-arcillosa y franco-arenosa (figura 12).

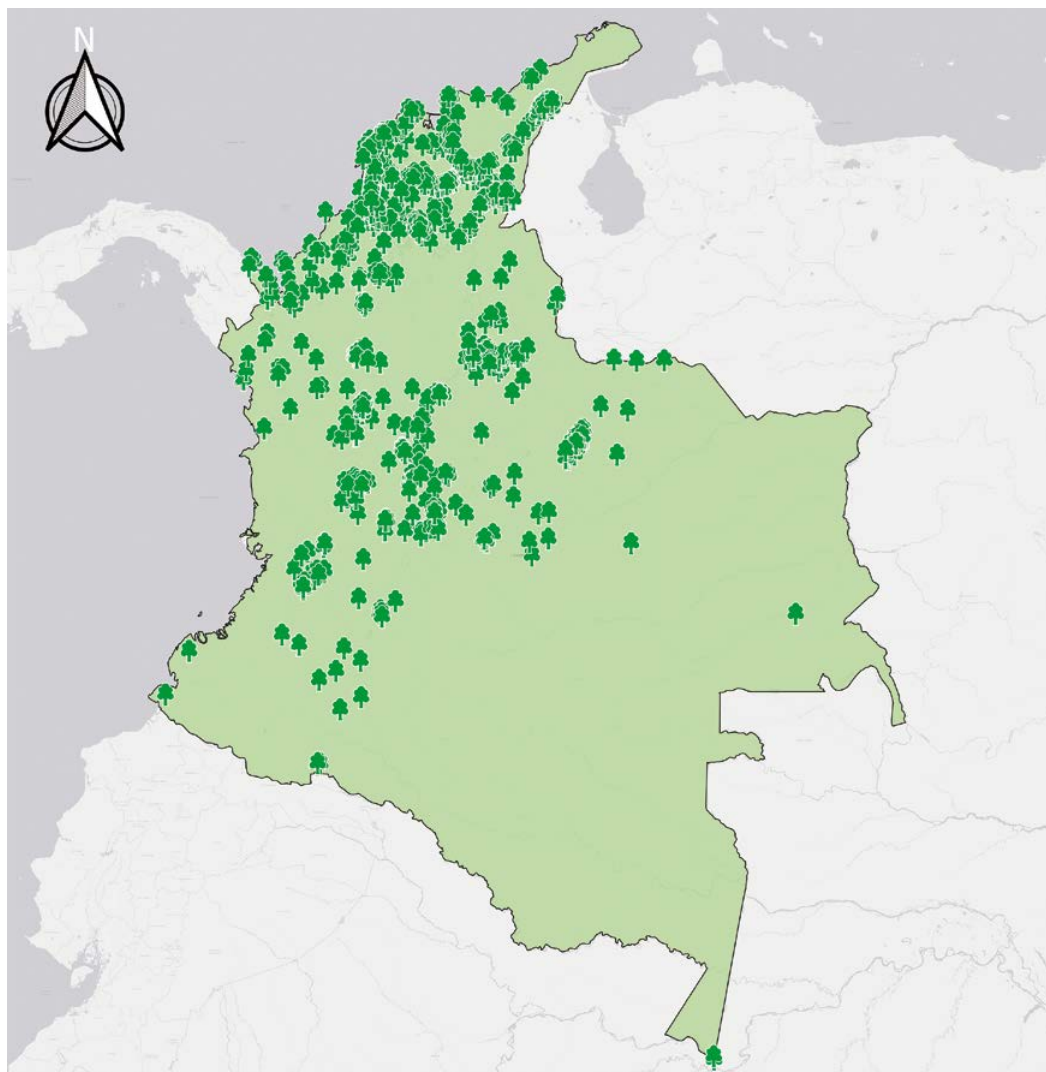


Figura 12. Mapa de la distribución del roble (*Tabebuia rosea*) en Colombia.

Fuente: GBIF (2025d)

Usos

El roble está categorizado como maderable. Se emplea en agroforestería, construcción y como ornamental. Su madera se utiliza en ebanistería fina y carpintería. Tiene una densidad de $0,61 \text{ g cm}^{-3}$. La corteza y las hojas se emplean medicinalmente y las flores se consideran en la apicultura. Es una especie usada en ornamentación y en procesos de restauración ecológica (Cárdenas, 2016).

Establecimiento y manejo

Basado en Cárdenas (2016), Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF, 1996) y Ospina et al. (2008). La germinación de la semilla varía según su estado fisiológico y las condiciones ambientales. La siembra se puede



realizar directamente en camas de germinación previamente desinfectadas. Se recomienda tratamiento pregerminativo mediante inmersión en agua a temperatura ambiente por 24 horas, para homogenizar germinación. Es aconsejable que los germinadores estén elevados del suelo, para evitar ataques del nematodo deformador de raíces y del hongo causante del mal de talluelo (*damping-off*).

La germinación inicia aproximadamente a los cinco días y puede extenderse hasta los 20. El trasplante a bolsas se recomienda cuando el primer par de hojas verdaderas está bien desarrollado, generalmente entre quince y 30 días después de la germinación. En ese momento se sugiere la aplicación de micorrizas para favorecer la simbiosis con las raíces y mejorar la absorción de agua y nutrientes.

Durante la fase en vivero se recomienda un aumento progresivo de la exposición a la luz, hasta el momento de traslado a campo, cuando alcanza entre 25 y 40 cm de altura. Para el establecimiento en campo se recomienda incorporar materia orgánica en el momento de siembra. El manejo posterior incluye al menos tres limpiezas durante el primer año; dos anuales en el segundo y tercer año, y una limpieza anual a partir del cuarto año.

Limitaciones (plagas o enfermedades)

En *T. rosea* es muy importante la desinfección del sustrato en las camas de germinación y vivero, para evitar el ataque de nematodos como *Meloidogyne incognita* y hongos que causan el mal del talluelo o *damping-off*. Por otro lado, ya en las plántulas juveniles es importante el monitoreo y control de la roya del roble (*Prospodium* sp.) (CONIF, 1996).

Estado de conservación

De acuerdo con La Lista Roja de la UICN, el roble no se considera en peligro. Está clasificado como una especie de Preocupación Menor (LC) debido a su amplia distribución geográfica y su capacidad para adaptarse a diferentes hábitats.

Funciones en sistemas agroforestales

El roble es una especie forestal de rápido crecimiento, característica clave en SAF de cacao, ya que permite establecer rápidamente el sombrío requerido por el cultivo. Además, su amplia adaptabilidad ecológica le permite desarrollarse en diversas condiciones, y esto lo convierte en un aliado para la recuperación de áreas degradadas. Su sistema radicular profundo contribuye a la extracción de nutrientes de capas profundas del suelo, mientras que la hojarasca favorece el reciclaje de nutrientes y el mantenimiento de la humedad del suelo. A largo plazo, la madera del roble representa una fuente potencial de ingresos adicionales para el productor (Cárdenas et al, 2015).

Nogal cafetero (*Cordia alliodora* [Ruiz & Pav.] Oken)



Figura 13. Sistema agroforestal de cacao (*T. cacao*) con nogal cafetero (*Cordia alliodora*) en el Centro de Investigación El Nus.

Foto: Edna Mompotes

Nombre científico: *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken

Nombre común: laurel, moho, nogal cafetero, pardillo, vara de humo.

Taxonomía

Orden: Boraginales

Familia: Boraginaceae

Género: *Cordia*

Especie: *C. alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken. (1833)





Descripción botánica

Basado en Calle & Murgueitio (2020), Cárdenas (2016), Gómez et al. (2013), y Morales & Varón (2013). Árbol de gran tamaño con altura máxima de 40 m y diámetro de 90 cm, de copa pequeña, estrecha y subpiramidal. Tronco cilíndrico muy recto, generalmente sin ramificaciones hasta en un 40 % de su altura total. Corteza externa finamente fisurada de color pardo grisáceo o pardo amarillento, cuya parte interna es laminada, fibrosa y de color amarillo (figura 13).

Hojas simples, alternas, elípticas u oblongas, de 9 cm de largo por 5 cm de ancho con borde aserrado. Flores agrupadas en panículas axilares o terminales de 5 a 15 cm de largo, sésiles o de color blanco-verdosas, que miden un centímetro de diámetro y tienen forma de campanilla. El fruto corresponde a una drupa pequeña y alada, de forma oval. Mide de 5 a 7 cm de largo con coloración marrón clara al madurar. Cada fruto contiene una semilla.

Fenología del nogal

Basada en Cervera et al. (2019) y Gómez (2010). *C. alliodora* inicia la floración en los meses de época seca. Investigaciones realizadas en la zona del valle cálido del Magdalena, en el municipio El Espinal (Tolima), reportan el inicio de floración de enero a febrero. Esta fase tiene una duración aproximada de cinco meses, desde que empieza la formación de botones florales hasta la caída del fruto. Durante marzo y abril se reporta caída del follaje.

Distribución y ecología

Basado en Cárdenas (2016), Gómez et al. (2013) y Vázquez et al. (1999). *C. alliodora* es una especie nativa de América Central y Suramérica. Se extiende desde el sur de México hasta las regiones tropicales de Suramérica. Se distribuye en zonas de bosque seco tropical (bs-T), bosque húmedo tropical (bh-T), bosque húmedo premontano (bhPM), bosque muy húmedo tropical (bmh-T) y bosque muy húmedo premontano (bmh-PM) (figura 14).

El crecimiento de esta especie se da en un amplio rango de condiciones. Se desarrolla muy bien en ambientes húmedos de 1.500 a 3.000 mm anuales, con temperaturas entre 18 y 25 °C. Es una especie heliófila exigente de luz, adaptable a suelos de distintas clases, desde arenosos, profundos e infértiles con poca materia orgánica, hasta altos y montañosos, volcánicos, profundos y fértiles, de alto contenido orgánico. No tolera bien suelos con mal drenaje. El nogal es una especie frecuente en áreas intervenidas, dominante en claros, bosques secundarios y potreros (figura 13).

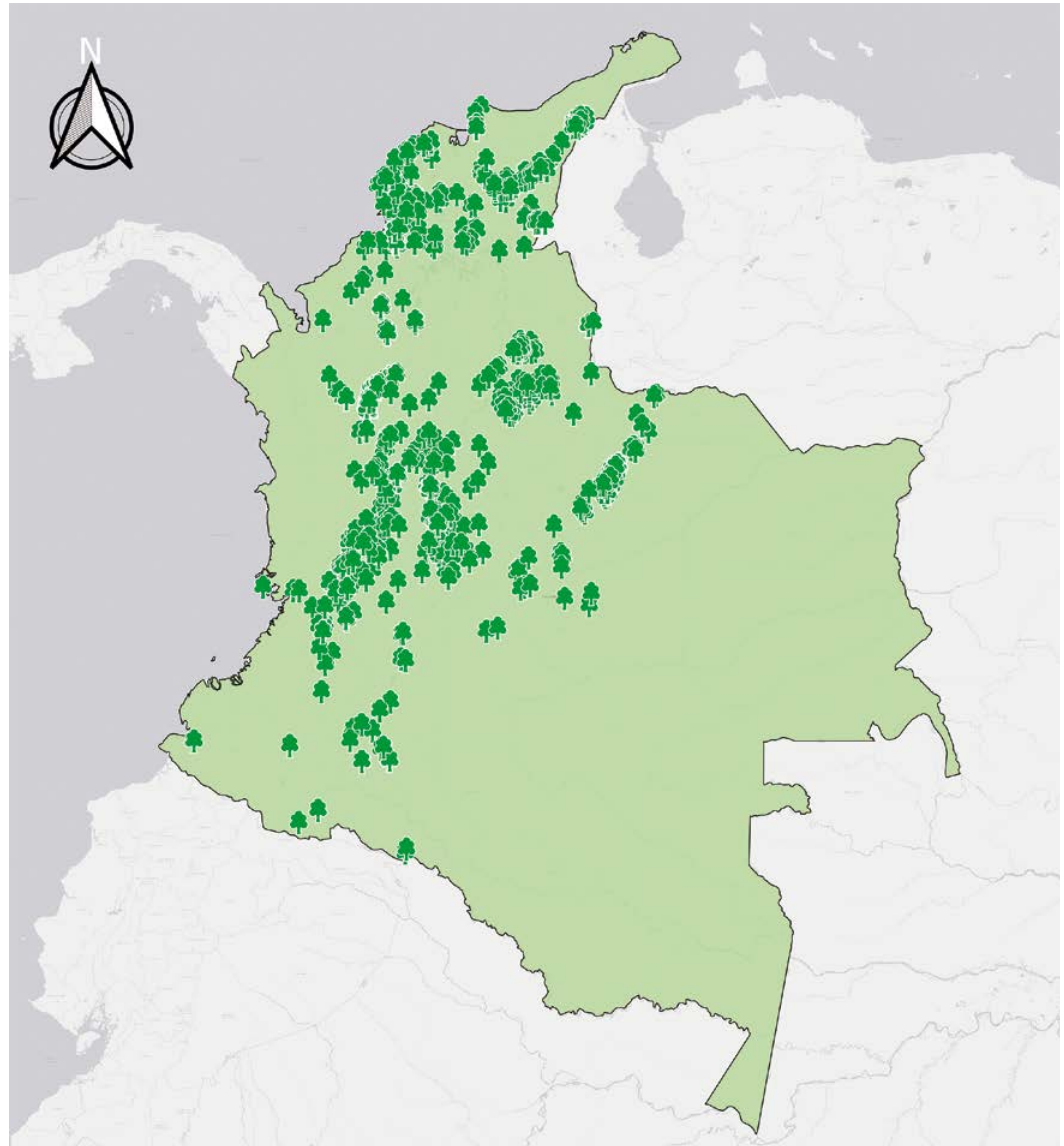


Figura 14. Mapa de distribución del nogal (*Cordia alliodora*) en Colombia.

