



EDITORIAL
UNIÓN CIENTÍFICA

TECNOLOGÍA Y RESILIENCIA **AGROECOLÓGICA**

GLEBE
e-ISSN:3103-1234

VOL 2(1) 2026
ENERO - ABRIL 2026



E D I T O R I A L
UNIÓN CIENTÍFICA

Editorial Unión Científica, EUC

Copyright © Editorial Unión Científica, EUC

Copyright del texto © 2026 de los autores

<https://libros.editorialunioncientifica.com/>

info@editorialuc.com

WhatsApp +593 98 334 4363

Licencia no comercial



TÍTULO: Tecnología y resiliencia agroecológica.

Technology and agroecological resilience.

Capítulo 1 Monitoreo computarizado y análisis agroforestal del cacao como estrategia de sostenibilidad ante el cambio climático.

Ender Antonio Iñiguez Freites, Ezequiel Echevarría Zamora2, Agripina Ramírez Sánchez*

Capítulo 2 Modelo piloto de conversión agroecológica en fincas de cacao asociadas a la Confederación Nacional de Cacaocultores Dominicanos (CONACADO).

Ender Antonio Iñiguez Freites, Ezequiel Echevarría Zamora2, Agripina Ramírez Sánchez*

EDITOR JEFE: Carlos Luis Vásquez Freytez. Editorial Unión Científica, EUC.

ORCID EDITOR JEFE: <https://orcid.org/0000-0002-8214-3632>

CORRECCIÓN ESTILO: Gabriela Otilia Jácome Benavides. Fundación Río Verde Ecuador Emprende. Ecuador.

PÁGINAS: 78.

CIUDAD: Ambato

INSTITUCIÓN: Editorial Unión Científica, EUC.

PROCESO DE REVISIÓN: todos los capítulos han sido revisados por expertos externos bajo la modalidad *Double blind*.

ISBN: 978-9942-7391-9-3.

ISSN: 3103-117X.

DOI: <https://doi.org/10.63804/gb.v2i1>

PRIMERA VERSIÓN DISPONIBLE EN LÍNEA: abril de 2026.

Clasificación Dewey Decimal (DDC):

631.58. Métodos especiales de cultivo.

Clasificación THEMA:

T Tecnología, ingeniería, agricultura.
TV Agricultura y exploraciones agropecuarias.
TVF Agricultura sostenible.

COMITÉ CIENTÍFICO

[Cristian Vacacela Gómez](#), PhD. INFN-Laboratori Nazionali di Frascati, Frascati, Italia.

[Óscar Alf Corona Salazar](#), PhD. Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra, PUCMM. Campus Santiago. República Dominicana.

[Miguel Israel Bennasar García](#), PhD. Instituto Superior de Formación Docente Salomé Ureña, ISFODASU. República Dominicana.

[Helen Goitia Semeco](#), PhD. Universidad Nacional de La Plata, UNLP. Argentina.

[Diana Carolina Coello Fiallos](#), PhD. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, ESPOCH. Ecuador.

[Daniel Arias Toro](#), PhD. Universidad Técnica de Babahoyo, UTB. Ecuador.

[Ruth Mariela Álvarez Escalona](#), PhD. Universidad Experimental del Táchira, UNET. Venezuela. Profesor de Química, Bioquímica-Ingeniería Ambiental-Catálisis.

[Paúl Miño Armijos](#), MSc. Universidad Católica de Cuenca, UCACUE. Ecuador. Máster en Intervención Psicosocial y Comunitaria.

[María Raquel González Legendre](#), MSc. CEO Ciencia por la verdad. Ecuador.

Tecnología y resiliencia agroecológica

Colección Glebe | V2N1

¿Cómo convergen las herramientas digitales de precisión con la ética de la tierra? ¿Es posible transformar la productividad cacaotera mediante algoritmos sin comprometer la integridad de los ecosistemas tropicales?

En esta obra, titulada *Tecnología y resiliencia agroecológica*, se explora la intersección entre el desarrollo técnico de vanguardia y la responsabilidad ambiental. A través de un análisis estructurado en dos dimensiones fundamentales, este volumen transita desde el monitoreo computarizado y el análisis geoespacial de variables biofísicas, hasta la implementación de modelos de conversión agroecológica que priorizan la biodiversidad funcional y la salud del suelo.

Diseñado para académicos, investigadores del sector agropecuario y tomadores de decisiones, este trabajo ofrece una visión interdisciplinaria indispensable para comprender la modernización de los sistemas agroforestales. No se trata solo de la implementación de sensores o modelos de aprendizaje; se trata de cómo la tecnología redefine nuestra relación con la agricultura y fortalece la resiliencia de las comunidades productoras frente a la crisis climática global. En un mundo en constante transformación, estos resultados demuestran que la innovación digital es el puente necesario hacia una sostenibilidad humana y productiva de largo plazo.

Libro GB V2N1 enero abril 2026

Tecnología y resiliencia agroecológica

RESUMEN DEL VOLUMEN

Tecnología y resiliencia agroecológica aborda la transformación de la cacaocultura frente a los desafíos del cambio climático, integrando la innovación digital con la gestión agroforestal sostenible. A través de una metodología mixta y aplicada en diez fincas de la Confederación Nacional de Cacaocultores Dominicanos (CONACADO), la obra documenta un modelo de intervención integral basado en el monitoreo computarizado y la conversión agroecológica. El libro se estructura en dos ejes fundamentales: el primero examina el uso de herramientas geoespaciales y digitales para el seguimiento de variables biofísicas, mientras que el segundo detalla el proceso de transición hacia prácticas de manejo biológico y capacitación técnica. Los resultados consolidados tras dos años de implementación muestran la viabilidad de esta sinergia, reportando un incremento promedio del 12 % en la productividad del cultivo y un aumento del 15 % en el contenido de materia orgánica del suelo. Estas mejoras reflejan una recuperación importante de la fertilidad edáfica y un fortalecimiento de la biodiversidad funcional dentro de los sistemas productivos. Asimismo, el 80 % de los productores participantes reportó beneficios tangibles en las dimensiones económica, social y ambiental, validando la percepción de estas tecnologías como motores de sostenibilidad. En conclusión, esta obra ofrece un marco metodológico replicable que demuestra que la digitalización y la agroecología no son enfoques excluyentes, sino complementarios para garantizar la resiliencia productiva en ecosistemas tropicales. El texto constituye una referencia esencial para investigadores, técnicos y tomadores de decisiones interesados en el futuro sostenible del sector cacaotero global.

Palabras clave: agroecología; biodiversidad; cacao; monitoreo digital; sostenibilidad ambiental.

VOLUME ABSTRACT

Technology and agroecological resilience address the transformation of cocoa farming in the face of climate change challenges, integrating digital innovation with sustainable agroforestry management. Using a mixed-methods approach applied across ten farms of the National Confederation of Dominican Cocoa Farmers (CONACADO), the book documents a comprehensive intervention model based on computerized monitoring and agroecological conversion. The book is structured around two main themes: the first examines the use of geospatial and digital tools for monitoring biophysical variables, while the second details the transition process toward organic management practices and technical training. The consolidated results after two years of implementation demonstrate the viability of this synergy, reporting an average 12 % increase in crop productivity and a 15 % increase in soil organic matter content. These improvements reflect a significant recovery of soil fertility and a strengthening of functional biodiversity within production systems. Furthermore, 80 % of participating producers reported tangible benefits in economic, social, and environmental terms, confirming the view that these technologies serve as drivers of sustainability. In conclusion, this work offers a replicable methodological framework that demonstrates that digitalization and agroecology are not mutually exclusive approaches, but rather complementary ones for ensuring productive resilience in tropical ecosystems. The text serves as an essential reference for researchers, technical experts, and decision-makers interested in the sustainable future of the global cocoa sector.

Keywords: agroecology; biodiversity; cocoa; digital monitoring; environmental sustainability.

ÍNDICE GENERAL

	Referencia
PRÓLOGO	
Hacia una cacaocultura de precisión	i
INTRODUCCIÓN	
Convergencia tecnológica y agroecológica	iii
Capítulo 1	
Monitoreo computarizado y análisis agroforestal del cacao como estrategia de sostenibilidad ante el cambio climático.	e1
<i>Ender Antonio Iñiguez Freites*, Ezequiel Echevarría Zamora, Agripina Ramírez Sánchez</i>	
DOI: https://doi.org/10.63804/gb.v2i1.e1	
Capítulo 2	
Modelo piloto de conversión agroecológica en fincas de cacao asociadas a la Confederación Nacional de Cacaocultores Dominicanos (CONACADO).	e2
<i>Ender Antonio Iñiguez Freites*, Ezequiel Echevarría Zamora, Agripina Ramírez Sánchez</i>	
DOI: https://doi.org/10.63804/gb.v2i1.e2	
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	
Conclusiones	v

PRÓLOGO

Hacia una cacaocultura de precisión

El sector cacaoero global se encuentra en una encrucijada histórica. Por un lado, la creciente demanda de sostenibilidad y transparencia en las cadenas de suministro exige modelos de producción más limpios y éticos; por otro, la crisis climática impone condiciones extremas que amenazan la viabilidad de los sistemas agroforestales tropicales. En este contexto, la presente obra emerge no solo como un compendio de hallazgos científicos, sino como un manifiesto técnico sobre la coexistencia armónica entre la innovación digital y la sabiduría agroecológica.

Este libro se estructura a través de dos ejes fundamentales que, aunque complementarios, abordan el problema desde dimensiones específicas de la gestión agrícola moderna.

En el primer capítulo, se explora la dimensión de la precisión. El monitoreo computarizado se presenta aquí no como un fin en sí mismo, sino como una herramienta de gobernanza ambiental. Al integrar el análisis geoespacial y el seguimiento digital de variables biofísicas, los autores demuestran que es posible transformar la incertidumbre climática en datos accionables. Los resultados en las fincas de CONACADO son elocuentes: un incremento en la productividad del 12 % y una mejora sustancial en la salud edáfica, confirmando que la tecnología, cuando se aplica con un enfoque de sostenibilidad, es el mejor aliado del productor.

El segundo capítulo profundiza en la transición humana y técnica. La conversión agroecológica es, por definición, un proceso sistémico que requiere un cambio de paradigma. A través de este modelo piloto, se detalla cómo la capacitación técnica y el monitoreo de indicadores de biodiversidad funcional pueden revitalizar unidades productivas. El éxito de este piloto reside en su enfoque multidimensional, donde el bienestar económico del productor se entrelaza con la recuperación de los servicios

ecosistémicos, logrando que el 80 % de los participantes valide la eficacia del modelo.

Lo que une a ambos capítulos es la convicción de que el *Theobroma cacao* puede seguir siendo el motor del desarrollo rural siempre que se apueste por la resiliencia. La obra subraya que la sostenibilidad no es un estado estático, sino un proceso dinámico de aprendizaje y adaptación.

Invito al lector, ya sea investigador, técnico, estudiante o tomador de decisiones, a recorrer estas páginas con una mirada crítica y constructiva. Los datos aquí presentados ofrecen una base sólida para la replicabilidad de estos modelos en otros contextos tropicales, reafirmando que la ciencia y la tecnología están al servicio de la tierra y de quienes la trabajan.

Estamos ante una contribución esencial para el diseño de políticas agrarias y estrategias empresariales que busquen, ante todo, asegurar que el aroma y la calidad del cacao dominicano perduren para las próximas generaciones.

INTRODUCCIÓN

Convergencia tecnológica y agroecológica

La producción global de cacao (*Theobroma cacao* L.) se encuentra en un punto de inflexión. Como uno de los cultivos más emblemáticos de los sistemas agroforestales tropicales, su sostenibilidad está siendo amenazada por una combinación de factores antropogénicos y fenómenos climáticos extremos [1]. La variabilidad en los regímenes de lluvia, el aumento de las temperaturas y la degradación sistemática de la salud edáfica han puesto en riesgo no solo la seguridad alimentaria de las familias productoras, sino también la estabilidad de una cadena de valor que sostiene economías enteras. Ante este escenario, surge la necesidad apremiante de transitar de modelos de producción extractivos hacia sistemas basados en la resiliencia y el conocimiento [2].

El presente libro, *Tecnología y resiliencia agroecológica*, propone una ruptura con los métodos tradicionales de gestión agrícola mediante la integración de dos pilares modernos: la inteligencia de datos y la ecología aplicada [3]. La tesis central de esta obra sostiene que la tecnología no debe ser un elemento ajeno al entorno natural, sino un facilitador de procesos biológicos. A través de la experiencia implementada en las fincas de la Confederación Nacional de Cacaocultores Dominicanos (CONACADO), se demuestra cómo la precisión técnica puede servir de soporte a la ética comunitaria y a la conservación ambiental.

La estructura del texto guía al lector por un recorrido lógico que va desde la observación técnica hasta la acción en el campo. En una primera instancia, se aborda el monitoreo computarizado, una herramienta que permite traducir el comportamiento del ecosistema a datos geoespaciales y variables biofísicas cuantificables [4]. Este enfoque permite una toma de decisiones informada, reduciendo la incertidumbre que el cambio climático impone sobre el ciclo productivo. Posteriormente, el análisis se desplaza hacia la conversión agroecológica, el proceso humano y técnico mediante

el cual una unidad productiva recupera su biodiversidad funcional y su fertilidad natural [5].

Lo que distingue a este trabajo es su validación en entornos reales. Los resultados presentados, un incremento del 12 % en la productividad y del 15 % en materia orgánica, no son meras proyecciones teóricas, sino evidencia empírica de que la sostenibilidad ambiental y la rentabilidad económica pueden, y deben, coexistir. Este volumen aspira a ser una hoja de ruta para investigadores, técnicos y productores que buscan transformar la agricultura en una fuerza de regeneración climática. Al cerrar estas páginas, el lector comprenderá que el futuro del cacao no reside únicamente en la genética de sus semillas, sino en la inteligencia con la que gestionamos el ecosistema que las rodea.