Fuente: GBIF (2025e)

Usos

Basado en Comisión Nacional Forestal (Conafor, 2007), Universidad EIA (2014) y Vázquez et al. (1999). El uso principal del nogal es para madera, con una densidad de $0,46 \text{ g cm}^{-3}$. En ebanistería es valorado por su resistencia a la pudrición y al ataque de polillas. Aunque se considera blanda, su madera es fuerte y duradera, y se emplea en la fabricación de muebles finos, chapas decorativas y estructuras exteriores e interiores. También se utiliza en trabajos artesanales y en la elaboración de implementos como mangos de herramientas.



En el ámbito medicinal, se ha reportado el uso de la semilla pulverizada para elaborar ungüentos dirigidos a tratar enfermedades cutáneas. La infusión de las hojas sirve como tónico o para tratar enfermedades pulmonares. Además, sus flores son valiosas en apicultura y sus rasgos funcionales permiten su uso en agroforestería.

Establecimiento y manejo

Basado en Cárdenas (2016), CONIF (1996), Gómez et al. (2013) e Hincapié (2022). La propagación por semilla presenta un tiempo promedio de germinación de 15 a 25 días. Esta especie no requiere tratamiento pregerminativo; sin embargo, se recomienda sembrar las semillas frescas para favorecer el tiempo de la germinación. Esta puede realizarse en almácigos, a temperaturas de 24 a 30 °C, con un sustrato de buen drenaje. Se ha reportado que un sombreado de hasta 60 % en el almácigo puede favorecer el proceso.

El trasplante de plántulas a bolsas se debe hacer cuando la planta haya desplegado el primer par de hojas verdaderas. Esto ocurre de 20 a 30 días después de la germinación. El trasplante definitivo a campo se recomienda cuando las plantas alcanzan alturas de 20 a 30 cm, aproximadamente entre 4 y 5 meses en vivero.

C. alliodora también se puede propagar por estacas de 12 y 20 cm de largo, con desinfección del material, aplicación del enraizador y revisión del sustrato para que tenga buen drenaje. El manejo del nogal incluye labores de plateo y limpias frecuentes. Durante el primer año de establecimiento se recomienda realizar tres limpias, dos en el segundo y tercer año, y una limpieza anual a partir del cuarto año.

Esta especie presenta una gran ventaja en su manejo debido a que se poda por sí misma. Sin embargo, es importante monitorear el crecimiento durante los primeros años y apoyar la poda cuando sea necesaria, para garantizar un fuste libre de nudos hasta los 8 o 10 m de altura. Cuando los árboles son adultos, y según nivel de sombra proyectado sobre el cacao, pueden podarse una o dos veces al año, generalmente hasta los dos tercios de la altura total del árbol, con el fin de reducir competencia por luz.

Limitaciones (plagas o enfermedades)

Basado en Cárdenas (2016) e Hincapié (2022). El nogal es susceptible al cáncer de tronco causado por el hongo *Puccinia cordiae*, especialmente con exceso de humedad en el suelo, y por esta razón se deben evitar encharcamientos. En su etapa juvenil puede ser atacado por la hormiga arriera (*Atta* sp.), el chinche de encaje (*Dictyla monotropidia*) y el coleóptero *Amblycerus* sp. Para el manejo

de este chinche, se recomienda eliminar las hojas afectadas, así como hacer control biológico mediante la aplicación de hongos entomopatógenos como *Beauveria bassiana* y *Metarhizium anisopliae* en el envés de las hojas.

Estado de conservación

De acuerdo con la Lista Roja de la UICN, *C. alliodora* no se encuentra categorizada como una especie amenazada o en peligro. Esto se relaciona con su amplia distribución geográfica debido a su capacidad para adaptarse a diferentes condiciones ambientales, incluidas áreas perturbadas.

Funciones en sistemas agroforestales

Basado en Cárdenas (2016) e Hincapié (2022). El nogal es una especie con características funcionales que lo hacen altamente compatible con SAF. Presenta rápido crecimiento y porte alto, lo cual facilita la estratificación del sistema productivo para proteger al cultivo de cacao del exceso de radiación. Se caracteriza por una copa abierta y poco densa que proyecta una sombra rala. Una ventaja adicional es que presenta autopoda.

Su sistema radicular profundo permite aprovechar nutrientes de capas inferiores del suelo y reduce la competencia con cultivos de raíces superficiales. Su hojarasca contribuye a la incorporación de materia orgánica y mejora la fertilidad del suelo. Además, su capacidad de rebrote facilita labores de manejo como podas y aclareos. Presenta buena adaptabilidad a diferentes condiciones agroecológicas y su madera, de valor comercial, ofrece una alternativa de ingreso a mediano o largo plazo, lo cual contribuye al enfoque productivo y sostenible de los SAF.





Capítulo V



Sistemas agroforestales: aplicaciones en bioprospección y fitorremediación para una agricultura sostenible

La agricultura moderna enfrenta desafíos cada vez más complejos, como la degradación de suelos, la pérdida de biodiversidad y la presión por incrementar la productividad sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas. En este contexto, los SAF emergen como una alternativa prometedora de producción agrícola, al combinar árboles y arbustos con cultivos agrícolas en un mismo espacio para maximizar la productividad y restaurar la salud del suelo y la biodiversidad. Sin embargo, más allá de sus beneficios ecológicos y sociales, los SAF también ofrecen aplicaciones innovadoras en bioprospección y fitorremediación. La bioprospección permite identificar y aprovechar compuestos químicos con potencial agronómico, farmacéutico e industrial, mientras que la fitorremediación contribuye a descontaminar suelos y aguas mediante el uso de especies vegetales. Por esta razón, los SAF pueden integrar estas estrategias para promover una agricultura más resiliente y sustentable (Atangana et al., 2014; Fahad et al., 2022; Verma et al., 2021; Zhu et al., 2019).

Bioprospección

Es la exploración sistemática de la biodiversidad para identificar compuestos con propiedades útiles para la agricultura y otras industrias. En los SAF, la interacción entre especies crea un entorno óptimo para la producción de metabolitos secundarios con propiedades antifúngicas, insecticidas, bioestimulantes y antioxidantes (Verma et al., 2021).

La producción de compuestos químicos en SAF incluye metabolitos secundarios, aceites esenciales, resinas y otros compuestos bioactivos, de gran interés comercial por sus propiedades medicinales, aromáticas y plaguicidas. Estos compuestos pueden obtenerse de especies vegetales cultivadas en SAF como árboles medicinales, plantas aromáticas y especies con propiedades biocidas. Integrar estas prácticas en la agricultura no solo diversifica los ingresos de los productores, sino que también crea un vínculo con la producción agrícola sostenible y le aporta innovación (Devappa et al., 2015).

Este capítulo aborda las oportunidades y los retos derivados de los SAF para la producción de compuestos químicos. Aquí se exploran desde el tipo de especies vegetales con mayor potencial, hasta las técnicas de extracción y comercialización más innovadoras, así como los beneficios potenciales de integrar estas prácticas en la agricultura. Se busca presentar una perspectiva integral sobre el modo como estos sistemas pueden transformar la agricultura actual en un modelo más sustentable y rentable, que responda a las demandas de un mercado global que busca productos naturales y responsables con el



medio. Sin embargo, es importante mencionar que la elección del tipo de SAF depende de los objetivos del productor, las características del terreno, el clima y la biodiversidad local.

Producción de compuestos químicos en SAF

Los compuestos químicos obtenidos de plantas y árboles agroforestales se clasifican en varias categorías, incluidos metabolitos secundarios, aceites esenciales, resinas, alcaloides, flavonoides y fenoles. Estos compuestos son utilizados en múltiples sectores, como el farmacéutico, el agrícola y el cosmético. La producción de compuestos químicos en SAF es un enfoque innovador que permite obtener productos naturales de alto valor agregado, provenientes de plantas y árboles con propiedades bioactivas. Estos compuestos, conocidos como *metabolitos secundarios*, no solo cumplen funciones ecológicas en la defensa de las plantas, sino que también poseen un alto interés comercial en las industrias farmacéutica, cosmética, alimentaria y agrícola (Devappa et al., 2015).

Metabolitos secundarios

Los metabolitos secundarios son compuestos orgánicos no esenciales para el crecimiento de las plantas, pero cruciales para su supervivencia. Se sintetizan en respuesta a factores de estrés, como ataques de patógenos o herbívoros, y condiciones climáticas adversas. En los SAF, donde existe una alta biodiversidad, las plantas y árboles producen una amplia gama de metabolitos secundarios debido a la constante interacción entre especies y la necesidad de adaptación (Diallo, 2013; Elhamouly et al., 2022; Peter, 2018). Los siguientes son los principales tipos de metabolitos secundarios de interés en SAF:

Alcaloides: compuestos nitrogenados que suelen tener efectos farmacológicos importantes. Tienen aplicaciones en medicamentos para el tratamiento de enfermedades crónicas, analgésicos y agentes terapéuticos en oncología. Ejemplos de alcaloides son la quinina (extraída de *Cinchona* spp.), la cafeína y la nicotina (Mondal et al., 2019). En agricultura, estos compuestos pueden tener actividad antimicrobiana y bioestimulante que favorece el crecimiento de los cultivos (Othman et al., 2019).

Flavonoides y fenoles: compuestos antioxidantes que protegen a las plantas de la radiación ultravioleta, con propiedades antiinflamatorias y anticancerígenas. Son ampliamente utilizados en la industria cosmética y de suplementos nutricionales. Ejemplos de plantas que producen flavonoides

son el té verde (*Camellia sinensis*) y los cítricos (Zhang et al., 2011). En especies nativas maderables (*Cedrela odorata* y *Cariniana pyriformis*) se han identificado taninos que pertenecen al grupo de fenoles. Para aplicaciones agrícolas estos compuestos promueven la defensa natural y mejoran la resistencia al estrés ambiental. Además, los taninos tienen potencial en aplicaciones agrícolas como bioestimulantes o agentes de control biológico, lo cual los hace relevantes en el contexto de prácticas agroecológicas y SAF sostenibles (Laoué et al., 2022).

Terpenoides: responsables de los aromas y sabores en muchas plantas, con propiedades antimicrobianas e insecticidas, útiles en la fabricación de pesticidas naturales y aromatizantes. También tienen aplicaciones en productos de higiene y limpieza. Ejemplos de terpenoides son el limoneno y el farneseno, ambos presentes en SAF de *C. odorata*, y el mentol en cítricos o menta. En agricultura estos compuestos tienen aplicaciones como controladores y repelentes de plagas, con potencial uso en biopesticidas (Peter, 2018).

Aceites esenciales: son mezclas de compuestos volátiles extraídos principalmente de hojas, flores y raíces, con alto valor en la industria de fragancias, cosméticos y productos de limpieza. Estos aceites también se usan como agentes antimicrobianos y repelentes naturales de insectos. En los SAF, es común encontrar especies de árboles y plantas aromáticas, como eucalipto (*Eucalyptus globulus*), laurel (*Laurus nobilis*), romero (*Salvia rosmarinus*) y citronela (*Cymbopogon nardus*), que producen aceites esenciales aprovechables comercialmente. Además, su cultivo en un sistema mixto contribuye a la biodiversidad y la resistencia de los cultivos contra plagas (Octavia et al., 2024; Valdivieso-Ugarte et al., 2019).

Resinas y gomas: son secreciones producidas por algunos árboles como respuesta a daños mecánicos o infecciones. Tienen propiedades adhesivas, antioxidantes y antimicrobianas, por lo que son valiosos en la industria farmacéutica, alimentaria y de materiales. Ejemplos destacados son la goma arábiga, producida por especies de *Acacia*, y el incienso, derivado de árboles de *Boswellia*. La cosecha sostenible de resinas y gomas en SAF representa una fuente de ingresos adicional para los agricultores y contribuye a la conservación de especies nativas (Prasad et al., 2014, 2019).

Otros compuestos bioactivos: los SAF permiten la producción de otros bioactivos de interés, como saponinas y glucósidos. Estos compuestos tienen propiedades medicinales y son utilizados en la formulación de medicamentos, biopesticidas y suplementos dietéticos. Las saponinas, obtenidas de árboles como el castaño (*Aesculus hippocastanum*), tienen propiedades astringentes y antioxidantes, útiles en tratamientos dermatológicos y productos cosméticos (Verma et al., 2021). En aplicaciones agrícolas, las que se extraen de *Sapindus saponaria* han demostrado eficacia como bioplaguicidas naturales al causar alta mortalidad en plagas, lo que respalda su uso potencial como alternativa a los pesticidas sintéticos (Qasim et al., 2020).





Métodos de extracción y procesamiento

Para obtener estos compuestos, es esencial contar con técnicas de extracción eficientes y sostenibles (Garavand et al., 2019; Sridhar et al., 2021; Usman et al., 2022). Algunos de los métodos más utilizados en la extracción de compuestos químicos en SAF son los siguientes:

Extracción con solventes: técnica convencional que utiliza solventes orgánicos como etanol o hexano para extraer compuestos específicos. Si bien es eficaz, el uso de solventes puede tener un impacto ambiental, por lo que se busca optimizar el uso de solventes naturales o métodos alternativos.

Extracción supercrítica: utiliza dióxido de carbono en condiciones de alta presión para extraer compuestos bioactivos sin el uso de solventes tóxicos. Este método permite obtener extractos puros y es respetuoso con el medio ambiente, lo cual es ideal para SAF en los que se promueve la sostenibilidad.

Destilación por arrastre de vapor: técnica común para obtener aceites esenciales, donde el vapor de agua ayuda a liberar los compuestos volátiles de la planta sin descomponerlos.

Bioteología vegetal: el uso de cultivos de células y tejidos vegetales en laboratorio permite la producción de compuestos específicos sin la necesidad de cosechar plantas completas, lo que reduce el impacto ambiental y favorece la sostenibilidad.

Beneficios de la producción de compuestos químicos en sistemas agroforestales

La integración de la producción de compuestos químicos en SAF ofrece varios beneficios:

- 1. Diversificación de ingresos:** los agricultores pueden obtener ingresos adicionales mediante la venta de extractos y aceites esenciales, lo cual diversifica sus fuentes de recursos y reduce su dependencia de cultivos básicos (Klimas et al., 2012; Park et al., 2023).
- 2. La cosecha sostenible de resinas y gomas en SAF** representa una fuente adicional de ingresos para los agricultores y contribuye a la conservación de especies nativas (Prasad et al., 2014, 2019).

Fitorremediación

Estrategia basada en el uso de plantas para remover, transferir, eliminar, estabilizar o degradar contaminantes (orgánicos e inorgánicos) del suelo, lodos y sedimentos. En los SAF, esta técnica es clave para mantener la fertilidad del suelo y reducir la acumulación de metales pesados y residuos agroquímicos. Los mecanismos de fitorremediación incluyen fitoextracción, fitoacumulación, fitodegradación, fitoestabilización, fitoestimulación y fitovolatilización (Wei et al., 2021; Yan et al., 2020).

Durante la fitoextracción, las plantas absorben los contaminantes a través de sus raíces y hojas, donde también pueden acumularse (fitoacumulación) o ser traslocados hasta tallos y frutos. En la fitoestabilización, las plantas limitan la movilidad y biodisponibilidad de los contaminantes del suelo. Los químicos que producen las raíces no solo pueden formar compuestos con estos contaminantes, inmovilizándolos, sino que también favorecen la actividad de los microorganismos del suelo (fitoestimulación), lo que permite degradarlos, retenerlos en la interfase raíz-suelo y generar fitoacumulación. Por su parte, la fitodegradación consiste en las interacciones del contaminante con compuestos del metabolismo vegetal, ya que las plantas pueden secretar enzimas que catalizan sustancias tóxicas y las convierten en compuestos menos peligrosos. Finalmente, la fitovolatilización consiste en la liberación de contaminantes del suelo a la atmósfera a través de la transpiración de las plantas, luego de haberse producido varios de los mecanismos anteriormente mencionados (Wei et al., 2021; Yan et al., 2020). En la figura 15 se muestra una imagen de estos mecanismos en los SAF.



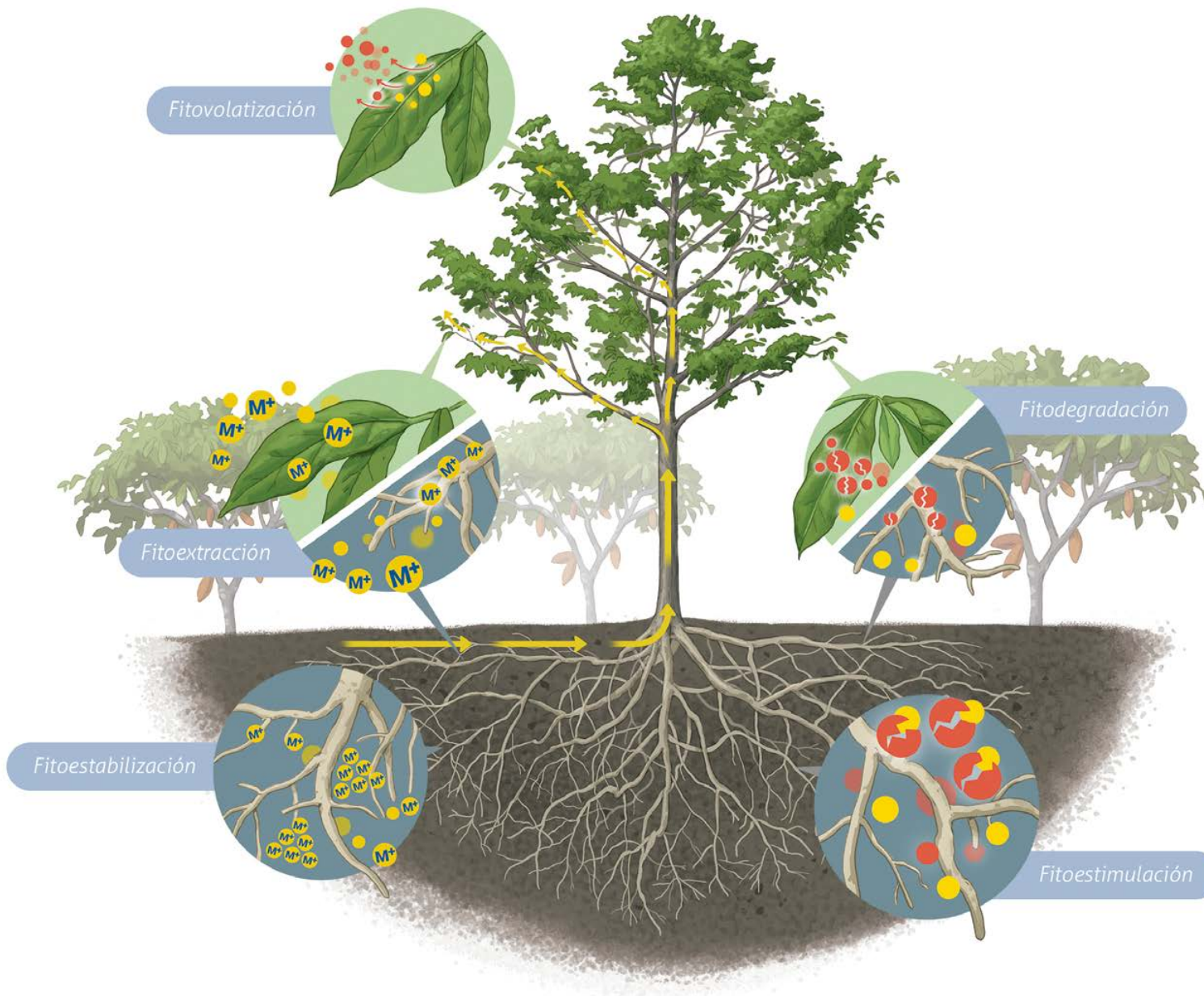


Figura 15. Mecanismos de fitorremediación.

Fuente: Elaboración propia con base en Pérez Hernández et al. (2024)

Los SAF pueden actuar como fitorremediadores (Delgadillo-López et al., 2011) naturales de contaminantes, ya que tienen la capacidad de tolerar altas concentraciones de contaminantes presentes en el suelo. Esta adaptación le permite a la planta extraer, traslocar y compartimentalizar grandes concentraciones de elementos tóxicos en sus tejidos, y así reducir su disponibilidad para cultivos agroindustriales (Pizarro et al., 2016).

Los árboles son ideales como alternativa de remediación a largo plazo. El uso de plantas acumuladoras o especies nativas con resistencia a los efectos tóxicos de contaminantes específicos es una posibilidad para la descontaminación de suelos (Olajire-Ajayi et al., 2025). Estas plantas presentan un sistema radicular muy extenso que se desarrolla en diferentes estratos, y potencialmente garantizan una extracción más eficiente. Asimismo, algunas especies consideradas fitoextractoras de contaminantes tienen la capacidad de interactuar, en una relación mutualista, con microorganismos, bacterias fijadoras de nitrógeno u hongos micorrízicos arbusculares, los cuales facilitan su adaptación a suelos altamente contaminados (Oros-Ortega et al., 2020).

Casos de estudio

En cuanto a la bioprospección, tenemos a *Gliricidia sepium*, con flavonoides y saponinas de actividad bioinsecticida. También *Erythrina* spp. es rica en alcaloides con potencial fitofarmacéutico (Zahawi, 2005). En aplicaciones agrícolas, se ha evaluado la actividad insecticida de la saponina del té (*tea saponin*) contra *Ectropis obliqua*, una plaga de este cultivo. Este estudio se destaca por su enfoque integral, que combina ensayos de laboratorio, aplicaciones tópicas y pruebas en campo para evaluar la eficacia y el impacto de dicha saponina. La conclusión final es que podría ser una alternativa efectiva y ecológica para manejar plagas agrícolas en cultivos de té, ya que también se minimizó el impacto sobre organismos benéficos y la salud del ecosistema (Zeng et al. 2018).

Para la parte de biorremediación, algunas investigaciones han demostrado que ciertas especies de alta biomasa muestran tolerancia a metales pesados. Especies arbóreas como *Salix viminalis* y *Populus tremula* son adecuadas para la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. Este estudio evaluó su respuesta en ecosistemas modelo, analizando fotosíntesis, transpiración y acumulación de metales. Se probó el impacto del pH del suelo y de la lluvia acidificada, y se encontró que los metales reducen la fotosíntesis en *P. tremula*, pero no afectan la respiración oscura. *S. viminalis* mostró mayor tolerancia, y ambos almacenaron metales en el follaje envejecido. Se corroboró que los metales afectan la estructura foliar, pero no se confirmaron otros efectos esperados (Hermle et al., 2007).





Otro estudio más reciente muestra cómo especies forestales como *Cariniana pyriformis* y *Terminalia superba* presentan un alto potencial de fitorremediación de cadmio en suelos contaminados, debido a su capacidad para tolerar altas concentraciones del metal y acumularlo parte en los tallos. Estas especies potencialmente pueden ser utilizadas en SAF de cacao para reducir la presencia de cadmio en el suelo y, por ende, en las semillas. Así se contribuye a mejorar la sostenibilidad y seguridad de la producción de cacao en áreas afectadas por esta contaminación (Carvalho et al., 2025).

Integración de bioprospección y fitorremediación en SAF

El diseño de SAF que incorpora especies con potencial bioprospectivo y fitorremediador ofrece múltiples beneficios:

- **Mayor sostenibilidad agrícola:** al reducir la dependencia de agroquímicos y mejorar la calidad del suelo.
- **Generar valor agregado:** mediante la obtención de compuestos de alto interés comercial.
- **Mejorar la resiliencia climática:** gracias al mantenimiento de la biodiversidad y la estabilidad del ecosistema.