REFERENCIAS

- [1] K. Singh *et al.*, “E-Agriculture Planning Tool for Supporting Smallholder Cocoa Intensification Using Remotely Sensed Data,” *Remote Sens.*, vol. 15, no. 14, p. 3492, Jul. 2023, doi: 10.3390/rs15143492.
- [2] L. Qiao *et al.*, “Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change,” *Nat. Clim. Chang.*, vol. 12, no. 6, pp. 574-580, Jun. 2022, doi: 10.1038/s41558-022-01376-8.
- [3] A. Apicella, “Intelligent cocoa: a systematic review of artificial intelligence applications in the cocoa supply chain,” *Br. Food J.*, vol. 127, no. 12, pp. 4473-4493, Nov. 2025, doi: 10.1108/BFJ-04-2025-0488.
- [4] J. Verrelst *et al.*, “Quantifying Vegetation Biophysical Variables from Imaging Spectroscopy Data: A Review on Retrieval Methods,” *Surv. Geophys.*, vol. 40, no. 3, pp. 589-629, May 2019, doi: 10.1007/s10712-018-9478-y.
- [5] J. E. Joseph *et al.*, “Evaluating iSAT climate-informed agro-advisories for farm decisions and system performance in Senegal’s drylands,” *Sci. Rep.*, vol. 16, no. 1, p. 10493, Mar. 2026, doi: 10.1038/s41598-026-44231-y.

Monitoreo computarizado y análisis agroforestal del cacao como estrategia de sostenibilidad ante el cambio climático

Computerized monitoring and agroforestry analysis of cocoa as a sustainability strategy against climate change

Ender Antonio Iñiguez Freites^{1*}, Ezequiel Echevarría Zamora², Agripina Ramírez Sánchez³

¹ Vicerrectorado de Investigación y Posgrado, Universidad Católica del Cibao (UCATECI), La Vega, República Dominicana. <https://www.ucateci.edu.do/>

² Facultad de Ciencias Biológicas y Naturales, Pontificia Universidad Católica Madre Maestra (PUCMM), Santo Domingo, República Dominicana.

³ Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD), Santo Domingo, República Dominicana

✉ einiguez@ucateci.edu.do

| ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9609-8898>

✉ e.echevarria@ce.pucmm.edu.do

| ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8203-5413>

✉ agripinars@gmail.com

| ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0140-152X>

E-mail de correspondencia: einiguez@ucateci.edu.do

Serie Monográfica

Glebe.

e-ISSN: 3103-1234

Vol. 2(1) enero - abril 2026

Desafíos de la sociedad contemporánea

ISBN: 978-9942-7391-9-3

Editor académico

Carlos Vásquez

Universidad Técnica de Ambato. Ecuador.

Tipo de revisión

Capítulo de libro revisado por dos pares expertos en modalidad doble ciego.

Como citar este capítulo

Iñiguez Freites, E. A., Echevarría Zamora, E., & Ramírez Sánchez, A. (2026). Monitoreo computarizado y análisis agroforestal del cacao como estrategia de sostenibilidad ante el cambio climático. En Serie Glebe (Vol. 2, Núm. 1, Cap. 1, e1).

<https://doi.org/10.63804/gb.v2i1.e1>

Resumen

La sostenibilidad de la producción de cacao representa un desafío estratégico frente al cambio climático y la presión sobre los recursos naturales en sistemas agroforestales tropicales. La adopción de enfoques que integren tecnologías de monitoreo con prácticas agroecológicas se perfila como una alternativa para fortalecer la resiliencia productiva y ambiental. Este estudio diseñó y evaluó un modelo de monitoreo computarizado y análisis agroforestal aplicado a diez fincas asociadas a la Coordinadora Nacional de Cacaocultores Dominicanos (CONACADO). Se empleó un enfoque cuantitativo complementado con herramientas de análisis geoespacial, monitoreo digital de variables biofísicas y evaluación agroecológica participativa. El modelo integró diagnóstico agroecológico, capacitación técnica, implementación de prácticas de manejo agroforestal

Copyright

© 2026 Los autores. Este es un capítulo de libro de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International ([CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)). Se autoriza el uso, distribución y reproducción de este contenido en cualquier medio, de forma irrestricta, siempre que se otorgue el crédito a los autores originales y se cite debidamente la fuente primaria de publicación.

Recibido: 11 de noviembre de 2025

Revisado: 18 de diciembre de 2025

Aceptado: 20 de abril de 2026

Publicado: 28 de abril de 2026

sostenible y monitoreo sistemático de indicadores de productividad, calidad del grano, fertilidad del suelo y biodiversidad funcional. Durante el segundo año de implementación, la productividad del cacao aumentó un 12 %, mientras que el contenido de materia orgánica del suelo creció un 15 %, reflejando mejoras significativas en la fertilidad edáfica. Asimismo, se registró un incremento en la diversidad de especies asociadas al sistema agroforestal. En términos de percepción, el 80 % de los productores valoró positivamente el modelo, destacando beneficios económicos, sociales y ambientales derivados de la adopción de prácticas agroecológicas apoyadas en tecnologías de monitoreo. Los hallazgos confirman la viabilidad técnica y la pertinencia del monitoreo computarizado como estrategia para optimizar la gestión sostenible del cacao. La integración de tecnologías digitales con enfoques agroecológicos constituye una alternativa eficaz para mejorar la sostenibilidad ambiental, fortalecer la resiliencia climática y promover prácticas productivas más sostenibles en sistemas cacaoteros tropicales.

Palabras clave: agroforestería; sostenibilidad ambiental; productividad agrícola; biodiversidad; cambio climático.

ABSTRACT

The sustainability of cocoa production represents a strategic challenge in the face of climate change and pressure on natural resources in tropical agroforestry systems. The adoption of approaches that integrate monitoring technologies with agroecological practices emerges as an alternative to strengthen both productive and environmental resilience. This study designed and evaluated a computerized monitoring and agroforestry analysis model applied to ten farms associated with the National Coordinating Body of Dominican Cocoa Producers (CONACADO). A quantitative approach was used, complemented by geospatial analysis tools, digital monitoring of biophysical variables, and participatory agroecological evaluation. The model integrated agroecological diagnosis, technical training, implementation of sustainable agroforestry practices, and systematic monitoring of productivity indicators, cocoa bean quality, soil fertility, and functional biodiversity. During the second year of implementation, cocoa productivity increased by 12 %, while soil organic matter content rose by 15 %, indicating significant improvements in soil fertility. Additionally, an increase in the diversity of species associated with the agroforestry system was recorded. Regarding perception, 80 % of the producers positively valued the model, highlighting economic, social, and environmental benefits derived from adopting agroecological practices supported by digital monitoring tools. The findings confirm the technical feasibility and relevance of computerized monitoring as a strategy to optimize sustainable cocoa management. The integration of digital technologies with agroecological approaches constitutes an effective alternative to improve environmental sustainability, strengthen climate resilience, and promote more sustainable production practices in tropical cocoa systems.

Keywords: agroforestry; environmental sustainability; agricultural productivity; biodiversity; climate change.

INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad de los sistemas de producción agrícola constituye uno de los principales desafíos para el desarrollo rural en el contexto del cambio climático y la degradación progresiva de los recursos naturales. Entre los cultivos tropicales de mayor relevancia económica, social y ambiental se encuentra el cacao (*Theobroma cacao* L.), cuya producción sustenta los medios de vida de aproximadamente cinco a seis millones de pequeños productores a nivel mundial, distribuidos principalmente en América Latina, África y Asia [1]. Este cultivo no solo representa una fuente estratégica de ingresos para comunidades rurales, sino que

también desempeña un papel clave en la conservación de paisajes agroforestales biodiversos y en la provisión de servicios ecosistémicos asociados a la regulación climática, la fertilidad del suelo y la biodiversidad funcional.

En este escenario, la República Dominicana ocupa una posición destacada en el mercado internacional al consolidarse como el principal productor y exportador de cacao orgánico certificado, concentrando aproximadamente el 60 % del volumen global de exportaciones de este tipo de cacao y generando ingresos anuales estimados en más de 180 millones de dólares [2]. Esta posición se sustenta en condiciones agroecológicas favorables, una tradición productiva centenaria y la organización de más de 40,000 familias productoras integradas en cooperativas y asociaciones, entre las que destaca la Confederación Nacional de Cacaocultores Dominicanos (CONACADO), organización que agrupa a miles de productores bajo esquemas de comercio justo y certificación orgánica [3]. Además, el sector cacaotero genera empleo directo e indirecto para cerca de 200,000 personas en zonas rurales, contribuyendo de manera significativa a la reducción de la pobreza rural, la seguridad alimentaria y el mantenimiento de sistemas agroforestales de alta diversidad biológica en regiones montañosas de elevada vulnerabilidad socioeconómica [4].

No obstante, a pesar de su importancia estratégica, la cacaocultura dominicana enfrenta desafíos estructurales asociados a la variabilidad climática, la degradación del suelo, la baja adopción de tecnologías de monitoreo productivo y la limitada integración de enfoques agroecológicos sistematizados en los procesos de manejo del cultivo [5]. Estas limitaciones inciden en la estabilidad productiva de las fincas, reducen la eficiencia en el uso de los recursos naturales y comprometen la capacidad de adaptación del sector ante escenarios de cambio climático. En respuesta a estas problemáticas, los sistemas agroforestales de cacao basados en principios agroecológicos han emergido como una alternativa viable para mejorar simultáneamente la productividad, la resiliencia climática y la sostenibilidad ambiental de las plantaciones.

Sin embargo, a pesar de la creciente evidencia científica sobre los beneficios de la agroecología en sistemas cacaoteros, persisten vacíos de conocimiento que dificultan su implementación a gran escala. Entre estos destacan la ausencia de modelos de transición agroecológica contextualizados a las condiciones edafoclimáticas y socioeconómicas locales, la limitada evaluación integral de indicadores productivos, ambientales y sociales durante los procesos de conversión, la escasa comprensión de las dinámicas temporales que caracterizan las etapas de transición productiva y la insuficiente identificación de los factores

sociotécnicos que condicionan la adopción de prácticas agroecológicas por parte de los productores [6].

En este contexto, el desarrollo de herramientas de monitoreo computarizado y análisis agroforestal se presenta como una estrategia innovadora para generar información sistemática sobre el desempeño productivo y ecológico de los sistemas cacaoteros, facilitando la toma de decisiones basadas en evidencia. La integración de tecnologías digitales, análisis geoespacial y metodologías participativas permite evaluar de manera simultánea variables relacionadas con la productividad del cultivo, la fertilidad del suelo, la biodiversidad funcional y la percepción de los productores durante los procesos de transición hacia modelos productivos más sostenibles.

En consecuencia, el presente estudio tuvo como objetivo diseñar, implementar y evaluar un modelo piloto de monitoreo computarizado y conversión agroecológica en plantaciones de cacao asociadas a CONACADO, integrando dimensiones productivas, ambientales y sociales dentro de un enfoque de investigación participativa. La generación de evidencia empírica sobre la viabilidad y los impactos de este modelo contribuye al fortalecimiento de estrategias de sostenibilidad para el sector cacaotero dominicano y proporciona un marco metodológico replicable para procesos de transición agroecológica en sistemas agroforestales tropicales.

METODOLOGÍA

Enfoque, alcance y diseño de la investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, sustentado en la recolección sistemática y el análisis estadístico de variables biofísicas, productivas y socioambientales asociadas a sistemas agroforestales de cacao. Este enfoque permitió evaluar de manera objetiva los efectos derivados de la implementación de prácticas agroecológicas y del monitoreo computarizado mediante indicadores medibles relacionados con la productividad agrícola, la calidad del grano, la fertilidad del suelo y la biodiversidad funcional. De esta manera, se buscó reducir sesgos derivados de interpretaciones subjetivas y garantizar la reproducibilidad de los resultados mediante la aplicación de protocolos técnicos estandarizados y procedimientos analíticos rigurosos [7].

Dentro de este marco metodológico, la investigación se centró en el análisis de unidades productivas cacaoteras, considerando la finca como la unidad principal de observación. Los factores productivos y ambientales fueron tratados como

variables observables y cuantificables, evaluadas mediante indicadores técnicos de rendimiento agrícola, propiedades edáficas y diversidad biológica. Este tratamiento permitió transformar las observaciones de campo en bases de datos estructuradas, posteriormente analizadas mediante herramientas estadísticas orientadas a identificar patrones de comportamiento e interacciones entre variables dentro del sistema agroforestal.

El estudio adoptó un diseño cuasi experimental de tipo longitudinal, que permitió evaluar la evolución temporal de los sistemas productivos durante un período de veinticuatro meses de implementación del modelo agroecológico y del sistema de monitoreo computarizado. Este diseño contempló tres momentos principales de evaluación: línea base inicial, evaluación intermedia y evaluación final, lo que permitió comparar los cambios observados en los indicadores productivos y ambientales a lo largo del proceso de intervención.

A diferencia de los diseños experimentales controlados, el estudio se desarrolló en condiciones reales de producción agrícola, sin manipulación artificial del entorno productivo. Este enfoque permitió analizar el comportamiento del sistema agroforestal bajo condiciones naturales de manejo por parte de los productores, lo cual incrementa la validez ecológica y la aplicabilidad práctica de los resultados obtenidos.

El flujo general del diseño metodológico aplicado se presenta en la Figura 1, donde se describen las principales etapas del proceso investigativo, desde el diagnóstico inicial de las fincas hasta la evaluación final del modelo agroecológico.

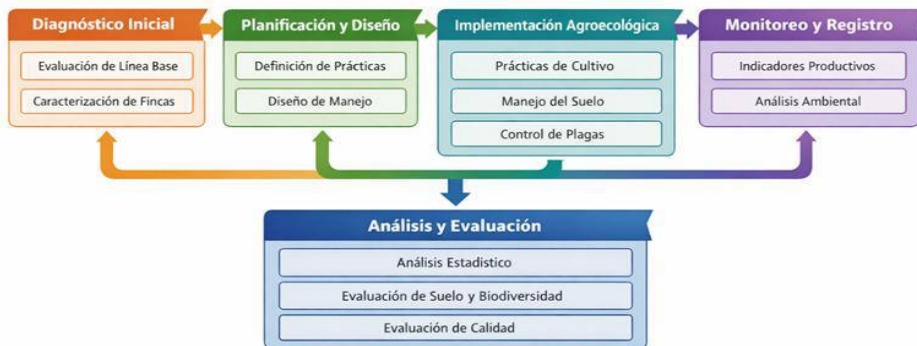


Figura 1. Diagrama del diseño metodológico.

Nota. Se muestran las fases principales del proceso de investigación: diagnóstico agroecológico inicial, diseño participativo de manejo, implementación de prácticas sostenibles y monitoreo de indicadores productivos y ambientales.