Retos y oportunidades

A pesar de sus ventajas, los SAF enfrentan retos importantes. Es necesario implementar diferentes estudios científicos que permitan caracterizar los SAF y evaluar su potencial para la bioprospección y la fitorremediación. Además, es fundamental comprender el marco normativo vigente, ya que la aplicación de procesos bioprospectivos está sujeta a regulaciones específicas. Estas normas determinan el acceso a mercados y a posibilidades de comercialización

Conclusiones

Los SAF representan una solución innovadora frente a los desafíos de la agricultura moderna, al combinar la producción sostenible con estrategias avanzadas de bioprospección y fitorremediación. La selección adecuada de especies permite mejorar la productividad, conservar los recursos naturales y reducir los impactos negativos del cambio climático. La investigación y la aplicación de estos enfoques fortalece el desarrollo de una agricultura más sustentable y eficiente. Abren nuevas oportunidades para hacer de los SAF un modelo productivo sostenible y económicamente rentable por sus múltiples beneficios.





Capítulo VI



Incidencia del cambio climático en los costos de producción del SAF de cacao

Los costos de producción de un SAF de cacao están conformados por costos fijos y variables. Los fijos se generan independientemente de la producción, es decir, se mantienen constantes a lo largo de los procesos de producción. Por su parte, los costos variables se relacionan directamente con la productividad y varían en función del rendimiento (Graue Russek, 2009). Sin embargo, el SAF de cacao está expuesto a la variabilidad climática y factores dinámicos del ecosistema, lo cual hace que ciertos costos inicialmente considerados como fijos se transformen en variables, no tanto por la producción, sino por factores exógenos.

Asimismo, en el proceso de establecimiento del sistema, se identifican inversiones necesarias. Entre ellas se encuentran las unidades para fermentación y secado del grano de cacao, que pueden corresponder a cajones fermentadores, secadores o casas elba (figura 16).

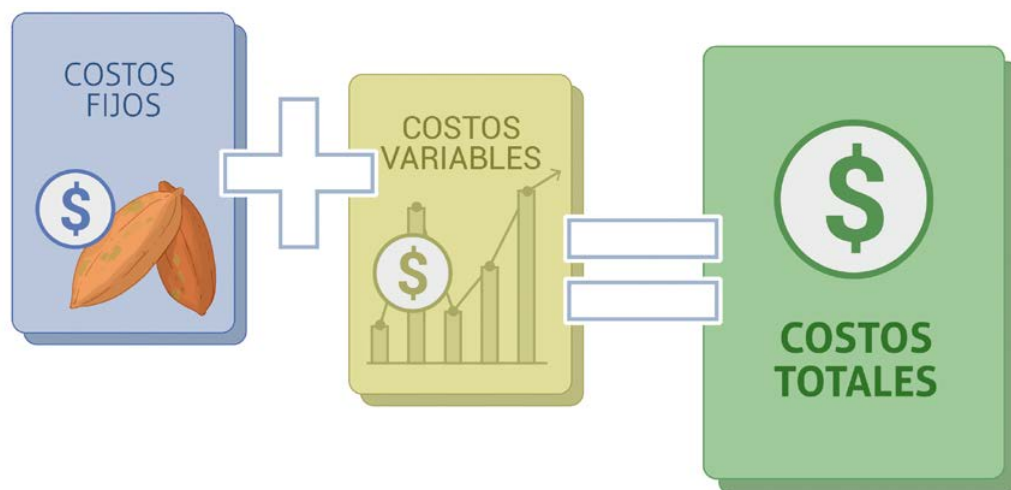


Figura 16.
Composición de
costos totales.

Fuente:
Elaboración propia

Por lo tanto, considerando los costos y la producción, las fincas deben proyectarse como una empresa y llevar un manejo adecuado de sus costos e ingresos, lo cual permite a los productores realizar un correcto seguimiento y mejorar la calidad de vida de sus participantes (figura 17).



Figura 17. La finca
como una empresa.

Fuente:
Elaboración propia

Dentro de los costos de producción de un SAF de cacao, se identifican algunos rubros que pueden verse fuertemente afectados por la variabilidad climática. La mano de obra y el material vegetal pueden verse alterados en temporadas de lluvia excesiva o de sequía, debido a la necesidad de aumentar la resiembra cuando las plantas no logran fijarse adecuadamente en el terreno (figura 18).



Figura 18. Incidencia en las labores del fenómeno de El Niño.

Fuente: Elaboración propia

En temporadas de lluvias abundantes se incrementan las labores de control fitosanitario para reducir la incidencia de plagas y enfermedades. Por el contrario, en temporadas de sequía fuerte, la incidencia de plagas y enfermedades puede disminuir; por lo tanto, se mantienen constantes las prácticas culturales de control fitosanitario (figura 19).

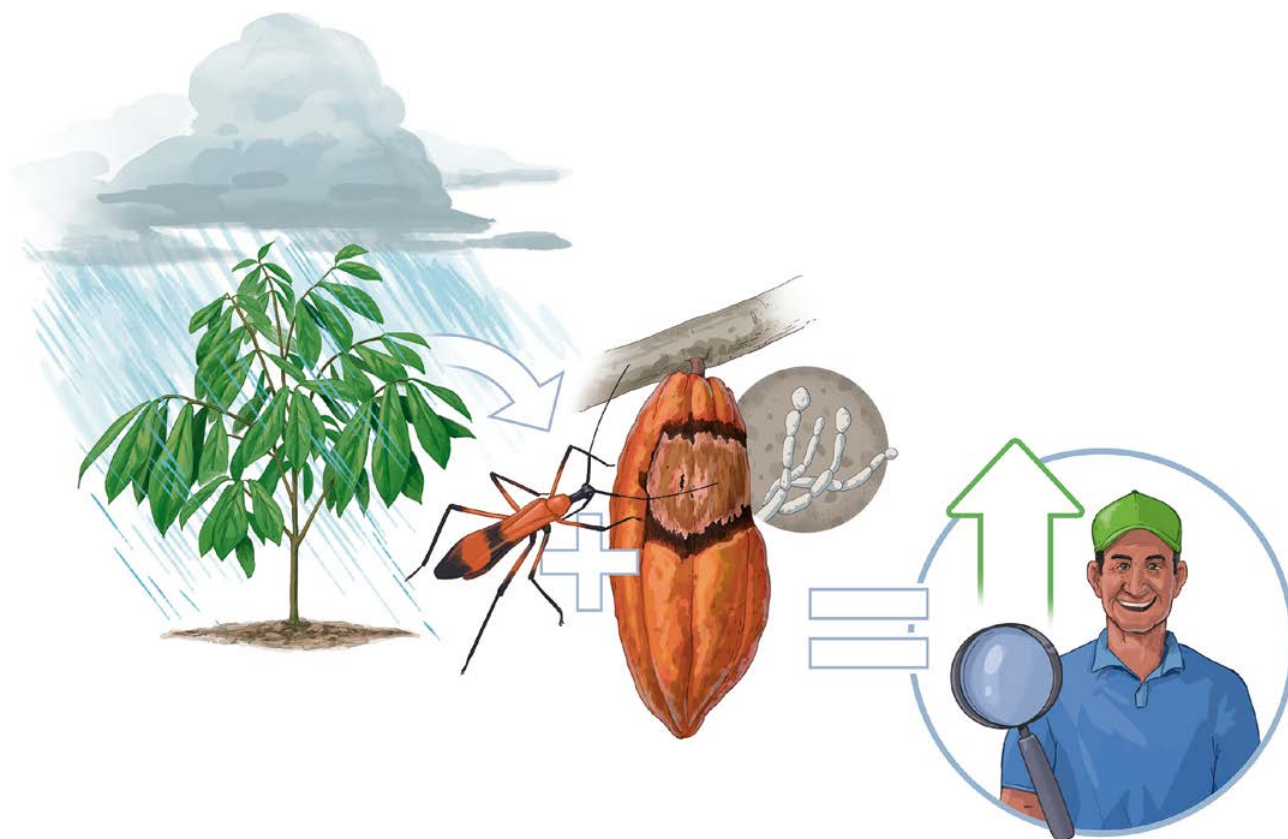


Figura 19. Incidencia en las labores del fenómeno de La Niña.

Fuente: Elaboración propia

Igualmente, la aplicación de fertilizantes en cacao o plátano puede variar según el fenómeno climático. Por ejemplo, durante una sequía intensa, la aplicación de estos productos puede aumentar con el fin de reducir los efectos sobre la productividad de las plantas. En cuanto al transporte para la comercialización de cacao y plátano, las afectaciones climáticas pueden aumentar los costos de transporte debido a las afectaciones de las vías rurales, en especial en época de lluvias.

Debido a estos efectos del clima sobre el cultivo del cacao, se han planteado diferentes estrategias para enfrentarlos:

Recomendaciones para La Niña

1. Revisar y adecuar el sistema de drenaje (canales principales y secundarios) para garantizar la adecuada evacuación del exceso de aguas y evitar encharcamientos dentro de los lotes. Esto implica más mano de obra para construir y mantener los canales de drenaje (figura 20).



Figura 20. Establecimiento de drenajes.

Fuente: Elaboración propia

2. Aumentar la frecuencia de monitoreo de síntomas y signos de enfermedades para evitar la dispersión de las plagas. Esta actividad demanda más tiempo de observación y registro (figura 21).

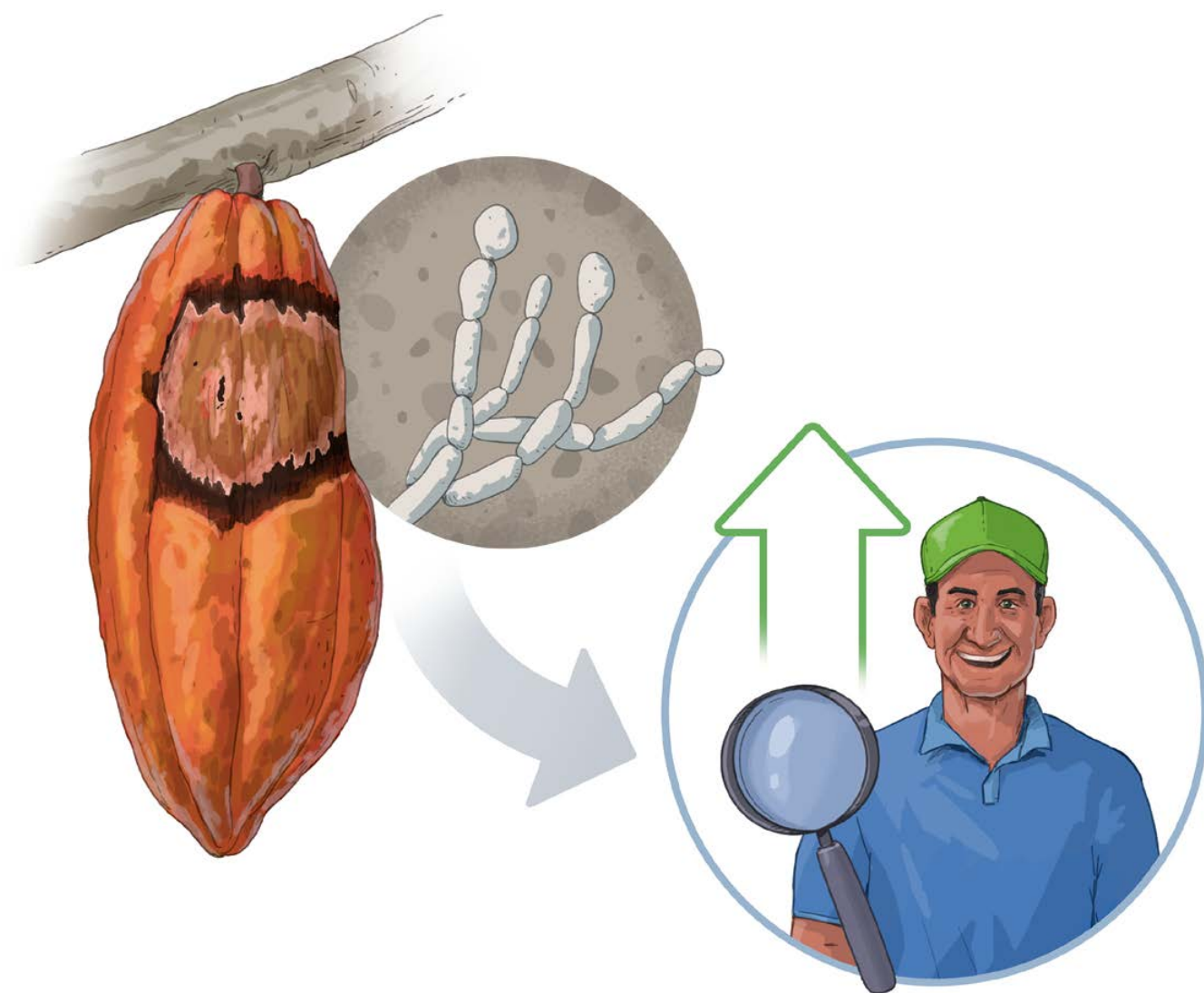


Figura 21. Mayor monitoreo de plagas y enfermedades.