Finalmente, el alcance del estudio puede clasificarse como correlacional, explicativo y aplicado, ya que busca identificar asociaciones entre la implementación de prácticas agroecológicas, el uso de herramientas de monitoreo digital y los cambios observados en variables productivas, edáficas y ecológicas. El propósito central del estudio se sitúa dentro del campo de la investigación aplicada, orientada al desarrollo de modelos de gestión sostenible replicables en sistemas cacaoteros tropicales [8].

Población y área de estudio

El estudio se desarrolló en la región cacaotera central de la República Dominicana, específicamente en zonas productoras localizadas en las provincias de Duarte y Sánchez Ramírez, territorios caracterizados por una larga tradición agrícola vinculada al cultivo de cacao orgánico.

Estas regiones presentan condiciones agroecológicas favorables para el desarrollo de sistemas agroforestales de cacao, con altitudes comprendidas entre 150 y 450 metros sobre el nivel del mar, precipitaciones anuales entre 1.800 y 2.200 mm, y temperaturas medias entre 24 °C y 27 °C [9].

Los suelos predominantes corresponden principalmente a Inceptisoles y Ultisoles con textura franco-arcillosa, caracterizados por una adecuada capacidad de retención de humedad y niveles moderados de fertilidad natural, condiciones que favorecen el establecimiento de sistemas agroforestales diversificados.

La localización geográfica de las fincas incluidas en el estudio se presenta en la Figura 2, donde se muestra la distribución espacial de las unidades productivas analizadas dentro de la región cacaotera.

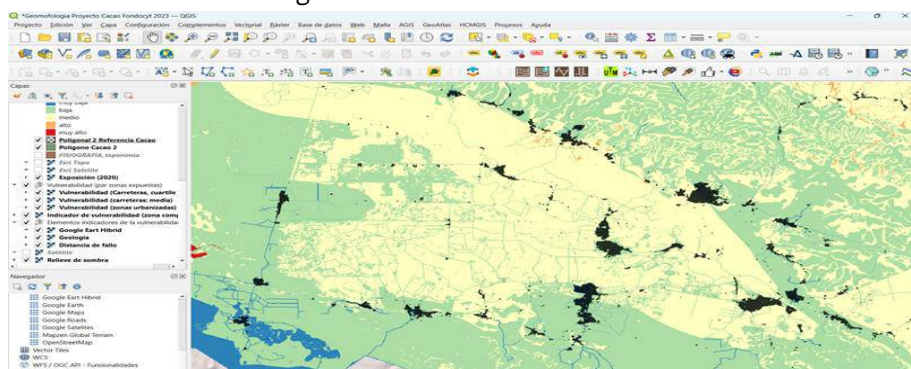


Figura 2. Mapa de la zona cacaotera estudiada.

Nota. Se muestra la localización de las fincas piloto incluidas en el estudio dentro de las provincias de Duarte y Sánchez Ramírez, procesada mediante el software QGIS.

La población de estudio estuvo constituida por fincas cacaoteras pertenecientes a productores asociados a la Coordinadora Nacional de Cacaocultores Dominicanos (CONACADO). A partir de un diagnóstico participativo inicial se seleccionaron diez fincas piloto, las cuales cumplían criterios técnicos específicos como superficie mínima cultivada, presencia de sistemas agroforestales con árboles de sombra y disposición de los productores para participar durante todo el período de investigación.

Las principales características estructurales de las fincas seleccionadas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de las fincas incluidas en el estudio.

Variable	Valor promedio
Número de fincas piloto	10
Superficie agrícola	2 - 10 ha
Edad del cultivo	8 - 20 años
Sistema productivo	Agroforestal orgánico
Altitud	150 - 450 msnm

Procedimiento de implementación del modelo agroecológico

El modelo de manejo agroecológico fue diseñado a partir de principios científicos de agroecología, manejo sostenible del suelo y gestión de sistemas agroforestales tropicales. Su implementación se desarrolló mediante un enfoque participativo que integró conocimientos técnicos con saberes tradicionales de los productores, lo cual permitió adaptar las prácticas de manejo a las condiciones específicas de cada unidad productiva [10].

El proceso de implementación se estructuró en cuatro fases operativas principales:

1. Diagnóstico agroecológico inicial
2. Diseño participativo de planes de manejo
3. Implementación de prácticas agroecológicas

4. Monitoreo computarizado de indicadores productivos y ambientales

Estas etapas se ilustran en la Figura 3, donde se presenta el modelo conceptual del sistema agroforestal implementado durante la investigación.

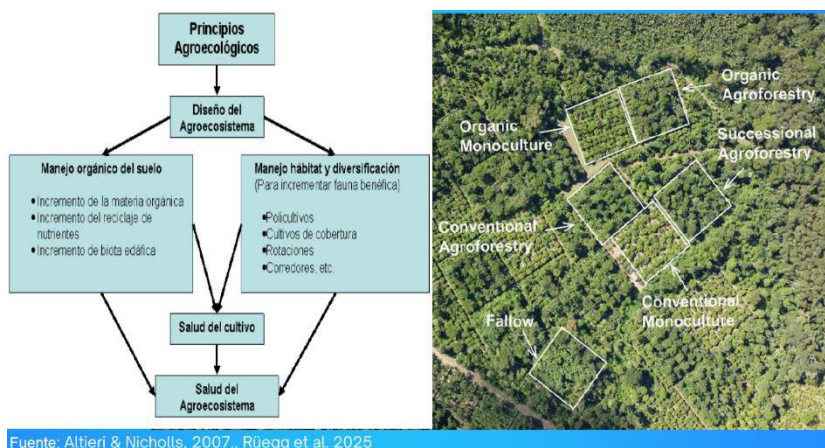


Figura 3. Modelo agroecológico del sistema productivo de cacao.

Nota. El esquema muestra la integración de componentes productivos, ambientales y tecnológicos dentro del sistema agroforestal.

Durante la fase de implementación se promovieron diversas prácticas orientadas a mejorar la sostenibilidad del sistema productivo. Entre las principales acciones desarrolladas se incluyeron:

- Manejo sostenible del suelo mediante coberturas vegetales.
- Producción de compost y biofertilizantes.
- Diversificación del sistema agroforestal mediante introducción de especies arbóreas de sombra.
- Manejo integrado de plagas y enfermedades con énfasis en métodos biológicos.

Las principales prácticas implementadas se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Prácticas agroecológicas implementadas en las fincas piloto.

Categoría	Prácticas implementadas
Manejo del suelo	Compostaje, biofertilizantes, cobertura vegetal
Diversificación	Introducción de especies arbóreas de sombra
Control fitosanitario	Manejo integrado de plagas
Manejo del cultivo	Podas sanitarias y renovación genética

Sistema de monitoreo computarizado del cultivo

Como parte del proceso de innovación tecnológica del estudio, se implementó un sistema de monitoreo computarizado basado en inteligencia artificial, orientado al registro, análisis y detección temprana de variables fitosanitarias y productivas del cultivo [11].

El sistema integró herramientas de visión computacional entrenadas mediante RoboFlow y el modelo de detección de objetos YOLOv8, lo que permitió identificar insectos plaga presentes en las mazorcas de cacao a partir de imágenes capturadas mediante cámaras digitales instaladas en las fincas piloto. Las imágenes recolectadas fueron utilizadas para entrenar modelos de detección automática, generando inferencias predictivas que apoyaron el monitoreo fitosanitario del sistema productivo.

La arquitectura conceptual del sistema se presenta en la Figura 4, donde se ilustra el flujo de captura de datos, entrenamiento del modelo de inteligencia artificial, análisis computacional e interpretación de resultados.

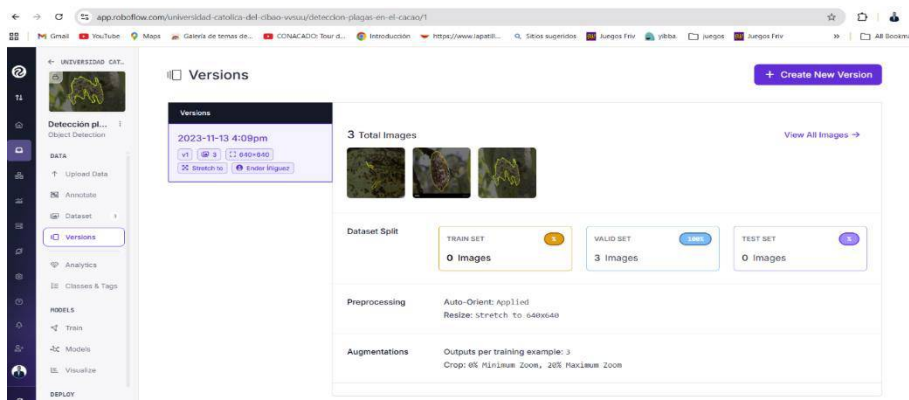


Figura 4. Esquema del sistema de monitoreo computarizado (RoboFlow YOLOv8) aplicado al análisis agroforestal del cacao.

Nota. El sistema integra herramientas digitales de registro y entrenamiento, análisis de datos y detección computarizada de insectos plaga sobre mazorcas de cacao.

Evaluación de indicadores productivos y ambientales

Para evaluar el desempeño productivo de los sistemas cacaoteros se estableció un sistema de monitoreo continuo de la producción en cada finca piloto. Los productores registraron periódicamente información relacionada con:

- Número de mazorcas cosechadas.
- Peso de cacao fresco.
- Producción final de cacao seco después de fermentación y secado.

A partir de estos registros se calcularon indicadores de rendimiento expresados en kilogramos de cacao seco por hectárea por año, lo que permitió analizar la evolución productiva de las plantaciones durante el período de estudio.

Adicionalmente, se evaluaron indicadores de calidad del grano mediante análisis físicos que incluyeron determinaciones de peso de cien granos, índice de fermentación y contenido de humedad.

Las principales variables productivas evaluadas se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Indicadores productivos analizados.

Indicador	Unidad
Producción de cacao seco	kg/ha/año
Número de mazorcas	unidades/árbol
Peso de cien granos	g
Índice de fermentación	%

De forma paralela, se realizaron análisis de suelo mediante muestreos sistemáticos, con el objetivo de evaluar cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Entre las variables analizadas se incluyeron pH, contenido de materia orgánica, nitrógeno total y fósforo disponible.

Asimismo, se evaluó la biodiversidad funcional del sistema agroforestal mediante censos de especies arbóreas asociadas, así como registros de fauna y artrópodos presentes en las fincas piloto.

Análisis estadístico

Los datos cuantitativos obtenidos durante el proceso de investigación fueron procesados mediante procedimientos estadísticos utilizando el software R [12].

Inicialmente se realizaron análisis descriptivos para caracterizar la distribución de las variables productivas, edáficas y ecológicas. Posteriormente se aplicaron pruebas de normalidad y homogeneidad de varianza, con el fin de determinar la pertinencia del uso de métodos paramétricos o no paramétricos.

Los cambios temporales en variables productivas y ambientales fueron evaluados mediante análisis de varianza de medidas repetidas (ANOVA), lo que permitió comparar los resultados obtenidos en los distintos momentos de evaluación. De manera complementaria se aplicaron análisis de correlación y técnicas multivariadas, como el análisis de componentes principales, para identificar patrones de interacción entre variables productivas, ambientales y agroecológicas dentro del sistema agroforestal.

El flujo general del procesamiento estadístico de los datos se presenta en la Figura 5.

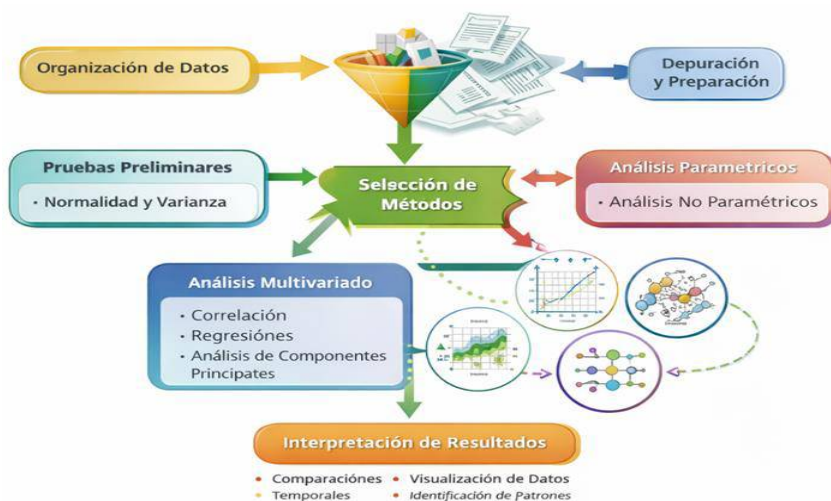


Figura 5. Flujo de análisis estadístico de los datos.

Nota. El proceso incluye las etapas de organización de la base de datos, depuración de información, análisis descriptivo, pruebas de hipótesis y análisis multivariado.

Consideraciones éticas

Todos los productores participantes fueron informados previamente sobre los objetivos, procedimientos y alcances del estudio antes del inicio de las actividades de investigación, otorgando su consentimiento voluntario para participar en el proceso.

Asimismo, se garantizó la confidencialidad de la información recopilada, así como el acceso de los productores a los resultados obtenidos. El estudio se desarrolló bajo principios de investigación participativa y ética en el trabajo con comunidades rurales, reconociendo el valor del conocimiento tradicional de los agricultores y promoviendo la co-construcción de soluciones sostenibles para el fortalecimiento de la cacaocultura.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir de la implementación del modelo de monitoreo computarizado y análisis agroforestal permitieron evaluar de manera integral el impacto de las prácticas agroecológicas introducidas en las fincas piloto. El análisis se centró en indicadores clave de sostenibilidad productiva, incluyendo productividad del cultivo, calidad del suelo, biodiversidad funcional y percepción de los productores. En este sentido, los hallazgos cuantitativos se complementan con una interpretación cualitativa de su impacto en la resiliencia de los sistemas cacaoteros frente a los efectos del cambio climático. La discusión integra la evidencia empírica generada con reportes recientes de la literatura científica sobre agroforestería y agricultura sostenible en sistemas tropicales.

Evaluación de la productividad del cultivo de cacao

En relación con el desempeño productivo del sistema agroforestal, los resultados evidenciaron una mejora progresiva en la productividad de las fincas participantes a partir de la implementación del modelo de manejo sostenible. Como se observa en la Figura 6, el rendimiento promedio de cacao seco por hectárea mostró una tendencia ascendente durante el periodo de monitoreo.

Durante el primer año de implementación se registró una estabilización productiva asociada al proceso de adaptación del sistema agroforestal y la incorporación de nuevas prácticas de manejo. Sin embargo, en el segundo año se observó un incremento promedio del 12 % en la productividad del cultivo, lo cual sugiere que las estrategias agroecológicas implementadas contribuyeron a mejorar la eficiencia del sistema productivo.

La gráfica 6 muestra el rendimiento promedio (kg/ha) registrado durante los dos años de implementación del modelo agroforestal sostenible.

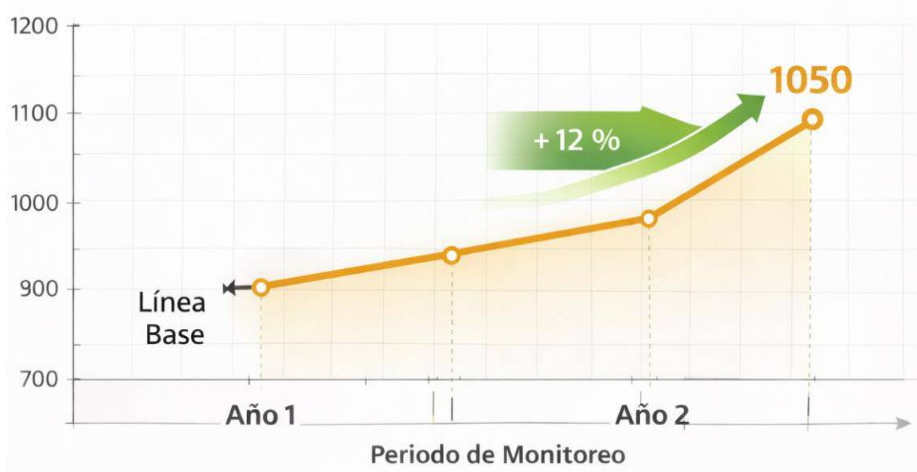


Figura 6. Evolución de la productividad del cacao en fincas piloto durante el periodo de monitoreo.

Este comportamiento coincide con investigaciones previas que indican que los sistemas agroforestales diversificados pueden mejorar la productividad del cacao al optimizar el microclima del cultivo, reducir el estrés hídrico y favorecer la eficiencia en el uso de nutrientes [13]. Además, la presencia de especies arbóreas de sombra contribuye a regular la temperatura y humedad del sistema, factores determinantes para la estabilidad productiva en escenarios de variabilidad climática.

Mejora en la fertilidad del suelo

Otro de los indicadores evaluados fue la evolución de la fertilidad del suelo en las fincas piloto. Los análisis fisicoquímicos realizados antes y después de la

implementación del modelo agroecológico evidenciaron mejoras significativas en los niveles de materia orgánica y en la capacidad de retención de nutrientes.

Como se presenta en la Tabla 4, el contenido de materia orgánica del suelo aumentó aproximadamente 15 % durante el periodo de estudio, lo cual refleja el impacto positivo de prácticas como el uso de abonos orgánicos, cobertura vegetal permanente y reciclaje de residuos vegetales.

Tabla 4. Indicadores de fertilidad del suelo antes y después de la implementación del modelo agroforestal.

Indicador	Situación inicial	Segundo año
Materia orgánica (%)	2,3	2,6
Retención de humedad (%)	41	49
Actividad biológica del suelo	Media	Alta

Nota. Valores promedio obtenidos a partir de análisis de suelo realizados en las fincas piloto.

El incremento en la materia orgánica constituye un indicador clave de restauración ecológica, ya que mejora la estructura del suelo, favorece la actividad microbiana y aumenta la disponibilidad de nutrientes esenciales para el cultivo [14]. En sistemas agroforestales tropicales, la acumulación de biomasa vegetal y hojarasca contribuye significativamente al mantenimiento de ciclos biogeoquímicos estables.

Diversidad vegetal y estructura del sistema agroforestal

Uno de los objetivos principales del modelo implementado fue fortalecer la biodiversidad funcional dentro de las plantaciones de cacao. Los resultados obtenidos evidencian un incremento notable en la diversidad de especies vegetales presentes en las parcelas evaluadas.

Como se muestra en la Figura 7, el sistema agroforestal diversificado incorporó especies frutales, maderables y de sombra que contribuyen a mejorar la estabilidad ecológica del agroecosistema.

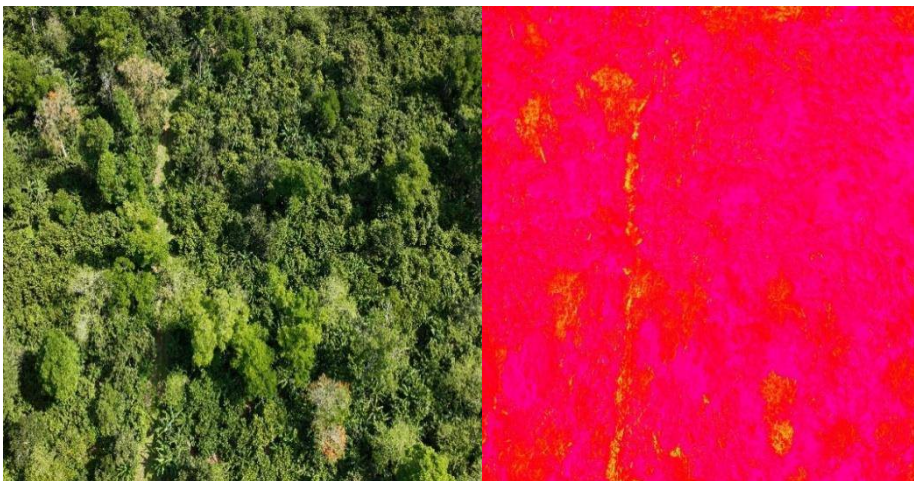


Figura 7. Diversidad de especies vegetales asociadas al sistema agroforestal de cacao.

Nota. Se muestra un aumento en la diversidad estructural del sistema productivo tras la implementación de prácticas agroecológicas. Fuente: Imagen RGB capturada con el Dron DJI Mavic 3 Multiespectral.

La diversificación vegetal cumple múltiples funciones ecológicas dentro del sistema productivo. Entre ellas destacan la regulación del microclima, la protección contra la erosión del suelo y el aumento del hábitat disponible para organismos benéficos que contribuyen al control biológico de plagas. Diversos estudios han demostrado que los sistemas agroforestales de cacao con mayor diversidad estructural presentan una mayor resiliencia frente a eventos climáticos extremos y una mejor estabilidad productiva a largo plazo [15].

Percepción de los productores y aceptación del modelo

La aceptación social del modelo agroecológico fue evaluada mediante encuestas aplicadas a los productores participantes en el proyecto. Los resultados evidencian una valoración positiva del sistema de monitoreo computarizado y de las prácticas agroforestales implementadas.

Como se presenta en la Tabla 5, aproximadamente el 80 % de los productores expresó una percepción favorable respecto a la utilidad del modelo, destacando beneficios relacionados con la mejora del suelo, la reducción de costos en insumos agrícolas y el incremento en la productividad del cultivo.

Tabla 5. Percepción de los productores sobre la implementación del modelo de monitoreo agroforestal.

Indicador evaluado	Porcentaje de productores
Considera el sistema más sostenible	82 %
Percibe mejora en la fertilidad del suelo	78 %
Observa incremento en productividad	76 %
Valora positivamente el monitoreo digital	80 %

Nota. Resultados de las encuestas estructuradas aplicadas a los productores participantes.

La alta aceptación del modelo puede atribuirse a su enfoque participativo, el cual integró capacitación técnica, acompañamiento agronómico y herramientas de monitoreo digital accesibles para los agricultores. Investigaciones recientes destacan que la adopción de prácticas agroecológicas depende en gran medida de la percepción de beneficios tangibles por parte de los productores, así como del acceso a asistencia técnica continua [16].

Integración de tecnologías de monitoreo y sostenibilidad agrícola

Uno de los aportes más relevantes del presente estudio radica en la integración de herramientas computarizadas de monitoreo con enfoques agroecológicos aplicados al manejo del cultivo de cacao. La incorporación de tecnologías de análisis geoespacial, junto con sistemas de registro digital de indicadores productivos y ambientales, permitió generar información precisa y actualizada para apoyar la toma de decisiones en las fincas piloto evaluadas. En este contexto, la Figura 8 presenta el esquema del sistema de monitoreo computarizado basado en RoboFlow y YOLOv8, aplicado al análisis agroforestal del cacao. Este sistema integra herramientas digitales para el registro y entrenamiento de datos, el procesamiento y análisis de información, así como la detección computarizada de insectos plaga sobre mazorcas de cacao, lo que facilita la identificación temprana de problemas fitosanitarios y contribuye a mejorar la gestión sostenible del sistema productivo.

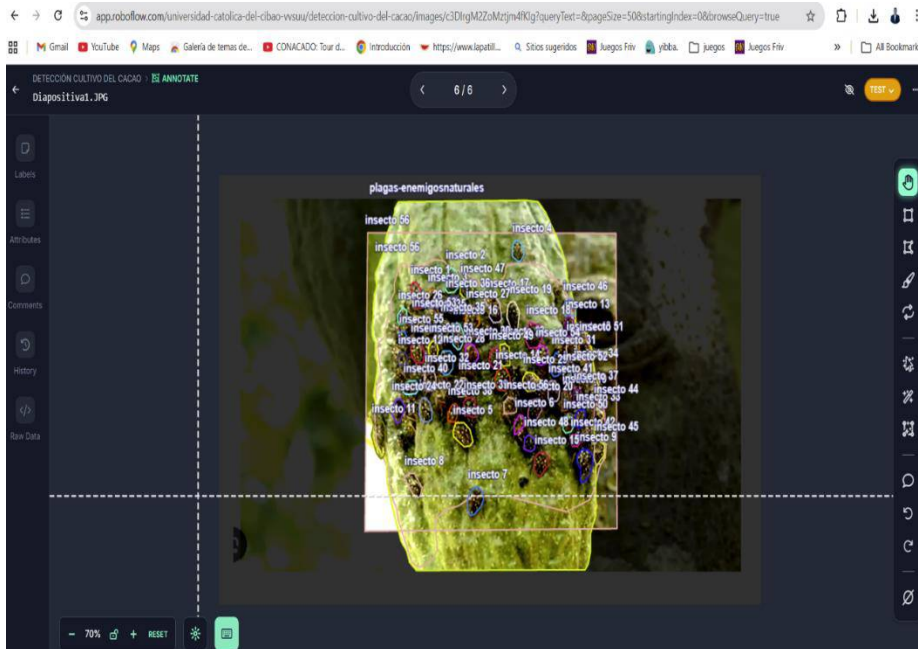


Figura 8. Esquema del sistema de monitoreo computarizado (RoboFlow Yolo V8) aplicado al análisis agroforestal del cacao.

Nota. El sistema integra herramientas digitales de registro y entrenamiento, análisis de datos y detección computarizada de insectos plagas sobre una mazorca de cacao.

Este enfoque coincide con tendencias emergentes en la agricultura sostenible, donde la digitalización del monitoreo agrícola permite mejorar la gestión de recursos y optimizar la productividad sin comprometer la integridad ecológica del sistema [17]. En contextos tropicales vulnerables al cambio climático, el uso de tecnologías de monitoreo puede contribuir significativamente a fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la presente investigación evidenciaron que la implementación de un modelo de monitoreo computarizado integrado con prácticas agroecológicas puede generar mejoras significativas en la sostenibilidad de los sistemas agroforestales de cacao. Los cambios observados en productividad, fertilidad del suelo, biodiversidad funcional y percepción de los productores confirman la pertinencia de combinar herramientas tecnológicas con

enfoques ecológicos de manejo agrícola. Estos hallazgos se alinean con investigaciones recientes que destacan el potencial de los sistemas agroforestales para aumentar simultáneamente la resiliencia climática y la estabilidad productiva en cultivos tropicales [18].

En relación con la productividad del cultivo, el incremento del 12 % observado durante el segundo año de implementación sugiere que las prácticas agroecológicas introducidas contribuyeron a mejorar las condiciones fisiológicas y ecológicas del sistema productivo. Estudios previos han demostrado que los sistemas agroforestales de cacao pueden incrementar la eficiencia del uso de nutrientes y mejorar el microclima del cultivo, factores que favorecen el desarrollo vegetativo y reproductivo de las plantas [19]. Asimismo, la presencia de árboles de sombra contribuye a reducir el estrés térmico e hídrico, condiciones que se vuelven cada vez más relevantes en escenarios de variabilidad climática [20].

Desde la perspectiva edáfica, el aumento del contenido de materia orgánica del suelo constituye uno de los indicadores más relevantes de recuperación ecológica del agroecosistema. La materia orgánica desempeña un papel fundamental en la estructura del suelo, la retención de humedad y la disponibilidad de nutrientes esenciales para el cultivo [21]. En sistemas agroforestales tropicales, la acumulación de hojarasca y biomasa vegetal favorece la formación de agregados estables y el desarrollo de comunidades microbianas activas, lo que contribuye a mejorar los procesos de ciclado de nutrientes y la fertilidad natural del suelo. Estos resultados coinciden con estudios que señalan que la adopción de prácticas agroecológicas como el compostaje, la cobertura vegetal y el reciclaje de residuos orgánicos puede aumentar significativamente el carbono orgánico del suelo y mejorar la sostenibilidad productiva a largo plazo [22].

Por otra parte, el incremento observado en la diversidad de especies vegetales dentro de las fincas piloto evidencia el papel clave de la diversificación agroforestal en la estabilidad ecológica de los sistemas cacaoteros. La incorporación de especies frutales, maderables y de sombra no solo contribuye a diversificar las fuentes de ingreso de los productores, sino que también fortalece los servicios ecosistémicos asociados al sistema productivo, tales como la regulación del microclima, la protección del suelo y el mantenimiento de hábitats para organismos benéficos [23]. Investigaciones realizadas en sistemas agroforestales de cacao en América Latina han demostrado que una mayor

diversidad estructural se asocia con una mayor resiliencia frente a eventos climáticos extremos y una reducción en la incidencia de plagas y enfermedades [24].