Fuente: Elaboración propia

3. Realizar un manejo adecuado y frecuente de arvenses o malezas, conservando especies de cobertura que protejan el suelo y disminuyan las pérdidas por erosión y escorrentía. Esto puede provocar un incremento de las labores de control de malezas (figura 22).

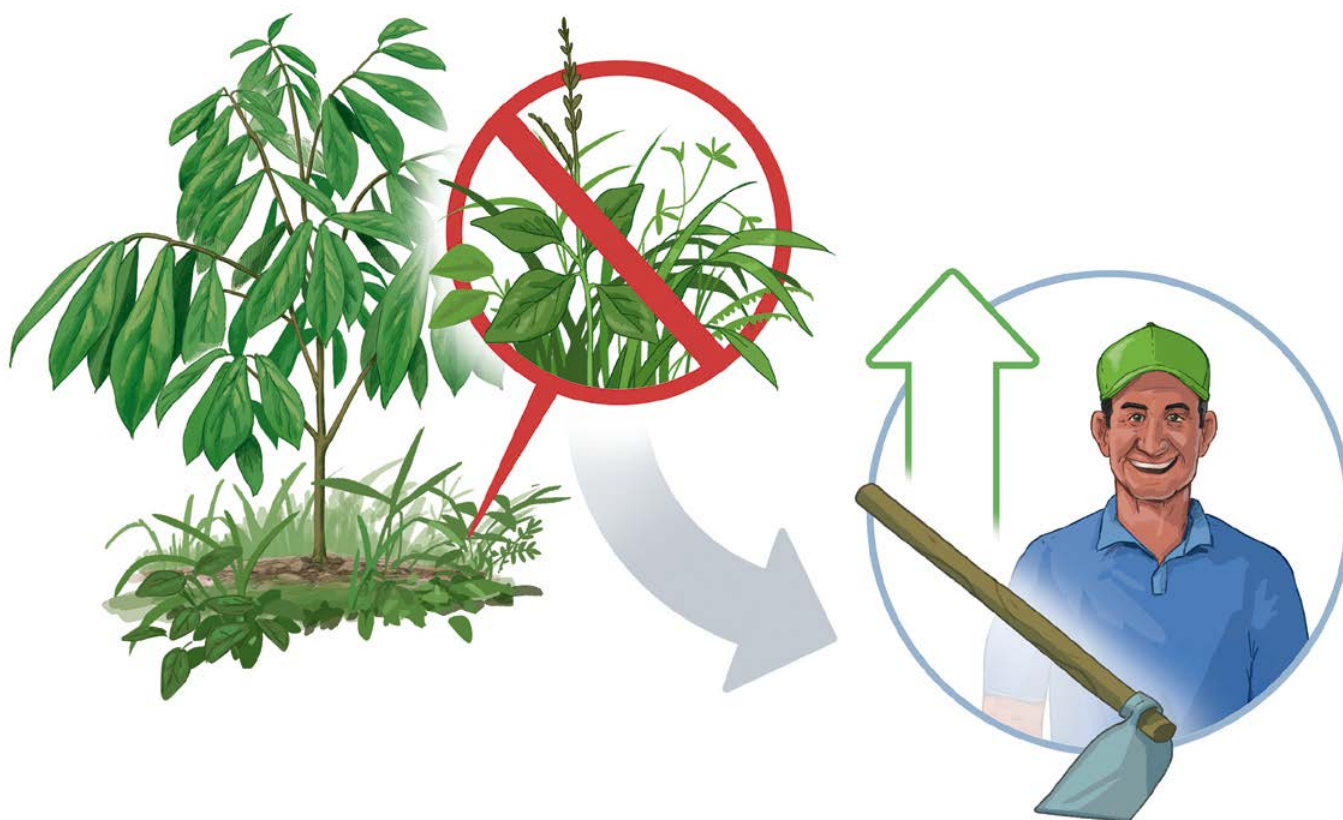


Figura 22. Manejo de arvenses.

Fuente: Elaboración propia

Recomendaciones para El Niño

1. Establecer un sistema de riego (goteo o microaspersión), utilizar coberturas e hidroretenedores. Esta medida implica la adquisición de un sistema de riego en el cultivo, incrementando la inversión (figura 23).

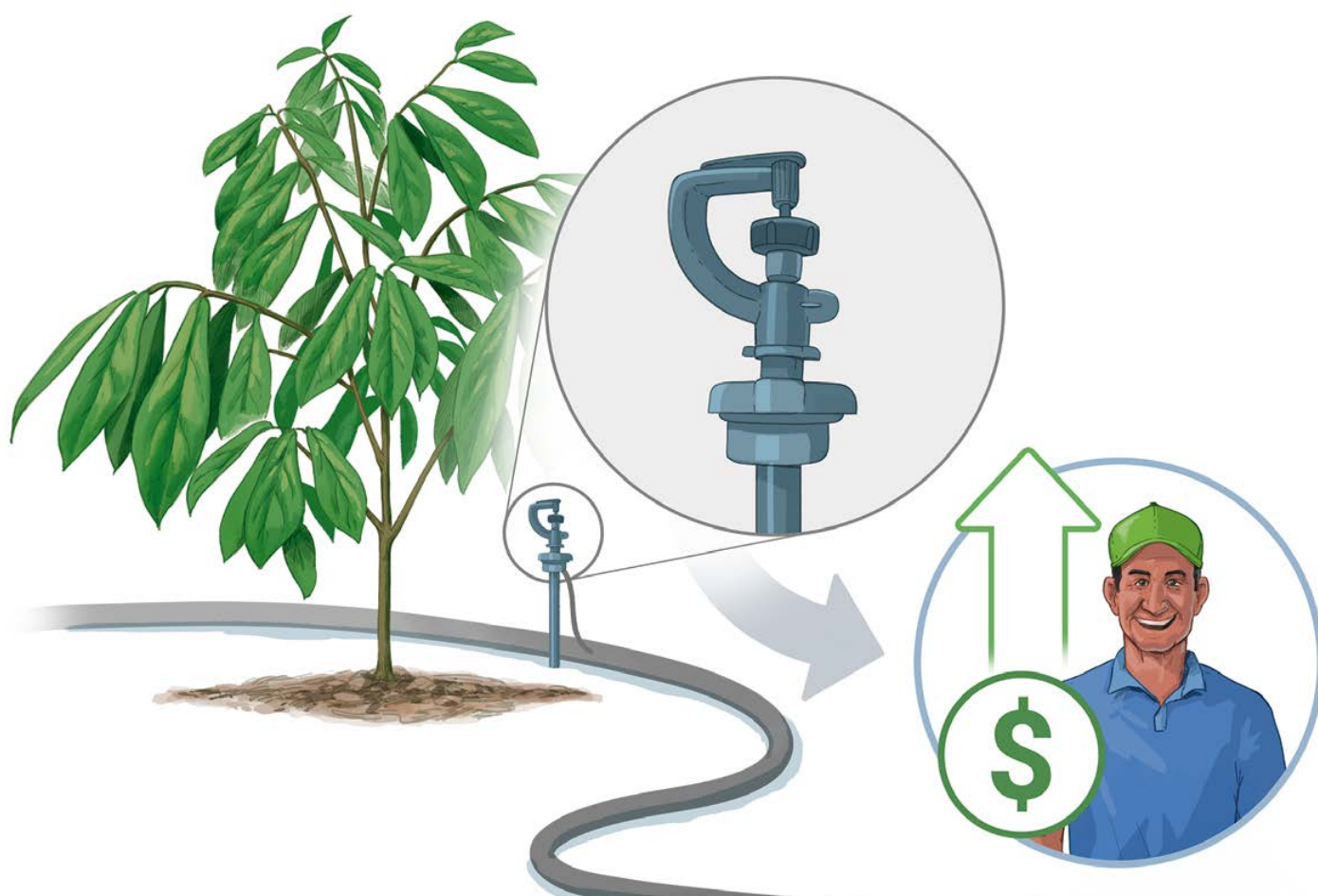


Figura 23. Establecimiento de riego.

Fuente: Elaboración propia

2. Construir reservorios para almacenar agua (preferiblemente cubiertos). Esta acción aumenta los costos, ya que deben adecuarse (figura 24).



Figura 24. Construcción de reservorios.

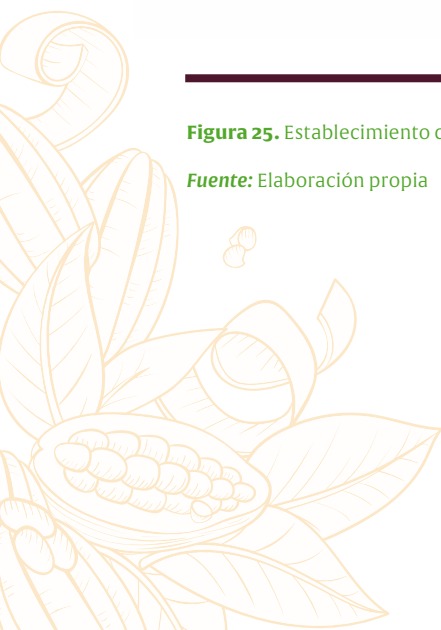
Fuente: Elaboración propia

3. Priorizar diseños de siembra basados en SAF, ya que estos modelos generan microclimas con temperaturas y humedad más favorables al cultivo de cacao, lo que evita o reduce la incidencia del déficit hídrico (figura 25).



Figura 25. Establecimiento de SAF.

Fuente: Elaboración propia



Referencias

- Abbott, P. C., Benjamin, T. J., Burniske, G. R., Croft, M. M., Fenton, M., Kelly, C. R., Lundy, M. M., Rodríguez Camayo, F., & Wilcox, M. D. (2018). *An analysis of the supply chain of cacao in Colombia*. United States Agency for International Development (USAID). <https://hdl.handle.net/10568/96636>
- Agudelo-Castañeda, G. A., Antolinez-Sandoval, E. Y., Báez-Daza, E. Y., Jaimes-Suárez, Y. Y., & Romero-Guerrero, G. A. (2023). Nuevas variedades de cacao seleccionadas en Colombia. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(3), 315-326. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i3.3057>
- Agudelo-Castañeda, G., Cadena-Torres, J., Almanza-Merchán, P., & Pinzón-Sandoval, E. (2018). Desempeño fisiológico de nueve genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) bajo la sombra de tres especies forestales en Santander, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencia. Hortícolas*, 12(2018), 223-232. <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7341>
- Agudelo Castañeda, G. A., Cañar Serna, D. Y., Bello-Gáfaró, M., Hernandez Nopsa, J. F., & Pabón Morales, M. Á. (2021). *Manual técnico para la producción de semilla de cacao en vivero para los Santanderes y Boyacá*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/36615/Ver_documento_36615.pdf?sequence=1
- Andres, C., Comoé, H., Beerli, A., Schneider, M., Rist, S., & Jacobi, J. (2016). Cocoa in monoculture and dynamic agroforestry. En E. Lichtfouse (Ed.), *Sustainable agriculture reviews: Volume 19* (pp. 121-153). Springer International Publishing.
- Amthor, J. S. (1984). The role of maintenance respiration in plant growth. *Plant, Cell & Environment*, 7(8), 561-569. <https://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11591833>
- Asante, W. A., Ahoma, G., Gyampoh, B. A., Kyereh, B., & Asare, R. (2021). Upper canopy tree crown architecture and its implications for shade in cocoa agroforestry systems in the Western Region of Ghana. *Trees, Forests and People*, 5, 100100. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100100>
- Asare, R. (2005). *Cocoa agroforests in West Africa: A look at activities on preferred trees in the farming systems* (p. 89). Forest & Landscape Denmark (FLD). https://apps.worldagroforestry.org/treesandmarkets/inaforesta/documents/preferred_trees_and_cocoa_in_west_africa.pdf