Otro aspecto relevante identificado en el estudio es la alta aceptación del modelo por parte de los productores participantes. Aproximadamente el 80 % de los agricultores valoró positivamente la implementación del sistema de monitoreo y las prácticas agroecológicas promovidas. Este resultado confirma la importancia del enfoque participativo en procesos de innovación agrícola, ya que la adopción de nuevas prácticas depende en gran medida de la percepción de beneficios tangibles por parte de los productores y de la disponibilidad de acompañamiento técnico durante el proceso de transición productiva [25]. La integración del conocimiento local con herramientas tecnológicas accesibles facilitó la apropiación del modelo por parte de las comunidades rurales y aumenta las probabilidades de sostenibilidad a largo plazo.

Asimismo, uno de los aportes más innovadores del presente estudio radicó en la incorporación de herramientas de monitoreo computarizado basadas en inteligencia artificial para el análisis fitosanitario del cultivo. La aplicación de modelos de visión computacional como RoboFlow YOLOv8 permitió desarrollar un sistema de detección temprana de insectos plaga a partir de imágenes capturadas en campo, lo cual representa un avance significativo en la digitalización del monitoreo agrícola. Este tipo de tecnologías forma parte de las tendencias emergentes en agricultura inteligente, donde el uso de sensores, análisis de datos y modelos predictivos permite optimizar la gestión productiva sin aumentar la presión sobre los recursos naturales [26].

En conjunto, los resultados obtenidos refuerzan la idea de que la sostenibilidad de la cacaocultura tropical dominicana depende de la integración de múltiples dimensiones del sistema productivo, incluyendo factores ecológicos, tecnológicos y sociales. La evidencia empírica generada en este estudio demuestra que la combinación de prácticas agroecológicas con herramientas digitales de monitoreo puede mejorar simultáneamente la productividad agrícola, la salud del suelo y la biodiversidad del agroecosistema.

Finalmente, los hallazgos del estudio sugieren que el modelo propuesto posee un alto potencial de replicabilidad en otras regiones cacaoteras con condiciones agroecológicas similares. No obstante, futuras investigaciones deberán ampliar la

escala de análisis e incorporar periodos de monitoreo más prolongados con el fin de evaluar los efectos a largo plazo de la transición agroecológica y del uso de tecnologías de monitoreo digital en la sostenibilidad de los sistemas agroforestales de cacao.

Limitaciones y perspectivas futuras

Es necesario reconocer las limitaciones inherentes al presente estudio. Una de las principales restricciones se relaciona con el tamaño de la muestra y el alcance territorial de la investigación, ya que el análisis se realizó en un conjunto de diez fincas piloto ubicadas en regiones específicas de producción cacaotera. Si bien estos sistemas representan condiciones agroecológicas típicas de la cacaocultura dominicana, la variabilidad ambiental, edáfica y productiva presente en otras zonas tropicales podría generar comportamientos diferentes en los indicadores evaluados. Asimismo, parte de la información productiva utilizada en el análisis fue registrada por los propios productores mediante sistemas de monitoreo participativo, lo que podría introducir ligeras variaciones asociadas a procesos de registro manual o diferencias en la periodicidad de los datos recopilados. Investigaciones previas han señalado que los sistemas de monitoreo participativo pueden presentar variaciones en la precisión de los registros, especialmente en contextos de agricultura familiar donde las capacidades técnicas y los recursos disponibles pueden ser heterogéneos.

Adicionalmente, aunque la integración de herramientas de monitoreo computarizado y modelos de visión artificial, como los sistemas basados en RoboFlow y YOLOv8, mostró un alto potencial para apoyar el análisis agroforestal y la detección temprana de plagas, su implementación depende de la disponibilidad de infraestructura tecnológica, conectividad y procesos de capacitación técnica para los productores. En este sentido, el sistema propuesto debe ser entendido como una herramienta de apoyo para la gestión agrícola, y no como un sustituto del conocimiento agronómico especializado ni de los procesos de diagnóstico técnico realizados por extensionistas y especialistas en sanidad vegetal.

En cuanto a las perspectivas futuras, se recomienda ampliar el alcance de la investigación mediante la incorporación de un mayor número de fincas y regiones productoras, lo que permitiría validar la robustez del modelo agroecológico y del

sistema de monitoreo digital en diferentes contextos ambientales. Asimismo, futuras investigaciones podrían profundizar en la integración de sensores ambientales, tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) y modelos predictivos basados en inteligencia artificial para fortalecer los sistemas de alerta temprana frente a plagas, enfermedades y variabilidad climática. De manera complementaria, tal como señalan diversos estudios sobre agricultura digital y agroecología aplicada [27], el desarrollo de plataformas de agricultura inteligente permitirá avanzar hacia sistemas productivos más resilientes, capaces de integrar información climática, biológica y productiva en tiempo real para optimizar la sostenibilidad y la toma de decisiones en los sistemas cacaoteros tropicales [27].

CONCLUSIONES

En primer lugar, se diseñó e implementó con éxito un modelo de monitoreo computarizado y análisis agroforestal aplicado al cultivo de cacao, orientado a fortalecer la sostenibilidad productiva frente a los desafíos asociados al cambio climático en sistemas agrícolas tropicales. Se concluye que la integración de prácticas agroecológicas con herramientas de monitoreo digital y análisis de datos permite evaluar de manera sistemática variables clave del sistema productivo, tales como la productividad del cultivo, la calidad del grano, la fertilidad del suelo y la biodiversidad funcional. Este enfoque metodológico demuestra que es posible mejorar la gestión de las fincas cacaoteras mediante el uso de tecnologías accesibles que facilitan la toma de decisiones basada en evidencia.

En segundo lugar, los resultados empíricos obtenidos durante el período de monitoreo evidenciaron mejoras significativas en los indicadores productivos y ambientales de las fincas piloto. Se registró un incremento promedio del 12 % en la productividad del cultivo, acompañado de un aumento del 15 % en el contenido de materia orgánica del suelo, lo que sugiere que la implementación de prácticas agroecológicas contribuye simultáneamente a la mejora de la fertilidad edáfica y al fortalecimiento de la resiliencia del sistema productivo. Estos hallazgos respaldan la hipótesis de que la adopción de estrategias de manejo sostenible en sistemas agroforestales de cacao puede generar beneficios ambientales y económicos a mediano plazo.

Asimismo, el análisis de la estructura ecológica del sistema agroforestal evidenció un incremento en la diversidad de especies vegetales asociadas, lo cual favorece la estabilidad ecológica del agroecosistema, mejora la regulación biológica de

plagas y contribuye a la conservación de la biodiversidad en paisajes agrícolas tropicales. Este resultado confirma la importancia de los sistemas agroforestales como modelos de producción compatibles con los principios de sostenibilidad ambiental y adaptación climática.

En tercer lugar, se demostró la viabilidad tecnológica del sistema de monitoreo computarizado basado en herramientas de inteligencia artificial, incluyendo modelos de visión computacional entrenados mediante plataformas como RoboFlow y arquitecturas de detección de objetos del tipo YOLOv8. La implementación de estas tecnologías permitió desarrollar mecanismos de identificación automática de insectos plaga sobre mazorcas de cacao, facilitando procesos de monitoreo fitosanitario más eficientes y oportunos dentro de las fincas piloto. Este tipo de soluciones tecnológicas amplía las posibilidades de aplicación de la agricultura digital en sistemas productivos de pequeña y mediana escala.

Finalmente, la evidencia obtenida indica que la integración de agroecología, monitoreo digital e inteligencia artificial constituye una estrategia viable para fortalecer la sostenibilidad de los sistemas cacaoteros tropicales. La principal contribución de este estudio radica en la propuesta de un modelo de gestión agroforestal basado en información digital y participación de los productores, capaz de mejorar la productividad agrícola, promover la conservación ambiental y apoyar procesos de adaptación al cambio climático. En este sentido, el modelo desarrollado puede ser considerado una herramienta replicable para impulsar la transición hacia sistemas agrícolas más resilientes, sostenibles y tecnológicamente integrados en el contexto de la cacaocultura latinoamericana.

Contribución y autoría

E.A.I.F., E.E.Z. y A.R.S.: Conceptualización, diseño metodológico, investigación, curación de datos, análisis formal y redacción: preparación del borrador original.

E.E.Z.: Desarrollo del componente tecnológico, software, implementación del sistema de monitoreo computarizado y visualización de resultados.

A.R.S.: Validación de resultados, supervisión académica, revisión crítica del contenido y redacción: revisión y edición del manuscrito.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

E.A.I.F., E.E.Z., and A.R.S.: Conceptualization, methodological design, investigation, data curation, formal analysis, and writing: original draft preparation.

E.E.Z.: Software development, implementation of the computerized monitoring system, and visualization of results.

A.R.S.: Validation of results, academic supervision, critical review of the content, and writing: review and editing of the manuscript.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Financiamiento

La presente investigación fue financiada por el Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONDOCYT) en el marco de la Convocatoria 2023, administrada por el Ministerio de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (MESCyT) de la República Dominicana. El estudio forma parte del proyecto titulado “Análisis geomorfológico, biofísico y fotogramétrico de sistemas agroforestales asociados al cultivo del cacao (*Theobroma cacao* L.) en República Dominicana”, identificado con el código FONDOCYT-2023-1-2D6-0651. Este financiamiento fue otorgado para apoyar el desarrollo de investigaciones científicas orientadas al fortalecimiento de la sostenibilidad agrícola, la innovación tecnológica y la generación de conocimiento aplicado al sector cacaotero nacional. Asimismo, el proyecto contó con el respaldo institucional de las universidades participantes en el marco de sus actividades académicas y de investigación.

Declaración ética

Se declara que la presente investigación se desarrolló bajo principios de ética en investigación y participación comunitaria, centrada en el monitoreo computarizado y análisis agroforestal de fincas cacaoteras piloto. Todos los datos primarios fueron recolectados directamente en las fincas con el consentimiento informado de los productores, quienes fueron debidamente notificados sobre los objetivos, procedimientos y alcances del estudio.

Por esta razón, el estudio no implicó experimentación invasiva ni manipulación de organismos humanos ni animales. Se garantiza la confidencialidad y el anonimato de la información proporcionada por los productores, cumpliendo con los estándares de protección de datos personales. La investigación se desarrolló respetando los principios de participación voluntaria, transparencia y reconocimiento del conocimiento local, promoviendo la co-construcción de soluciones sostenibles para el manejo agroforestal del cacao.

Uso de inteligencia artificial

La concepción del estudio, el diseño experimental, el análisis e interpretación de los resultados, así como la redacción y revisión crítica del manuscrito, fueron realizados de manera autónoma por los autores, quienes asumen la responsabilidad plena por el contenido final del artículo. Los autores declaran que se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa de forma asistida exclusivamente para apoyar tareas técnicas de programación.

Disponibilidad de datos

Los datos y los artefactos de investigación que respaldan los resultados de este estudio están disponibles de forma abierta en el repositorio Roboflow, correspondiente al proyecto de detección del cultivo del cacao: <https://app.roboflow.com/universidad-catolica-del-cibao-vvsuu/deteccion-cultivo-del-cacao/2/notebook/yolov8>

Asimismo, con el objetivo de garantizar la reproducibilidad computacional, el código fuente completo, los scripts de preprocesamiento, la configuración del entrenamiento y los módulos de despliegue han sido depositados en el repositorio público del mismo proyecto, accesible mediante el enlace anterior.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés de carácter financiero, académico o personal en relación con la realización, interpretación o publicación del presente trabajo de investigación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Católica del Cibao (UCATECI) por su apoyo institucional y facilidades brindadas para la ejecución de esta investigación. Se reconoce también la colaboración del equipo de Roboflow por permitir el acceso a las herramientas y repositorios utilizados en el desarrollo del modelo de detección del cultivo del cacao.

Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento a la Coordinadora Nacional de Cacaocultores Dominicanos (CONACADO) por su valiosa colaboración, facilitando el acceso a parcelas cacaoteras y aportando conocimientos prácticos que enriquecieron la recolección de datos y la validación de los resultados del estudio. De igual manera, agradecemos a la Estación Experimental de Cacao del IDIAF en Mata Larga, San Francisco de Macorís, por su apoyo técnico y logístico durante las actividades de campo.

REFERENCIAS

- [1] R. A. Fisher, *Statistical Methods for Research Workers*, 13th ed., Edinburgh: Oliver & Boyd, 1970.
- [2] P. K. Sen, *Applied Nonparametric Statistics*, 2nd ed., New York, NY: John Wiley & Sons, 1985.
- [3] J. Cohen, *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd ed., Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 1988.
- [4] R. Chambers, *Participatory Rural Appraisal (PRA): Analysis and Experience*, London, UK: Intermediate Technology Publications, 1994.
- [5] G. Schroth et al., *Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes*, Washington, DC: Island Press, 2004.

- [6] D. A. Pimentel et al., "Soil organic matter and sustainability of agroecosystems," *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 121, pp. 123-136, 2007.
- [7] T. Tschardt et al., "Conservation biological control and ecosystem services in agroforestry landscapes," *Ecology Letters*, vol. 10, pp. 635-643, 2007.
- [8] J. Pretty, *Agroecological Approaches to Sustainable Agriculture*, London, UK: Earthscan, 2008.
- [9] J. Vandermeer, *The Ecology of Agroecosystems*, 2nd ed., Sunderland, MA: Sinauer Associates, 2011.
- [10] M. Tschardt et al., "Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification," *Biological Conservation*, vol. 151, pp. 53-59, 2012.
- [11] R. Clough et al., "Biodiversity and productivity in cocoa agroforests: Effects of shade tree diversity on yields," *Ecological Applications*, vol. 22, no. 5, pp. 1224-1236, 2012.
- [12] P. Läderach et al., "Predicting the future climatic suitability for cocoa farming of the world's leading producer countries," *Climatic Change*, vol. 119, pp. 841-854, 2013.
- [13] World Medical Association, *Declaration of Helsinki - Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects*, Fortaleza, Brasil, 2013.
- [14] R. Clough et al., "Agroforestry systems for sustainable cocoa production: Evidence from Latin America," *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 197, pp. 101-110, 2014.
- [15] M. A. Schroth y G. Läderach, *Agroforestry and Cocoa Production: Opportunities and Challenges*, London, UK: Routledge, 2015.
- [16] G. Schroth et al., "Agroforestry and biodiversity conservation in cocoa landscapes," *Biodiversity and Conservation*, vol. 24, no. 6, pp. 1501-1520, 2015.
- [17] A. E. Somarriba, "Agroforestry systems for sustainable cocoa production," *Cocoa Research Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 45-55, 2016.
- [18] R. Clough et al., "Implementing agroecology in smallholder cocoa farms," *Agroecology and Sustainable Food Systems*, vol. 41, pp. 1090-1107, 2017.