- Atangana, A., Khasa, D., Chang, S., & Degrande, A. (2014). Phytoremediation in tropical agroforestry. En A. Atangana, D. Khasa, S. Chang & A. Degrande, *Tropical Agroforestry* (pp. 343-351). https://doi.org/10.1007/978-94-007-7723-1_19
- Báez-Daza, E. (2018). *Producción y aporte de nutrientes en la hojarasca de las especies abarco (Cariniana pyriformis M), teca (Tectona grandis L.f.) y cacao (Theobroma cacao L.) en un sistema agroforestal en los municipios de Rionegro, Santander y Muzo, Boyacá* [Tesis de maestría, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales]. <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/1026>
- Balasimha, D., Daniel, E. V., & Bhat, P. G. (1991). Influence of environmental factors on photosynthesis in cocoa trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 55(1-2), 15-21. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(91\)90019-M](https://doi.org/10.1016/0168-1923(91)90019-M)
- Barber, J. (2009). Photosynthetic energy conversion: Natural and artificial. *Chemical Society Reviews*, 38(1), 185-196. <https://doi.org/10.1039/B802262N>
- Bauer, G. P., & Francis, J. K. (1998). *Swietenia macrophylla King. Honduras mahogany, caoba*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station.
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D., & Somarriba, E. (1997). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems*, 38, 139-164. <https://doi.org/10.1023/a:1005956528316>
- Bernal, R., Galeano, G., Rodríguez, A., Sarmiento, H., & Gutiérrez, M. (2013). *Nombres comunes de las plantas de Colombia*. <http://www.biovirtual.unal.edu.co/nombrescomunes>
- Blaser, W. J., Oppong, J., Hart, S. P., Landolt, J., Yeboah, E., & Six, J. (2018). Climate-smart sustainable agriculture in low-to-intermediate shade agroforests. *Nature Sustainability*, 1(5), 234-239. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0062-8>
- Blaser-Hart, W. J., Hart, S. P., Oppong, J., Kyereh, D., Yeboah, E., & Six, J. (2021). The effectiveness of cocoa agroforests depends on shade-tree canopy height. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 322, 107676. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107676>
- Bos, M. M., Steffan-Dewenter, I., & Tscharntke, T. (2007). The contribution of cacao agroforests to the conservation of lower canopy ant and beetle diversity in Indonesia. *Biodiversity and Conservation*, 16(8), 2429-2444. <https://doi.org/10.1007/s10531-007-9196-0>



- Brown, N., Jennings, S., & Clements, T. (2003). The ecology, silviculture and biogeography of mahogany (*Swietenia macrophylla*): A critical review of the evidence. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 6(1-2), 37-49. <https://doi.org/10.1078/1433-8319-00041>
- Calle, Z., & Murgueitio, E. (2020). *Árboles nativos para predios ganaderos: especies focales del Proyecto Ganadería Colombiana Sostenible*. Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV).
- Cárdenas, L. M. (2016). *Aspectos ecológicos y silviculturales para el manejo de especies forestales nativas: revisión de información disponible para Colombia*. Fundación Natura. https://natura.org.co/wp-content/uploads/2016/09/Cartilla_Pqts_Tecnologicos_Nativas-Baja.pdf
- Cárdenas, D., Castaño, N., Sua, S., Tunjano, L., Quintero, L., Jiménez, M., Lema, R., & Rodríguez, A. (2015). *Planes de manejo para la conservación de abarco, caoba, cedro, palorosa y canelo de los Andaquíes*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (Sinchi). <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Plan-de-Manejo-para-la-Conservación-de-Abarco-Caoba-Cedro-Palorosa-y-Canelo-de-los-Andaquíes-2015.pdf>
- Cárdenas, D., & Salinas, N. (Eds.). (2007). *Libro rojo de plantas de Colombia. Volumen 4. Especies maderables amenazadas: Primera parte*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (Sinchi); Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Carranza, O., & Zuluaga, A. (2017). *Evaluación y proyección del volumen de madera y biomasa de la especie abarco (Cariniana pyriformis), mediante un estudio piloto en la vereda San Cristóbal del municipio de San José del Guaviare, como alternativa productiva para el departamento del Guaviare* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)]
- Carvalho, F. E. L., Escobar-Pachajoa, L. D., Camargo, I. D., Rojas-Molina, J., Jaimes-Suárez, Y. Y., & Rivera-Meneses, J. J. (2023). The interspecific interactions in agroforestry systems enhance leaf water use efficiency and carbon storage in cocoa. *Environmental and Experimental Botany*, 205, 105119. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105119>

- Carvalho, F. E. L., Montenegro, A. C., Escobar-Pachajoa, L. D., Rojas-Molina, J., Camacho-Díaz, J. E., & Rengifo-Estrada, G. A. (2025). Fitoextracción y asignación de Cd al tallo de especies leñosas utilizadas en la agroforestería del cacao. *Plants*, 14(7), 1101. <https://doi.org/10.3390/plants14071101>
- Cerda, R., Deheuvels, O., Calvache, D., Niehaus, L., Saenz, Y., Kent, J., Somarriba, E., Martínez, C., Villota, A., & Vilchez, S. (2014). Contribution of cocoa agroforestry systems to family income and domestic consumption: Looking toward intensification. *Agroforestry Systems*, 88, 957-981. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9691-8>
- Cervera, D., Castaño, A., Zuluaga, J., Atencio, L., & Falla, C. (2019). *Estudio de las fases fenológicas de Cordia alliodora (Ruiz & Pav.) en el valle cálido del Magdalena, Espinal (Tolima) – Colombia*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.poster.2019.17>
- Céspedes, M., Gutiérrez, M. V., Holbrook, N. M., & Rocha, O. J. (2003). Restoration of genetic diversity in the dry forest tree *Swietenia macrophylla* (Meliaceae) after pasture abandonment in Costa Rica. *Molecular Ecology*, 12, 3201-3212. <https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2003.01986.x>
- Cintron, B. B. (1990). *Cedrela odorata* L. Cedro hembra, Spanish cedar. In R. M. Burns & B. H. Honkala (Eds.), *Silvics of North America: 2. Hardwoods* (pp. 250-257). U. S. Department of Agriculture, Forest Service.
- Comisión Nacional Forestal [Conafor]. (2007). *Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México* (Tomo II). <https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/catalogo-maderas-tomo2.pdf>
- Cordero, J., & Boshier, D. H. (Eds.). (2003). *Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR]. (2019). *Plan de manejo y conservación de la caoba (Swietenia macrophylla King) para la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR*. <https://www.car.gov.co/uploads/files/60d378f29c4ac.pdf>
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA]. (2024). *Nuevas variedades de cacao TCS (Theobroma Corpoica La Suiza) 13 y 19*. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/11536>



- Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal [CONIF]. (1996). *Latifoliadas de zona baja: guía técnica*. Departamento Nacional de Planeación (DNP); Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). <https://www.car.gov.co/uploads/files/60d378f29c4ac.pdf>
- Dago, M. R., Zo-Bi, I. C., Konan, I. K., Kouassi, A. K., Guei, S., Jagoret, P., N'Guessan, A. E., Sanial, E., Tankam, C., Traoré, S., & Hérault, B. (2024). What motivates West African cocoa farmers to value trees? Taking the 4W approach to the heart of the field. *People and Nature*. <https://doi.org/10.1002/pan3.10754>
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 597-612. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002
- Devappa, R. K., Rakshit, S. K., & Dekker, R. F. H. (2015). Forest biorefinery: Potential of poplar phytochemicals as value-added co-products. *Biotechnology Advances*, 33(6), 681-716. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.02.012>
- Diallo, A. (2013). *Potencialidades fitoquímicas de 7 especies de interés forestal en la provincia de Pinar del Río*. [Tesis de grado no publicada, Universidad de Pinar del Río].
- Díaz, M. C., & Moreno, F. (1998). Morfología de semillas y plántulas de árboles de los bosques húmedos tropicales del suroriente de Antioquia, Colombia (I parte). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 51(2), 9-50. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/28916>
- Durand, M., Matule, B., Burgess, A. J., & Robson, T. M. (2021). Sunfleck properties from time series of fluctuating light. *Agricultural and Forest Meteorology*, 308-309, 108554. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108554>
- Elhamouly, N. A., Hewedy, O. A., Zaitoon, A., Miraples, A., Elshorbagy, O. T., Hussien, S., El-Tahan, A., & Peng, D. (2022). The hidden power of secondary metabolites in plant-fungi interactions and sustainable phytoremediation. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 1044896. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1044896>
- Escobar, M. L., Díaz, A., Leal, A., & Angarita, M. (2007). *Principios de sistemas agroforestales y avances en la protección fitosanitaria en el departamento de Santander, Colombia* [Convenio CDMB-ICA 5096-17,182-2005]. Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]; Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB).

- Fahad, S., Chavan, S. B., Chichaghare, A. R., Uthappa, A. R., Kumar, M., Kakade, V., Pradhan, A., Jinger, D., Rawale, G., Yadav, D. K., Kumar, V., Farooq, T. H., Ali, B., Sawant, A. V., Saud, S., Chen, S., & Poczai, P. (2022). Agroforestry systems for soil health improvement and maintenance. *Sustainability*, 14(22), 14877. <https://doi.org/10.3390/su142214877>
- Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2022). *Producción nacional de cacao*. <https://www.fedecacao.com.co/>
- Galeano, G., Calderón, E., Dueñas, H., & Tobón, I. (2007). Abarco: *Cariniana pyriformis* Miers. En D. Cárdenas & N. Salinas (Eds.), *Libro rojo de plantas de Colombia. Volumen 4. Especies maderables amenazadas: primera parte. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas* (pp. 63–67). Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (Sinchi); Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. https://sinchi.org.co/files/publicaciones/publicaciones/pdf/LR_MADERABLES.pdf
- Gálvez, L., Vallejo, M., Méndez, C., & López, J. (2020). *Cedrela odorata* L.: oportunidades para su conservación y mejoramiento genético. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(58), 4-25. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i58.622>
- Garavand, F., Rahaei, S., Vahedikia, N., & Jafari, S. M. (2019). Different techniques for extraction and micro/nanoencapsulation of saffron bioactive ingredients. *Trends in Food Science & Technology*, 89, 26-44. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.05.005>
- Gerry, E. (1952). Abarco-Bacú. *Cariniana pyriformis* Miers. Family: Lecythidaceae. *Information Leaflet Foreign Woods*. Forest Products Laboratory.
- Gidoin, C., Avelino, J., Deheuvels, O., Cilas, C., & Bieng, M. A. N. (2014). Shade tree spatial structure and pod production explain frosty pod rot intensity in cacao agroforests, Costa Rica. *Phytopathology*, 104(3), 275-281. <https://doi.org/10.1094/PHTO-07-13-0216-R>
- Gockowski, J., & Sonwa, D. (2011). Cocoa intensification scenarios and their predicted impact on CO₂ emissions, biodiversity conservation, and rural livelihoods in the Guinea rain forest of West Africa. *Environmental Management*, 48(2), 307-321. <https://doi.org/10.1007/s00267-010-9602-3>



- Gómez, M. (2010). *Fenología reproductiva de especies forestales nativas presentes en la jurisdicción de Corantioquia, un paso hacia su conservación. Volumen 1*. Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia). <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12569#:~:text=http%3A//hdl.handle.net/20.500.12324/12569>
- Gómez, M. L., & Toro, J. L. (2007). *Manejo de las semillas y la propagación de diez especies forestales del bosque húmedo tropical* [Boletín Técnico Biodiversidad n.º. 2]. Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/1104>
- Gómez, M., Toro, J., & Piedrahita, E. (2013). *Propagación y conservación de especies arbóreas nativas*. Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/12678>
- Graue Russek, A. L. (2009). *Fundamentos de economía* (P. M. Guerrero Rosas, Ed., 1.ª ed.). Pearson Educación.
- Hatfield, J. L., & Dold, C. (2019). Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in Plant Science*, 10, Article 103. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>
- Hebbar, K. B., Apshara, E., Chandran, K. P., & Prasad, P. V. (2020). Effect of elevated CO₂, high temperature, and water deficit on growth, photosynthesis, and whole plant water use efficiency of cocoa (*Theobroma cacao* L.). *International Journal of Biometeorology*, 64(1), 47-57. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01792-0>
- Henao, A., & Pérez, S. (2022). *Identificación de especies arbóreas para la remoción de contaminantes y la captura de carbono en el Valle de Aburrá* [Tesis de pregrado, Universidad EIA]. <https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/28b9938b-9fo4-45b7-b6a2-3a6e8f8d5a9e/content>
- Hermle, S., Vollenweider, P., Günthardt-Goerg, M. S., McQuattie, C. J., & Matyssek, R. (2007). Leaf responsiveness of *Populus tremula* and *Salix viminalis* to soil contaminated with heavy metals and acidic rainwater. *Tree Physiology*, 27(11), 1517-1531. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.11.1517>
- Hincapié, O. (2022). *La importancia de la agroforestería en la economía cacaotera de Colombia*. Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques; Compañía Nacional de Chocolates. https://www.forestcarbonpartnership.org/system/files/documents/5_colombie.pdf

- Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas [Sinchi]. (2015). *Abarco (Cariniana pyriformis)* [Ficha técnica n.º 6 de especies de uso forestal y agroforestal de la Amazonia colombiana]. https://www.sinchi.org.co/files/PUBLICACIONES%20DIGITALES/Fichas%20Tecnicas%20agroforestal/Fichas%20Tecnicas%20de%20Especies%20de%20uso%20Forestal%20y%20Agroforestal%20de%20la%20Amazonia%20Colombiana_o6%20ABARCO.pdf
- Instituto Nacional de Bosques [INAB]. (2019). *Paquete tecnológico forestal para caoba de Petén Swietenia macrophylla King. Versión 1.0* [Serie técnica DT-026-2019]. Departamento de Investigación Forestal. <http://portal.inab.gob.gt/images/publicaciones/PTF%20CAOBA%20DE%20PETEN.pdf>
- Jaimes Suárez, Y. Y., Agudelo Castañeda, G. A., Báez Daza, E. Y., Montealegre Bustos, F., Coronado, R. A., Rengifo Estrada, G. A., & Rojas Molina, J. (2022a). *Modelo productivo para el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) en el departamento de Boyacá*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.model.7405590>
- Jaimes Suárez, Y. Y., Agudelo Castañeda, G. A., Báez Daza, E. Y., Montealegre Bustos, F., Rengifo Estrada, G. A., & Rojas Molina, J. (2022b). *Modelo productivo para el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) en el departamento de Santander* (2.ª ed.). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.model.7405538>
- Jara, L. F. (1993). *El cedro: madera fina de la región cafetera*. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC).
- Jiménez, N. (2012). *Producción de madera y almacenamiento de carbono en cafetales con cedro (Cedrela odorata) y caoba (Swietenia macrophylla) en Honduras* [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)].
- Kazan, K., & Lyons, R. (2016). The link between flowering time and stress tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 67(1), 47-60. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv441>
- Klimas, C. A., Kainer, K. A., & De Oliveira Wadt, L. H. (2012). The economic value of sustainable seed and timber harvests of multi-use species: An example using *Carapa guianensis*. *Forest Ecology and Management*, 268(15), 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.03.006>



- Kohl, T., Niether, W., & Abdulai, I. (2024). Impact of common shade tree species on microclimate and cocoa growth in agroforestry systems in Ghana. *Agroforestry Systems*, 98(6), 1579-1590. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01029-z>
- Kouadio, K. A. L., Kouakou, A. T. M., Zanh, G. G., Jagoret, P., Bastin, J. F., & Barima, Y. S. S. (2025). Floristic structure, potential carbon stocks, and dynamics in cocoa-based agroforestry systems in Côte d'Ivoire (West Africa). *Agroforestry Systems*, 99(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01103-6>
- Lahive, F., Hadley, P., & Daymond, A. J. (2019). The physiological responses of cacao to the environment and the implications for climate change resilience: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0552-0>
- Laoué, J., Fernandez, C., & Ormeño, E. (2022). Plant flavonoids in Mediterranean species: A focus on flavonols as protective metabolites under climate stress. *Plants*, 11(2), 172. <https://doi.org/10.3390/plants11020172>
- Lasco, R. D., Delfino, R. J. P., Catacutan, D. C., Simelton, E. S., & Wilson, D. M. (2014). Climate risk adaptation by smallholder farmers: The roles of trees and agroforestry. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6, 83-88. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.013>
- Lopes, J. do C. A., Jennings, S. B., & Matni, N. M. (2008). Planting mahogany in canopy gaps created by commercial harvesting. *Forest Ecology and Management*, 255(2), 300-307. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.051>
- Mondal, A., Gandhi, A., Fimognari, C., Atanasov, A. G., & Bishayee, A. (2019). Alkaloids for cancer prevention and therapy: Current progress and future perspectives. *European Journal of Pharmacology*, 858, Article 172472. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2019.172472>
- Morales, G. A. (2017). *Plan de manejo y conservación del abarco (Cariniana pyrifomis Miers) en la jurisdicción CAR*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). <https://www.car.gov.co/uploads/files/5bd8b7fe8125c.pdf>
- Morales, L., & Varón, T. (2013). *Arboretum y Palmetum: guía de identificación*. Universidad Nacional de Colombia.
- Mortimer, R., Saj, S., & David, C. (2018). Supporting and regulating ecosystem services in cacao agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 92(6), 1639-1657. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0113-6>

- Navarro, C. (1999). *Silvicultura-genética: diagnóstico de la caoba (Swietenia macrophylla King) en Mesoamérica*. Centro Científico Tropical.
- Niether, W., Jacobi, J., Blaser, W. J., Andres, C., & Armengot, L. (2020). Cocoa agroforestry systems versus monocultures: A multi-dimensional meta-analysis. *Environmental Research Letters*, 15(10), Article 104085. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb053>
- Nunoo, I., & Owusu, V. (2017). Comparative analysis on financial viability of cocoa agroforestry systems in Ghana. *Environment, Development and Sustainability*, 19(1), 83-98. <https://doi.org/10.1007/s10668-015-9733-z>
- Obiri, B. D., Bright, G. A., McDonald, M. A., Anglalaere, L. C., & Cobbina, J. (2007). Financial analysis of shaded cocoa in Ghana. *Agroforestry Systems*, 71, 139-149. <https://doi.org/10.1007/s10457-007-9058-5>
- Octavia, D., Wijayanto, N., Budi, S. W., Batubara, I., & Suharti, S. (2024). The potential of cardamom leaf in the agroforestry system: Essential oil yield and 1.8-cineol content. *Indonesian Journal of Forestry Research*, 11(1), 17-32. <https://doi.org/10.59465/ijfr.2024.11.1.17-32>
- Olajire-Ajayi, B. L., Akintola, O. O., & Thomas, E. (2025). Assessment of selected tree species as phytoremediation agents in polluted soils. *International Journal of Phytoremediation*, 27(2), 135-144. <https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2404169>
- Oliver, M., Akoto, S., & Abugre, S. (2024). Cocoa-agroforestry in Ghana: Practices, determinants and constraints faced by farmers. *African Journal of Agricultural Research*, 20(4), 312-322. <https://doi.org/10.5897/AJAR2023.16560>
- Organización Internacional del Cacao [ICCO]. (2024). *Cacao de sabor fino*. <https://www.icco.org/fine-or-flavor-cocoa/>
- Oros-Ortega, I., Lara-Pérez, L. A., Casanova-Lugo, F., Díaz-Echeverría, V. F., Villanueva-López, G., Ramírez-Barajas, P. J., Cetzal-Ix, W., & Villanueva-López, M. G. (2020). Diversity and importance of the relationship between arbuscular mycorrhizal fungi and nitrogen-fixing bacteria in tropical agroforestry systems in Mexico. En D. R. Yadav (Ed.), *Plant Microbe Symbiosis* (pp. 21-34). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36248-5_2



- Ospina P., C. M., Hernández R., R. J., Yandar E., S. E., Aristizábal V., F. A., Rincón, E. A., Gil P., Z. N., García L., J. C., & Paternina G., N. M. (2008). *El guayacán rosado o roble Tabebuia rosea (Bertol.) DC.* Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC); Centro Nacional de Investigación de Café (Cenicafé); Banco de Desarrollo de Alemania (KfW).
- Othman, L., Sleiman, A., & Abdel-Massih, R. M. (2019). Antimicrobial activity of polyphenols and alkaloids in Middle Eastern plants. *Frontiers in Microbiology*, 10, Article 911. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00911>
- Park, C., Woo, H., & Park, M. J. (2023). Development of Pinaceae and Cupressaceae essential oils from forest waste in South Korea. *Plants*, 12(19), 3409. <https://doi.org/10.3390/plants12193409>
- Penna, H. (2017). *Evaluación fisiológica de las especies forestales abarco (Cariniana pyriformis Miers), melina (Gmelina arborea Roxb) y acacia (Acacia mangium Willd), como alternativa en sistemas silvopastoriles en el municipio de San José del Fragua, Caquetá* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)]. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13779/17616750.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pérez Hernández, V. S., Millán Aguilar, O. G., Manzano Sarabia, M. M., Hurtado Oliva, M. Á., & Osuna Martínez, C. C. (2024). Mangles al rescate: cómo estos árboles purifican ecosistemas costeros. *Revista Digital Universitaria*, 25(5). <https://doi.org/10.22201/ceide.16076079e.2024.25.5.8>
- Peter, G. F. (2018). Breeding and engineering trees to accumulate high levels of terpene metabolites for plant defense and renewable chemicals. *Frontiers in Plant Science*, 9, Article 1672. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01672>
- Pizarro, R., Flores, J. P., Tapia, J., Valdés-Pineda, R., González, D., Morales, C., Sangüesa, C., Balocchi, F., & León, L. (2016). Especies forestales para la recuperación de suelos contaminados con cobre debido a actividades mineras. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(1), 29-43. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.06.026>
- Prance, G. T., & Mori, S. A. (1979). Lecythidaceae. Part I: The actinomorphic-flowered New World Lecythidaceae (Asteranthos, Gustavia, Grias, Allantoma & Cariniana). *Flora Neotropica Monograph*, 21, 1-270.

- Prasad, R., Dhyani, S., Tripathi, V., Alam, B., Gupta, A., & Handa, A. (2014). *Gums and resins: Untapped potential of agroforestry systems for livelihood support* [Informe técnico]. *Indian Farmy*, 63(11), 59-61. https://www.researchgate.net/publication/335220079_Gums_and_Resins_Untapped_potential_of_agroforestry_systems_for_livelihood_support
- Prasad, R., Handa, A. K., Alam, B., Singh, R., Shukla, P. A., Singh, V. D., Tripathi, V. D., & Prasad, N. (2019). *Integration of natural resins and gums yielding trees in agroforestry systems for enhancing livelihood security* [Informe técnico]. *Indian Journal of Agroforestry*, 21(2), 2-12. https://www.researchgate.net/publication/338449524_Integration_of_natural_resins_and_gums_yielding_trees_in_agroforestry_systems_for_enhancing_livelihood_security
- Qasim, M., Islam, W., Ashraf, H. J., Ali, I., & Wang, L. (2020). Saponins in insect pest control. En A. G. Atanasov (Ed.), *Reference series in phytochemistry* (pp. 897-924). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96397-6_39
- Quandt, A., Neufeldt, H., & Gorman, K. (2023). Climate change adaptation through agroforestry: Opportunities and gaps. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 60, Article 101244. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101244>
- Rodríguez-Medina, C., Arana, A. C., Sounigo, O., Argout, X., Alvarado, G. A., & Yockteng, R. (2019). Cacao breeding in Colombia: Past, present and future. *Breeding Science*, 69(3), 373-382. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.19011>
- Rojas Molina, J., Ramos Calderón, P. F., Castro Zabala, M. A., Pesca Moreno, A., Vargas Valenzuela, Y., & Escobar Pachajoa, L. (2021). Estructura y composición florística de bosques asociados a especies de Theobroma en la Amazonía colombiana. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(68), 128-150. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i68.1078>
- Saj, S., Jagoret, P., Etoa, L. E., Fonkeng, E. E., Tarla, J. N., Nieboukaho, J. D. E., & Sakouma, K. M. (2017). Lessons learned from the long-term analysis of cacao yield and stand structure in central Cameroonian agroforestry systems. *Agricultural Systems*, 156, 95-104. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.06.002>
- Salgado, J. (2012). Producción de madera en sistemas agroforestales con café. En G. Detlefsen & E. Somarriba (Eds.), *Producción de madera en sistemas agroforestales de Centroamérica* (pp. 145-160). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/3512>