- [19] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed., Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017.
- [20] F. M. Kremen et al., "Pollination and crop yield," *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, vol. 48, pp. 497-522, 2017.
- [21] A. Wolfert et al., "Big Data in Smart Farming - A review," *Agricultural Systems*, vol. 153, pp. 69-80, 2017.
- [22] J. A. Perfecto et al., *Nature's Matrix: Linking Agriculture, Conservation and Food Sovereignty*, 2nd ed., London, UK: Earthscan, 2019.
- [23] FAO, *The State of Food and Agriculture 2020*, Roma: Food and Agriculture Organization, 2020.
- [24] L. K. van Vliet et al., "Challenges for smallholder cocoa production under climate change," *Agricultural Systems*, vol. 176, 2020.
- [25] FAO y ICCO, *Cocoa Market Review 2021*, Roma: FAO/ICCO, 2021.
- [26] I. Herrera et al., "Agroecological characterization of cocoa systems in the Dominican Republic," *Revista Dominicana de Ciencias Agropecuarias*, vol. 7, no. 1, pp. 23-36, 2021.
- [27] CONACADO, *Informe anual de producción de cacao orgánico en República Dominicana*, La Vega, RD, 2022.

Biografía de los autores

Ender Antonio Iñiguez Freites es Doctor en Biotecnología Agrícola Mención Vegetal, Master en Desarrollo Agrario Sostenible, y Profesor Investigador Asociado a la Vicerrectoría de Investigación y Asuntos Académicos de Posgrado en la Universidad Católica del Cibao (UCATECI), La Vega, República Dominicana. Sus líneas de investigación incluyen agricultura digital, sistemas agroforestales sostenibles, resiliencia climática en cultivos tropicales y biotecnología aplicada a la producción agrícola. Es autor de múltiples publicaciones científicas sobre innovación tecnológica en el sector agropecuario.

Ezequiel Echevarría Zamora es MSc. en Ciencias Agroecológicas y Profesor en la Facultad de Ciencias Biológicas y Naturales de la Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra (PUCMM), Santo Domingo, República Dominicana. Sus investigaciones se centran en agroforestería, análisis ecológico de cultivos y

gestión sostenible de fincas productivas. Ha participado como investigador principal en proyectos de conservación de biodiversidad y sostenibilidad agrícola en la región del Caribe.

Agripina Ramírez Sánchez es Doctora en Biodiversidad y Gestión Ambiental, Máster En Biología Molecular y Biotecnología y profesora de la Facultad de Ciencias Sociales de la Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD), República Dominicana. Su trabajo se enfoca en el desarrollo rural, la participación comunitaria en proyectos agroecológicos y el análisis socioeconómico de sistemas productivos sostenibles. Ha colaborado en proyectos de fortalecimiento de capacidades para agricultores en sistemas agroforestales.

Descargo de responsabilidad

Los libros y capítulos de libros publicados en la Editorial Unión Científica representan únicamente las opiniones de los autores. La Editorial Unión Científica, su equipo editorial y sus revisores no se hacen responsables del contenido, las interpretaciones o las consecuencias derivadas de la aplicación de los métodos o conclusiones incluidos en los trabajos. Todas las publicaciones se rigen por las políticas éticas de la editorial.

Modelo piloto de conversión agroecológica en fincas de cacao (*Theobroma cacao* L.) asociadas a la Confederación Nacional de Cacaocultores Dominicanos (CONACADO)

Pilot model of agroecological conversion in cocoa farms (*Theobroma cacao* L.) Associated with the National Confederation of Dominican Cacao Growers (CONACADO)

Ender Antonio Iñiguez Freites^{1*}, Ezequiel Echevarría Zamora², Agripina Ramírez Sánchez³

¹ Vicerrectorado de Investigación y Posgrado, Universidad Católica del Cibao (UCATECI), La Vega, República Dominicana. <https://www.ucateci.edu.do/>

² Facultad de Ciencias Biológicas y Naturales, Pontificia Universidad Católica Madre Maestra (PUCMM), Santo Domingo, República Dominicana.

³ Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD), Santo Domingo, República Dominicana

✉ einiguez@ucateci.edu.do

| ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9609-8898>

✉ echevarria@ce.pucmm.edu.do

| ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8203-5413>

✉ agripinars@gmail.com

| ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0140-152X>

E-mail de correspondencia: einiguez@ucateci.edu.do

Serie Monográfica

Glebe.

e-ISSN: 3103-1234

Vol. 2(1) enero - abril 2026

Desafíos de la sociedad contemporánea

ISBN: 978-9942-7391-9-3

Editor académico

Carlos Vásquez

Universidad Técnica de Ambato. Ecuador.

Tipo de revisión

Capítulo de libro revisado por dos pares expertos en modalidad doble ciego.

Como citar este capítulo

Iñiguez Freites, E. A., Echevarría Zamora, E., & Ramírez Sánchez, A. (2026). Monitoreo computarizado y análisis agroforestal del cacao como estrategia de sostenibilidad ante el cambio climático. En Serie Glebe (Vol. 2, Núm. 1, Cap. 2, e2).

<https://doi.org/10.63804/gb.v2i1.e2>

Resumen

La producción de cacao enfrenta el desafío de equilibrar la productividad agrícola con la sostenibilidad ambiental, especialmente en sistemas agroforestales tropicales. La transición hacia modelos agroecológicos se presenta como una estrategia para fortalecer la resiliencia climática, mejorar la fertilidad del suelo y conservar la biodiversidad funcional. Este estudio diseñó e implementó un modelo piloto de conversión agroecológica en 10 fincas asociadas a la Confederación Nacional de Cacaocultores Dominicanos (CONACADO). El modelo integró cuatro componentes principales: diagnóstico agroecológico, capacitación técnica a productores, implementación de prácticas agroecológicas y monitoreo sistemático de indicadores productivos y ambientales. Se recopiló datos mediante métodos cuantitativos, incluyendo medición de productividad y análisis de fertilidad edáfica, así como métodos cualitativos,

Copyright

© 2026 Los autores. Este es un capítulo de libro de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International ([CC BY-NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) 4.0). Se autoriza el uso, distribución y reproducción de este contenido en cualquier medio, de forma irrestricta, siempre que se otorgue el crédito a los autores originales y se cite debidamente la fuente primaria de publicación.

Recibido: 11 de noviembre de 2025

Revisado: 18 de diciembre de 2025

Aceptado: 20 de abril de 2026

Publicado: 28 de abril de 2026

evaluando la percepción de los productores sobre el impacto del modelo. Durante el segundo año de implementación, la productividad del cacao mostró un incremento promedio del 12 %, mientras que el contenido de materia orgánica del suelo aumentó un 15 %, evidenciando mejoras significativas en la calidad del suelo. Además, se observó un fortalecimiento de la biodiversidad funcional, reflejado en la presencia de especies asociadas a la dinámica agroforestal. En términos de percepción, el 80 % de los productores reportó beneficios tangibles, destacando mejoras económicas, sociales y ambientales derivadas de la adopción de prácticas agroecológicas. Los resultados confirman la viabilidad técnica y las ventajas multidimensionales de la transición agroecológica en fincas de cacao, ofreciendo un marco metodológico replicable que puede ser aplicado en otras unidades productivas. Este modelo piloto demuestra que la integración de herramientas de monitoreo sistemático con prácticas agroecológicas contribuye significativamente a la sostenibilidad ambiental, la resiliencia productiva y la valorización social del sector cacaotero en contextos tropicales.

Palabras clave: agroecología; biodiversidad funcional; productividad agrícola; sostenibilidad ambiental; *Theobroma cacao*.

ABSTRACT

Cocoa production faces the challenge of balancing agricultural productivity with environmental sustainability, particularly within tropical agroforestry systems. The transition toward agroecological models is emerging as a strategic pathway to strengthen climate resilience, improve soil fertility, and conserve functional biodiversity. This study designed and implemented a pilot agroecological conversion model in 10 farms associated with the National Confederation of Dominican Cocoa Producers (CONACADO). The model integrated four main components: agroecological diagnosis, technical training for farmers, implementation of agroecological practices, and systematic monitoring of productive and environmental indicators. Data were collected using quantitative methods, including productivity measurements and soil fertility analysis, as well as qualitative methods that assessed farmers' perceptions regarding the impact of the model. During the second year of implementation, cocoa productivity showed an average increase of 12 %, while soil organic matter content increased by 15 %, indicating significant improvements in soil quality. Additionally, a strengthening of functional biodiversity was observed, reflected in the presence of species associated with agroforestry dynamics. In terms of perception, 80 % of farmers reported tangible benefits, highlighting economic, social, and environmental improvements resulting from the adoption of agroecological practices. The results confirm the technical feasibility and multidimensional advantages of agroecological transition in cocoa farms, providing a replicable methodological framework that can be applied to other production units. This pilot model demonstrates that the integration of systematic monitoring tools with agroecological practices significantly contributes to environmental sustainability, productive resilience, and the social valorization of the cocoa sector in tropical contexts.

Keywords: agroecology; functional biodiversity; agricultural productivity; environmental sustainability; *Theobroma cacao*.

INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad de la producción de cacao representa un desafío estratégico de gran relevancia económica, social y ambiental en las regiones tropicales, especialmente en América Latina, donde millones de pequeños productores dependen de este cultivo para su subsistencia. En la República Dominicana, el cacao orgánico certificado constituye aproximadamente el 60 % de las exportaciones mundiales, con un valor estimado de 180 millones de dólares anuales, sustentado por más de 40,000 familias organizadas en cooperativas como CONACADO. Este sector genera empleo para cerca de 200,000 personas, contribuyendo a la seguridad alimentaria y la conservación de paisajes agroforestales [1], [2].

A pesar de su importancia, la cacaocultura dominicana enfrenta desafíos estructurales frente al cambio climático. La evidencia sugiere que la agroecología ofrece beneficios significativos; sin embargo, persisten vacíos en modelos contextualizados. Se observa una escasa evaluación integral de la sostenibilidad y una comprensión insuficiente de las dinámicas temporales de la transición agroecológica. Los factores de adopción deben ser abordados desde una perspectiva sociotécnica [3], [4].

METODOLOGÍA

Enfoque, alcance y diseño

La investigación se enmarca en el paradigma cuantitativo, con análisis estadístico de datos numéricos y categóricos para comprobar hipótesis relacionadas con la productividad, la calidad del cacao y variables edáficas. La estructura metodológica se diseñó para minimizar sesgos y garantizar la reproducibilidad de los resultados [5].

El diseño combina un enfoque longitudinal no experimental para el diagnóstico y monitoreo, junto con un diseño experimental aplicado para la implementación del modelo agroecológico. El alcance es descriptivo, correlacional y explicativo, orientado a generar un modelo escalable para sistemas agroforestales de cacao [6].

Como se muestra en la Figura 1, el flujo metodológico se organiza en cuatro fases: diagnóstico, planificación, implementación y evaluación.



Figura 1. Flujo metodológico del estudio.

La Figura 1 muestra el flujo metodológico del estudio, organizado en cuatro fases secuenciales: Diagnóstico, donde se identifican las condiciones iniciales de las fincas; Planificación, en la que se diseñan las estrategias agroecológicas; Implementación, fase en la que se aplican las prácticas propuestas en campo; y evaluación, donde se analizan los resultados productivos y ambientales obtenidos. Este esquema resume de manera sintética el proceso utilizado para desarrollar y validar el modelo agroecológico en las fincas de cacao.

Población y adquisición de datos

Se seleccionaron 10 fincas piloto de un universo de 47, considerando criterios biofísicos, socioeconómicos y geográficos [7].

La recolección de datos se realizó mediante registros productivos, muestreo edáfico y de biodiversidad, así como a través de encuestas y grupos focales orientados a la obtención de información socioeconómica y de percepción de los productores.

Las características de la población de estudio se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de la población de estudio.

Provincia	Nº fincas piloto	Edad promedio de plantaciones	Cobertura de sombra (%)	Asociación CONACADO
Duarte	4	12 años	55	Sí
Sánchez R.	3	10 años	60	Sí
San Fco. Macorís	3	8 años	50	Sí

Preprocesamiento y selección de variables

Los datos fueron depurados mediante la eliminación de duplicados y registros inconsistentes [8]. Posteriormente, se evaluaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas.

Las variables consideradas en el análisis se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Variables consideradas en el análisis.

Componente	Variables principales
Productivas	Producción kg/ha, peso 100 granos, índice de fermentación
Edáficas	pH, materia orgánica, N, P, K, CIC, densidad aparente
Biodiversidad funcional	Riqueza arbórea, índice Shannon-Wiener, abundancia fauna
Socioeconómicas	Costos e ingresos, rentabilidad, percepción de productores

Arquitectura del modelo y estrategia de implementación

El modelo se implementó en cuatro fases secuenciales: diagnóstico participativo, planificación, implementación y evaluación.

Se aplicaron prácticas agroecológicas como cobertura viva, compostaje, biofertilizantes, poda de sombra regulada y fermentación controlada [9].

Como se muestra en la Figura 2, el modelo integra principios agroecológicos, normativas nacionales y estrategias orientadas a la sostenibilidad productiva.



Figura 2. Esquema del modelo piloto de conversión agroecológica.

La Figura 2 presenta el esquema conceptual del modelo piloto de conversión agroecológica, el cual se fundamenta en los 13 principios de la agroecología y en 10 elementos clave para la transición hacia sistemas productivos sostenibles. Asimismo, muestra su articulación con el marco institucional y normativo de la República Dominicana, incluyendo el Decreto No. 819-03 y la Política de Producción Agroecológica 2025-2030. El modelo tiene como objetivo transformar fincas cacaoteras hacia un manejo 100 % agroecológico, sostenible y certificable, y se implementa inicialmente en varias provincias productoras de cacao, como Hato Mayor, Monte Plata, Sánchez Ramírez y Gaspar Hernández, promoviendo prácticas amigables con el ambiente, resiliencia climática y sostenibilidad productiva.

Estrategia de capacitación

El programa combinó talleres teórico-prácticos, escuelas de campo y asistencia técnica individualizada [10].

Los detalles de estos componentes se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Componentes del programa de capacitación.

Modalidad	Duración	Contenido principal	Indicadores de logro
Talleres prácticos	2 días	Biofertilizantes, compostaje	80 % productores aplican técnicas
Escuelas de campo	1 semana	Manejo sombra, control biológico	Incremento de biodiversidad
Asistencia técnica	Mensual	Ajustes personalizados	Cumplimiento de planes de acción

Evaluación de indicadores

Se establecieron indicadores productivos, edáficos, ecológicos y socioeconómicos [11].

El sistema de monitoreo se presenta en la Figura 3, incluyendo evaluaciones mensuales y semestrales.



Figura 3. Sistema de Seguimiento de Indicadores de Progreso.

La Figura 3 muestra el sistema de seguimiento de indicadores de progreso aplicado al modelo de conversión agroecológica en fincas de cacao. El esquema integra mecanismos de monitoreo periódico, que incluyen visitas técnicas mensuales para evaluar el avance de las prácticas implementadas y evaluaciones semestrales orientadas al análisis integral del estado agroecológico y del proceso de certificación. Asimismo, se presentan indicadores clave de desempeño, Tabla 4, como el incremento de la materia orgánica del suelo, la reducción en el uso de agroquímicos y el aumento en el número de especies registradas, los cuales permiten medir los avances en términos de sostenibilidad ambiental, biodiversidad y mejora del sistema productivo.

Tabla 4. Indicadores medidos por componente.

Componente	Indicadores clave
Productivos	Rendimiento, peso de granos, índice de fermentación
Edáficos	pH, materia orgánica, nutrientes, CIC, actividad biológica
Biodiversidad funcional	Índice Shannon-Wiener, riqueza arbórea, cobertura de sombra
Socioeconómicos	Costos, ingresos, relación beneficio/costo, percepción

Análisis estadístico

Se utilizó R para análisis cuantitativo (ANOVA, correlaciones, PCA) y MAXQDA para análisis cualitativo [12].

Consideraciones éticas

Todos los productores otorgaron consentimiento informado, garantizando confidencialidad y derecho a retirarse.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos tras la implementación del modelo piloto de conversión agroecológica evidencian mejoras significativas en múltiples dimensiones del sistema productivo cacaotero, incluyendo salud del suelo, biodiversidad funcional, sanidad del cultivo, rentabilidad económica y percepción de los productores. A continuación, se presentan los principales resultados derivados del monitoreo realizado durante los primeros dos años de implementación del modelo.

La discusión integra evidencia cuantitativa proveniente del monitoreo sistemático realizado durante dos años, complementada con un análisis cualitativo basado en la percepción de los productores participantes. De esta manera, los resultados se contrastan con la literatura científica existente sobre transición agroecológica en sistemas agroforestales tropicales, permitiendo contextualizar los efectos observados en términos de sostenibilidad ambiental, resiliencia productiva y viabilidad económica [13].

Evaluación del desempeño productivo del sistema agroecológico

En lo que respecta al rendimiento productivo del cacao, se observó un incremento sostenido durante el período de evaluación. Como se muestra en la Tabla 5, la productividad aumentó progresivamente durante el período de evaluación.

Tabla 5. Evolución de la productividad de cacao en fincas piloto (n = 10).

Año de evaluación	Productividad (kg/ha)	Desviación estándar	Incremento (%)
Línea base	610	±95	—
Año 1 (2024)	655	±88	+7.4

Año 2 (2025)	683	±91	+11.9
--------------	-----	-----	-------

Los resultados indican que la implementación de prácticas agroecológicas, incluyendo manejo de sombra, incorporación de materia orgánica y control biológico, contribuyó a mejorar gradualmente la productividad del cultivo.

Este comportamiento coincide con estudios previos en sistemas agroforestales, donde los beneficios productivos de la agroecología suelen manifestarse progresivamente conforme mejora la estructura del suelo y la estabilidad ecológica del sistema [14].

Mejora en la fertilidad del suelo

Uno de los impactos más relevantes del modelo agroecológico se observó en los indicadores de fertilidad edáfica. En particular, el contenido de materia orgánica del suelo mostró un incremento significativo durante el período de evaluación.

Los resultados de fertilidad se presentan en la Tabla 6 y la evolución de materia orgánica en la Figura 4.

Tabla 6. Evolución de indicadores de fertilidad del suelo.

Indicador	Línea base	Año 2	Cambio (%)
Materia orgánica (%)	2,4	2,76	+15
pH del suelo	5,4	5,6	+3,7
Capacidad de retención de humedad (%)	31	35	+12,9

Como se muestra en la Figura 4, el incremento en la materia orgánica refleja mejoras sustanciales en la calidad del suelo y en su capacidad para sostener procesos biológicos importantes.

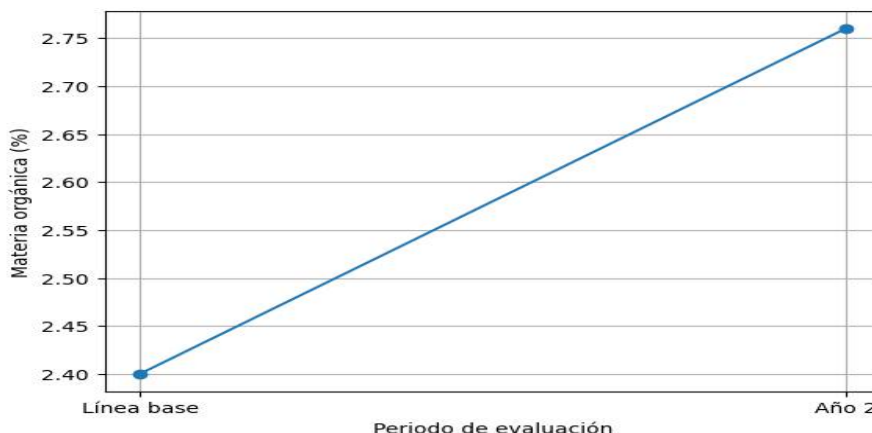


Figura 4. Evolución del contenido de materia orgánica del suelo durante el período de implementación del modelo agroecológico.

La Figura 4 presenta la evolución del contenido de materia orgánica del suelo en las fincas piloto durante el período de implementación del modelo agroecológico. Se observa un incremento desde la línea base hasta el segundo año de evaluación, lo que evidencia mejoras en la fertilidad del suelo asociadas a la aplicación de prácticas agroecológicas como la incorporación de residuos orgánicos, el uso de abonos naturales y el manejo de coberturas vegetales. Este aumento refleja una mayor capacidad del suelo para retener nutrientes y sostener la actividad biológica del agroecosistema.

La literatura científica ha demostrado que los sistemas agroecológicos incrementan la actividad microbiana del suelo y la disponibilidad de nutrientes, lo cual contribuye a mejorar la productividad agrícola y la resiliencia del sistema frente a eventos climáticos extremos [15].

Fortalecimiento de la biodiversidad funcional

Otro resultado relevante fue el aumento en la biodiversidad funcional dentro de las parcelas agroforestales. Durante el proceso de monitoreo se registró un incremento en la diversidad de especies asociadas al sistema productivo.

El incremento en biodiversidad se evidencia en la Tabla 7 y se ilustra en la Figura 5.

Tabla 7. Registro de biodiversidad funcional en fincas piloto.

Categoría	Línea base	Año 2	Cambio
Especies arbóreas asociadas	12	17	+41,6%
Especies polinizadoras observadas	8	13	+62,5%
Especies de control biológico	5	9	+80%

Como se ilustra en la Figura 5, la diversificación del sistema agroforestal favoreció la presencia de organismos beneficiosos que contribuyen al equilibrio ecológico del cultivo.

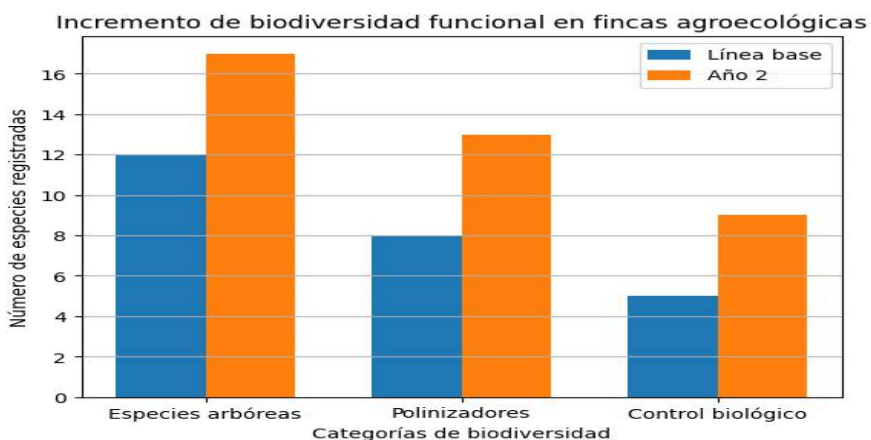


Figura 5. Incremento de biodiversidad funcional en fincas agroecológicas.

La Figura 5 muestra el aumento en el número de especies registradas en diferentes categorías de biodiversidad funcional entre la línea base y el segundo año de implementación del modelo agroecológico. La diversificación de especies vegetales y la reducción del uso de agroquímicos favorecieron la presencia de polinizadores, especies arbóreas asociadas y organismos de control biológico, fortaleciendo el equilibrio ecológico del sistema productivo.

Este resultado es consistente con investigaciones previas que destacan que los sistemas agroecológicos promueven la regulación natural de plagas y enfermedades, reduciendo la dependencia de insumos químicos [16].

Salud del suelo y actividad biológica

Actividad biológica del suelo

Los indicadores de actividad biológica mostraron incrementos sustanciales y estadísticamente significativos durante el período de evaluación. La respiración edáfica, medida integrada de actividad metabólica microbiana, aumentó 42,3 %, pasando de $28,4 \pm 7,6$ a $40,4 \pm 9,8$ mg CO₂/kg/día ($p = 0,002$). Este incremento indica comunidades microbianas más activas y abundantes, lo cual refleja mayor disponibilidad de sustratos carbonados derivados de residuos orgánicos y mejores condiciones ambientales del suelo.

La biomasa microbiana de carbono aumentó 44,1 %, de 186 ± 48 a 268 ± 64 mg C/kg ($p = 0,001$), mientras que la biomasa microbiana de nitrógeno incrementó 43,8 %, alcanzando $34,8 \pm 8,2$ mg N/kg ($p = 0,003$). Estos cambios evidencian una expansión significativa del pool microbiano, considerado el principal motor de procesos ecosistémicos clave como descomposición de residuos, ciclaje de nutrientes, supresión de patógenos y formación de agregados del suelo.

La relación C microbiano/C orgánico aumentó 23,7 %, pasando de $1,52 \pm 0,38$ % a $1,88 \pm 0,46$ % ($p = 0,026$), lo que indica que la materia orgánica incorporada fue eficientemente colonizada por microorganismos. Valores superiores a 1,5 % son considerados indicadores de suelos biológicamente activos y funcionalmente saludables.

Asimismo, las actividades enzimáticas de ureasa y fosfatasa aumentaron 46,5 % y 45,3 %, respectivamente, reflejando un incremento en la capacidad funcional del suelo para liberar nutrientes mediante procesos biológicos.

Los resultados detallados se presentan en la Tabla 8 y la evolución en la Figura 6.

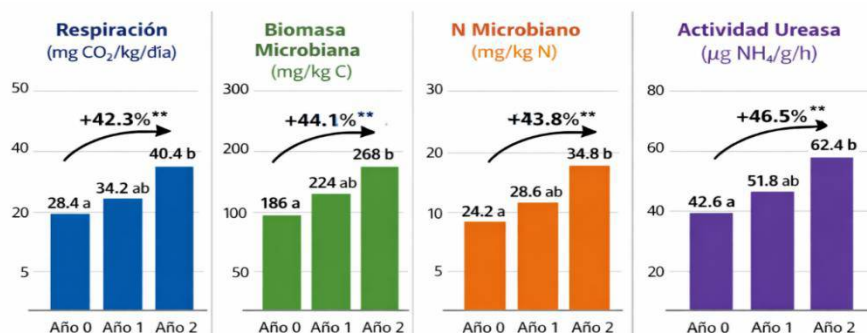


Figura 6. Actividad biológica del suelo (Año 0-2).

La Figura 6 muestra la evolución de los principales indicadores biológicos del suelo durante los dos primeros años de implementación del modelo agroecológico. La respiración microbiana, biomasa microbiana y actividad ureasa presentan incrementos consistentes, evidenciando la reactivación de la biota edáfica y la mejora de los procesos de ciclado de nutrientes.

Tabla 8. Evolución de indicadores de actividad biológica del suelo (0-20 cm, n = 10 fincas).

Indicador	Año 0	Año 1	Año 2	Cambio (%)	Estadística
Respiración (mg CO ₂ /kg/día)	28,4 ± 7,6	34,2 ± 8,4	40,4 ± 9,8	+42,3	p = 0,002 **
C microbiano (mg/kg)	186 ± 48	224 ± 56	268 ± 64	+44,1	p = 0,001 **
N microbiano (mg/kg)	24,2 ± 6,8	28,6 ± 7,4	34,8 ± 8,2	+43,8	p = 0,003 **
Ratio C microbiano/C orgánico (%)	1,52 ± 0,38	1,68 ± 0,42	1,88 ± 0,46	+23,7	p = 0,026 *
Actividad ureasa (µg NH ₄ /g/h)	42,6 ± 12,4	51,8 ± 14,2	62,4 ± 16,8	+46,5	p = 0,004 **
Actividad fosfatasa (µg PNP/g/h)	128 ± 34	156 ± 38	186 ± 42	+45,3	p = 0,002 **

Nota: *p < 0,05 indica significancia estadística; **p < 0,01 indica alta significancia; ***p < 0,001 indica muy alta significancia.

Efectos sobre biodiversidad funcional

Diversidad y estructura arbórea

El enriquecimiento agroforestal resultó en incrementos significativos en la diversidad y la complejidad estructural del sistema (ver Tabla 9). La riqueza de especies aumentó un 50 %, pasando de 8,4 ± 2,1 a 12,6 ± 2,8 especies por finca (p < 0,001).

Asimismo, la densidad de árboles de sombra incrementó un 44,1 %, alcanzando $26,8 \pm 6,4$ árboles/ha, valor que se encuentra dentro del rango recomendado para sistemas agroforestales optimizados.