- Sanial, E., Ruf, F., Louppe, D., Mietton, M., & Hérault, B. (2023). Local farmers shape ecosystem service provisioning in West African cocoa agroforests. *Agroforestry Systems*, 97(3), 401-414. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00723-6>
- Santosa, E., Sakti, G. P., Fattah, M. Z., Zaman, S., & Wachjar, A. (2018). Cocoa production stability in relation to changing rainfall and temperature in East Java, Indonesia. *Journal of Tropical Crop Science*, 5(1), 6-17. <https://doi.org/10.29244/jtcs.5.1.6-17>
- Silva, L. J., Roncancio, D., Rodríguez, J., Mondragón, F., & Santos de Acosta, R. (1996). *Latifoliadas zona baja*. Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal [CONIF].
- Sistema Global de Información sobre Biodiversidad [GBIF]. (2025a). *Cariniana pyriformis* Miers. <https://www.gbif.org/species/3083028>
- Sistema Global de Información sobre Biodiversidad [GBIF]. (2025b). *Swietenia macrophylla* G.King. <https://www.gbif.org/species/3190484>
- Sistema Global de Información sobre Biodiversidad [GBIF]. (2025c). *Cedrela odorata* L. <https://www.gbif.org/species/3190511>
- Sistema Global de Información sobre Biodiversidad [GBIF]. (2025d). *Tabebuia rosea* (Bertol.) Bertero ex A.DC. <https://www.gbif.org/species/3172537>
- Sistema Global de Información sobre Biodiversidad [GBIF]. (2025e). *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken. <https://www.gbif.org/species/7649215>
- Smith Dumont, E., Gnahoua, G. M., Ohouo, L., Sinclair, F. L., & Vaast, P. (2014). Farmers in Côte d'Ivoire value integrating tree diversity in cocoa for the provision of ecosystem services. *Agroforestry Systems*, 88, 1047-1066. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9679-4>
- Somarriba, E., & Beer, J. (2011). Productivity of Theobroma cacao agroforestry systems with timber or legume service shade trees. *Agroforestry Systems*, 81, 109-121. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9364-1>
- Somarriba, E., Cerda, R., Orozco, L., Cifuentes, M., Dávila, H., Espin, T., Mavisoy, H., Ávila, G., Alvarado, E., Poveda, V., Astorga, C., Say, E., & Deheuvels, O. (2013). Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 173, 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.04.013>

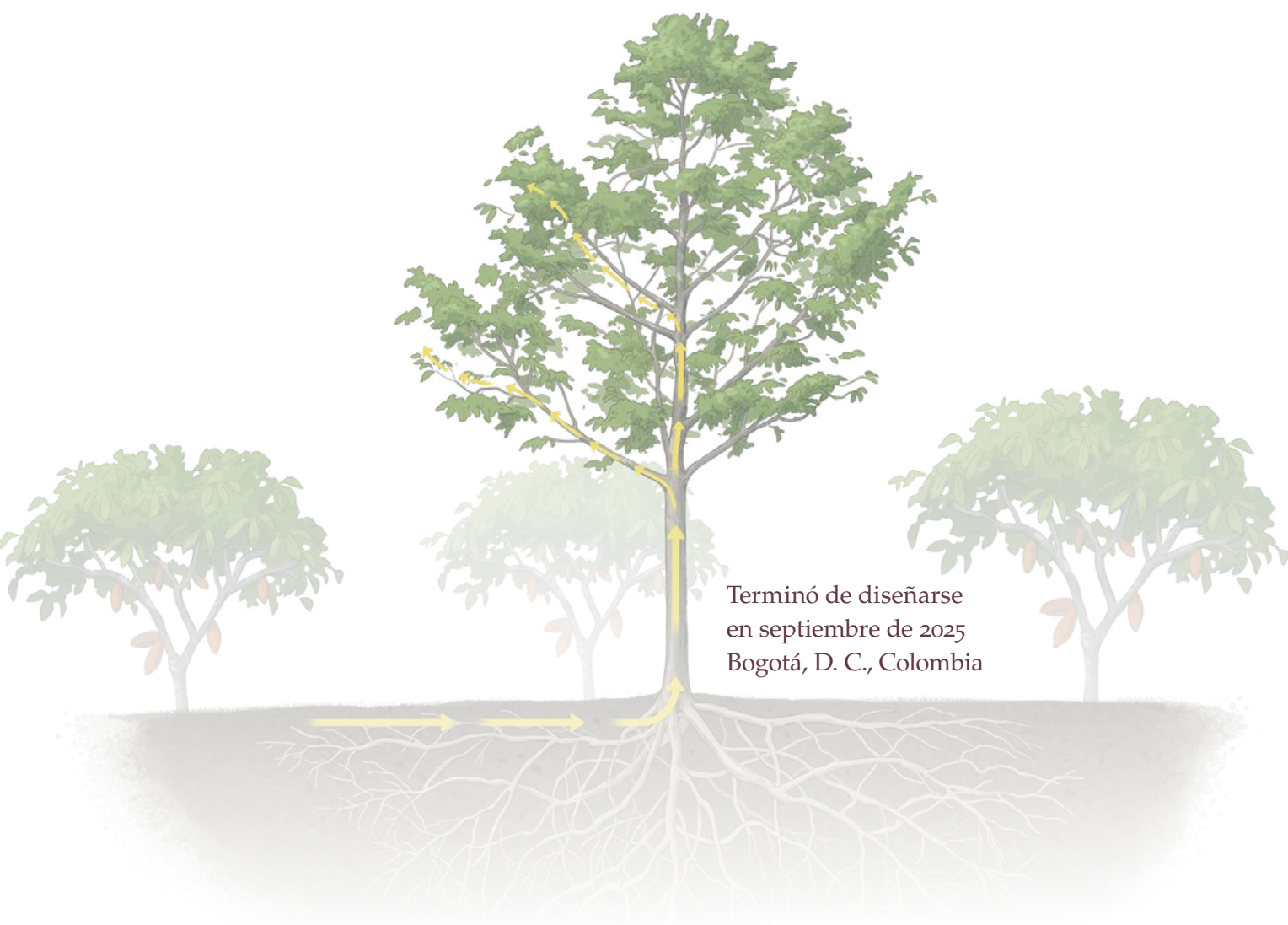
- Somarriba, E., & López Sampson, A. (2018). *Coffee and cocoa agroforestry systems: Pathways to deforestation, reforestation, and tree cover change* [Documento de trabajo]. The World Bank. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9035>
- Somarriba, E., Saj, S., Orozco-Aguilar, L., Somarriba, A., & Rapidel, B. (2024). Shade canopy density variables in cocoa and coffee agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 98(3), 585-601. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00931-2>
- Sridhar, A., Ponnuchamy, M., Kumar, P. S., Kapoor, A., Vo, D. V. N., & Prabhakar, S. (2021). Techniques and modeling of polyphenol extraction from food: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 3409-3443. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01217-8>
- Toledo, M., Chevallier, B., Villarroel, D., & Mostacedo, B. (2008). *Ecología y silvicultura de especies menos conocidas: cedro, Cedrela spp.* Instituto Boliviano de Investigación Forestal. https://www.researchgate.net/publication/310748785_Ecologia_y_silvicultura_de_especies_menos_conocidas_Cedro_Cedrela_spp
- Universidad EIA. (2014). *Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá*. Grupo de Investigación Sostenibilidad, Infraestructura y Territorio [SITE]. <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/110>
- Usman, I., Hussain, M., Imran, A., Afzaal, M., Saeed, F., Javed, M., Afzal, A., Ashfaq, I., Al Jbawi, E., & Saewan, S. A. (2022). Traditional and innovative approaches for the extraction of bioactive compounds. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 1215-1233. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2074030>
- Vaast, P., & Somarriba, E. (2014). Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: The role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agroforestry Systems*, 88(6), 947-956. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9762-x>
- Valdivieso-Ugarte, M., Gómez-Llorente, C., Plaza-Díaz, J., & Gil, Á. (2019). Antimicrobial, antioxidant, and immunomodulatory properties of essential oils: A systematic review. *Nutrients*, 11(11), Article 2786. <https://doi.org/10.3390/nu11112786>
- Vázquez, C., Batis Muñoz, A. I., Alcocer Silva, M. I., Gual Díaz, M., & Sánchez Dirzo, C. (1999). *Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación* [Reporte técnico del proyecto Jo84]. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio]; Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/16-boragim.pdf



- 
- Verma, A., Kumar, P., & Sareesh, N. V. (2021). Secondary metabolites: Harvesting short term benefits from arid zone agroforestry systems in India. *Agroforestry Systems*, 95(3), 515-532. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00599-6>
- Vinceti, B., Amponsah, J., Acquah, S. B., Guuroh, R. T., Obiri, B. D., Fremout, T., Mijatovic, D., & Ofori, D. A. (2024). *Tree diversity across Northern Ghana's cultivated landscapes: Supporting agroforestry with a focus on native tree species*. Bioversity International. <https://hdl.handle.net/10568/168247>
- Wei, Z., Van Le, Q., Peng, W., Yang, Y., Yang, H., Gu, H., Lam, S. S., & Sonne, C. (2021). A review on phytoremediation of contaminants in air, water and soil. *Journal of Hazardous Materials*, 403, Article 123658. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123658>
- World Conservation Monitoring Centre. (1998). *Cariniana pyriformis*. *The IUCN Red List of Threatened Species 1998*: e.T33961A9824874. <https://www.iucnredlist.org/es/species/33961/9824874>
- Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 359. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>
- Zahawi, R. A. (2005). Establishment and growth of living fence species: An overlooked tool for the restoration of degraded areas in the tropics. *Restoration Ecology*, 13(1), 92-102. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2005.00011.x>
- Zeng, C., Wu, L., Zhao, Y., Yun, Y., & Peng, Y. (2018). Tea saponin reduces the damage of *Ectopis obliqua* to tea crops, and exerts reduced effects on the spiders *Ebrechtella tricuspidata* and *Evarcha albaria* compared to chemical insecticides. *PeerJ*, 6, Article e4534. <https://doi.org/10.7717/peerj.4534>
- Zhang, L., Ravipati, A. S., Koyyalamudi, S. R., Jeong, S. C., Reddy, N., Smith, P. T., Bartlett, J., Shanmugam, K., Münch, G., & Wu, M. J. (2011). Antioxidant and anti-inflammatory activities of selected medicinal plants containing phenolic and flavonoid compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(23), 12361-12367. <https://doi.org/10.1021/jf203146e>
- Zhu, X., Liu, W., Chen, J., Bruijnzeel, L. A., Mao, Z., Yang, X., Cardinael, R., Meng, F. R., Sidle, R. C., Seitz, S., Nair, V. D., Nanko, K., Zou, X., Chen, C., & Jiang, X. J. (2019). Reductions in water, soil and nutrient losses and pesticide pollution in agroforestry practices: A review of evidence and processes. *Plant and Soil*, 453(1), 45-86. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04377-3>







Terminó de diseñarse
en septiembre de 2025
Bogotá, D. C., Colombia

El *Manual del sistema agroforestal de cacao* ofrece una guía para comprender el modelo agroforestal con cacao desarrollado por AGROSAVIA; aborda desde la definición de los sistemas agroforestales (SAF) hasta el análisis de los costos de implementación como estrategia de adaptación al cambio climático. Este modelo promueve un uso eficiente del suelo, mejora la biodiversidad y contribuye a mitigar los efectos de fenómenos extremos; de esta manera, mantiene, al mismo tiempo, una alta productividad.

Un componente clave de los SAF es la variedad de cacao, cultivo que requiere condiciones lumínicas adecuadas, ya que tanto el exceso, como la deficiencia de luz pueden generar estrés fisiológico; por ello, este manual explica las bases fisiológicas necesarias para su óptimo desarrollo. Asimismo, presenta las características de las cuatro variedades desarrolladas por AGROSAVIA (TCS 01, TCS 06, TCS 13 y TCS 19), destacadas por su productividad y calidad; también aborda las especies forestales adecuadas para asociar con el cacao, así como su potencial en procesos de fitorremediación —para descontaminación de suelos afectados por metales como el cadmio (Cd)— y en actividades de bioprospección, que pueden generar ingresos adicionales mediante el aprovechamiento de compuestos de interés comercial.

Esta publicación está dirigida a productores, investigadores, técnicos y tomadores de decisiones interesados en mejorar la sostenibilidad y rentabilidad del cultivo de cacao a través de enfoques agroforestales innovadores.



correo: bac@agrosavia.co

télefono: (57 1) 422 73 00 ext. 1257 o 1274

Distribución gratuita
Prohibida su venta

Centro de Investigación Tibaitatá.
Km 14 vía Mosquera-Bogotá, Cundinamarca.
Código postal 250047, Colombia.

Línea de atención al cliente: 018000121515
atencionalcliente@agrosavia.co
www.agrosavia.co