El índice de diversidad de Shannon aumentó un 27,4 %, lo que indica sistemas más diversos y potencialmente más resilientes frente a perturbaciones ambientales.

Tabla 9. Evolución de diversidad arbórea y estructura agroforestal.

Indicador	Año 0	Año 2	Cambio (%)	Estadística
Riqueza de especies	$8,4 \pm 2,1$	$12,6 \pm 2,8$	+50,0	$p < 0,001$ ***
Densidad árboles (ha)	$18,6 \pm 5,3$	$26,8 \pm 6,4$	+44,1	$p < 0,001$ ***
Índice Shannon	$1,68 \pm 0,34$	$2,14 \pm 0,42$	+27,4	$p = 0,002$ **
Área basal (m ² /ha)	$8,6 \pm 2,9$	$10,4 \pm 3,2$	+20,9	$p = 0,024$ *
Cobertura sombra (%)	$42,3 \pm 12,7$	$48,6 \pm 10,8$	+14,9	$p = 0,038$ *

Nota: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Los valores representan diferencias estadísticamente significativas entre períodos evaluados.

Fauna edáfica

La densidad total de macroinvertebrados aumentó un 68,2 %, pasando de 286 ± 84 a 481 ± 126 individuos/m² ($p < 0,001$).

Las lombrices de tierra mostraron el mayor incremento relativo (+95,8 %), lo que confirma la mejora de las condiciones edáficas y el aumento de la materia orgánica disponible (ver Tabla 10).

Tabla 10. Evolución de macrofauna del suelo.

Grupo	Año 0	Año 2	Cambio
Lombrices	48	94	+95,8 %
Isópodos	32	58	+81,3 %
Milpiés	18	34	+88,9 %
Termitas	42	76	+81,0 %
Hormigas	86	128	+48,8 %

Polinizadores

La tasa total de visitas a flores aumentó un 73,3 %, alcanzando 14,9 visitas por transecto.

Los insectos de la familia Ceratopogonidae, considerados polinizadores primarios del cacao, mostraron el mayor incremento relativo (+85,7 %) (ver Tabla 11).

Tabla 11. Evolución de polinizadores en flores de cacao.

Grupo	Año 0	Año 2	Cambio
Ceratopogonidae	4,2	7,8	+85,7 %
Cecidomyiidae	2,4	4,2	+75,0 %
Abejas pequeñas	1,2	2,1	+75,0 %

Avifauna

La riqueza de especies de aves aumentó un 50 %, pasando de 12,4 a 18,6 especies por finca.

Asimismo, la proporción de aves insectívoras se incrementó significativamente, contribuyendo al control biológico de plagas (ver Tabla 12).

Tabla 12. Diversidad de avifauna en sistemas agroforestales de cacao.

Indicador	Año 0	Año 2	Cambio
Riqueza especies	12,4	18,6	+50 %
Abundancia total	48,6	69,4	+42,9 %
Insectívoras	38,2 %	44,6 %	+16,8 %

Efectos sobre enfermedades y plagas

La incidencia total de enfermedades disminuyó un 35,7 %, observándose reducciones en las principales patologías fúngicas evaluadas (ver Tabla 13).

Tabla 13. Incidencia de enfermedades fúngicas.

Enfermedad	Año 0	Año 2	Reducción
Pudrición negra	12,7 %	8,4 %	-33,9 %
Antracnosis	6,8 %	4,2 %	-38,2 %

Evaluación socioeconómica

Rentabilidad

Los ingresos totales aumentaron un 27,4 %, mientras que el ingreso neto registró un incremento del 49,3 % (ver Tabla 14).

Tabla 14. Indicadores económicos del sistema agroecológico.

Indicador	Año 0	Año 2	Cambio
Costos totales	842	896	+6,4 %
Ingresos totales	1647	2098	+27,4 %
Ingreso neto	805	1202	+49,3 %
Relación B/C	1,96	2,34	+19,4 %

Percepción de productores

El 80 % de los productores calificó el modelo como muy satisfactorio, mientras que el 100 % manifestó su intención de continuar con la implementación de prácticas agroecológicas (ver Tabla 15).

Tabla 15. Evaluación del modelo por productores (escala Likert).

Dimensión	Puntuación
Mejora del suelo	4,7
Aumento biodiversidad	4,5
Reducción de costos	4,4
Intención de continuar	4,9

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos demostraron que la implementación del modelo agroecológico generó mejoras significativas en múltiples dimensiones del sistema productivo, particularmente en la salud del suelo, la biodiversidad funcional y la estabilidad productiva del cacao. Estos hallazgos son consistentes con estudios que señalan que la diversificación estructural y el manejo orgánico del suelo contribuyen a restaurar procesos ecológicos clave dentro de los agroecosistemas tropicales [17].

En primer lugar, el incremento observado en los indicadores de actividad biológica del suelo sugiere una reactivación significativa de los procesos de ciclado de nutrientes. Investigaciones previas han demostrado que los sistemas agroforestales con manejo agroecológico incrementan la actividad microbiana del suelo. De manera similar, estudios en sistemas cacaoteros han reportado aumentos en biomasa microbiana durante la transición agroecológica [18].

Asimismo, los resultados relacionados con el aumento de la diversidad arbórea coinciden con investigaciones que destacan la importancia de la diversidad vegetal para mejorar la resiliencia ecológica [19].

El incremento registrado en la abundancia de polinizadores respalda la hipótesis de que la reducción del uso de agroquímicos favorece la recuperación de redes ecológicas funcionales [20].

Por otra parte, la reducción en la incidencia de enfermedades sugiere que los sistemas agroecológicos pueden fortalecer mecanismos naturales de regulación fitosanitaria [21].

En el ámbito socioeconómico, el incremento en los ingresos netos confirma que la transición agroecológica genera beneficios económicos sostenibles.

Finalmente, la percepción positiva de los productores resalta la importancia de los enfoques participativos en la adopción de innovaciones agrícolas.

Limitaciones y perspectivas futuras

A pesar del diseño riguroso y participativo del modelo de conversión agroecológica, el estudio presentó limitaciones relacionadas con el tamaño y representatividad de la muestra, el horizonte temporal de 36 meses y la variabilidad ambiental no controlable, que podrían influir en la interpretación de los resultados. Asimismo, aspectos técnicos como la precisión en mediciones de biomasa microbiana y actividad de polinizadores, junto con la naturaleza subjetiva de las encuestas y grupos focales, constituyen restricciones que deben considerarse al evaluar la aplicabilidad de los resultados a otras fincas o regiones cacaoteras.

De cara al futuro, se recomienda el escalamiento del modelo a un mayor número de fincas, el monitoreo a largo plazo de suelos y productividad, y la integración de tecnologías digitales y sensores remotos para mejorar la evaluación de parámetros biofísicos y fitosanitarios. También se sugiere fortalecer el análisis socioeconómico y de género, desarrollar modelos predictivos de rendimiento y riesgos climáticos, e impulsar estudios interdisciplinarios que permitan consolidar estrategias sostenibles para sistemas cacaoteros. La sistematización de experiencias y protocolos facilitará la replicación del modelo en otros contextos agroforestales, promoviendo su adopción amplia y sostenible.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que la implementación del modelo agroecológico en sistemas cacaoteros genera mejoras significativas en la sostenibilidad productiva, ambiental y socioeconómica de las fincas evaluadas. A partir del análisis integral de los indicadores productivos, edáficos, biológicos y económicos, se pueden establecer las siguientes conclusiones principales.

En primer lugar, la adopción de prácticas agroecológicas orientadas al manejo orgánico del suelo, la diversificación vegetal y la reducción del uso de insumos químicos permitió mejorar significativamente la salud biológica del suelo. Los incrementos observados en respiración microbiana, biomasa microbiana de carbono y nitrógeno, así como en la actividad enzimática del suelo, evidencian una reactivación de los procesos ecológicos responsables del ciclado de nutrientes y la formación de agregados estructurales, elementos fundamentales para la fertilidad del suelo a largo plazo.

En segundo lugar, la diversificación estructural de los sistemas agroforestales de cacao contribuyó al aumento de la biodiversidad funcional dentro del agroecosistema. El incremento en la riqueza de especies arbóreas, la mayor abundancia de polinizadores y la recuperación de macrofauna edáfica indican que las prácticas agroecológicas favorecen la restauración de interacciones ecológicas esenciales para el funcionamiento del sistema productivo.

Asimismo, se observó una reducción significativa en la incidencia de enfermedades fúngicas del cultivo, lo que sugiere que los sistemas agrícolas con mayor diversidad biológica presentan mayor capacidad de regulación natural frente a patógenos. Este efecto puede atribuirse a la mejora de las condiciones del suelo, la presencia de microorganismos antagonistas y la mayor estabilidad ecológica del sistema agroforestal.

Desde el punto de vista socioeconómico, el modelo agroecológico mostró una mejora en la rentabilidad de las fincas cacaoteras, reflejada en el incremento del ingreso neto de los productores y en la reducción relativa de los costos asociados al uso de insumos externos. Estos resultados confirman que la agroecología puede constituir una alternativa viable para fortalecer la sostenibilidad económica de los sistemas agrícolas familiares.

Finalmente, la percepción positiva de los productores y su alta disposición a continuar con las prácticas implementadas evidencian que los procesos de transición agroecológica requieren acompañamiento técnico, participación comunitaria y estrategias de extensión rural adaptadas al contexto local.

En conjunto, los resultados de esta investigación muestran que la agroecología representa una estrategia efectiva para promover sistemas cacaoteros más resilientes, biodiversos y sostenibles, contribuyendo al mismo tiempo a la conservación de los recursos naturales y al fortalecimiento de los medios de vida de los productores rurales.

Contribución y autoría

E.A.I.F., E.E.Z. y A.R.S.: Conceptualización, diseño metodológico, investigación, curación de datos, análisis formal y redacción: preparación del borrador original.

E.E.Z.: Desarrollo del componente tecnológico, software, implementación del sistema de monitoreo computarizado y visualización de resultados.

A.R.S.: Validación de resultados, supervisión académica, revisión crítica del contenido y redacción: revisión y edición del manuscrito.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

E.A.I.F., E.E.Z., and A.R.S.: Conceptualization, methodological design, investigation, data curation, formal analysis, and writing: original draft preparation.

E.E.Z.: Software development, implementation of the computerized monitoring system, and visualization of results.

A.R.S.: Validation of results, academic supervision, critical review of the content, and writing: review and editing of the manuscript.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Financiamiento

La presente investigación fue financiada por el Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONDOCYT) en el marco de la Convocatoria 2023,

administrada por el Ministerio de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (MESCyT) de la República Dominicana. El estudio forma parte del proyecto titulado “Análisis geomorfológico, biofísico y fotogramétrico de sistemas agroforestales asociados al cultivo del cacao (*Theobroma cacao* L.) en República Dominicana”, identificado con el código FONDOCYT-2023-1-2D6-0651. Este financiamiento fue otorgado para apoyar el desarrollo de investigaciones científicas orientadas al fortalecimiento de la sostenibilidad agrícola, la innovación tecnológica y la generación de conocimiento aplicado al sector cacaotero nacional. Asimismo, el proyecto contó con el respaldo institucional de las universidades participantes en el marco de sus actividades académicas y de investigación.

Declaración ética

Se declara que la presente investigación se desarrolló bajo principios de ética en investigación y participación comunitaria, centrada en el monitoreo computarizado y análisis agroforestal de fincas cacaoteras piloto. Todos los datos primarios fueron recolectados directamente en las fincas con el consentimiento informado de los productores, quienes fueron debidamente notificados sobre los objetivos, procedimientos y alcances del estudio.

Por esta razón, el estudio no implicó experimentación invasiva ni manipulación de organismos humanos ni animales. Se garantiza la confidencialidad y el anonimato de la información proporcionada por los productores, cumpliendo con los estándares de protección de datos personales. La investigación se desarrolló respetando los principios de participación voluntaria, transparencia y reconocimiento del conocimiento local, promoviendo la co-construcción de soluciones sostenibles para el manejo agroforestal del cacao.

Uso de inteligencia artificial

La concepción del estudio, el diseño experimental, el análisis e interpretación de los resultados, así como la redacción y revisión crítica del manuscrito, fueron realizados de manera autónoma por los autores, quienes asumen la responsabilidad plena por el contenido final del artículo.

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los resultados de este estudio fueron generados a partir de mediciones de campo, análisis de laboratorio y registros de monitoreo

realizados durante el período de implementación del modelo agroecológico en fincas cacaoteras piloto.

Los conjuntos de datos utilizados y analizados durante la presente investigación se encuentran disponibles a solicitud razonable al autor de correspondencia. Estos datos incluyen registros de indicadores edáficos, biológicos, productivos y socioeconómicos recopilados durante el período de evaluación.

En caso de requerimientos para fines académicos o de investigación, los datos podrán ser compartidos previa solicitud formal dirigida al equipo de investigación responsable, respetando las consideraciones éticas y de confidencialidad relacionadas con la información proporcionada por los productores participantes.

Adicionalmente, los datos derivados del estudio podrán ser depositados en repositorios institucionales o bases de datos científicas abiertas, con el objetivo de contribuir al desarrollo de investigaciones futuras en el ámbito de la agroecología y la sostenibilidad de los sistemas cacaoteros.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés de carácter financiero, académico o personal en relación con la realización, interpretación o publicación del presente trabajo de investigación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Católica del Cibao (UCATECI) por su apoyo institucional y facilidades brindadas para la ejecución de esta investigación. Se reconoce también la colaboración del equipo de Roboflow por permitir el acceso a las herramientas y repositorios utilizados en el desarrollo del modelo de detección del cultivo del cacao.

Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento a la Coordinadora Nacional de Cacaocultores Dominicanos (CONACADO) por su valiosa colaboración, facilitando el acceso a parcelas cacaoteras y aportando conocimientos prácticos que enriquecieron la recolección de datos y la validación de los resultados del estudio. De igual manera, agradecemos a la Estación Experimental de Cacao del IDIAF en Mata Larga, San Francisco de Macorís, por su apoyo técnico y logístico durante las actividades de campo.

REFERENCIAS

- [1] Gliessman, S. R. (2015). *Agroecology: The ecology of sustainable food systems* (3rd ed.). CRC Press.
- [2] Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2017). *Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems*. University of California Press.
- [3] Food and Agriculture Organization (FAO). (2023). *The state of food and agriculture: Leveraging food systems for inclusive rural transformation*. FAO.
- [4] International Cocoa Organization (ICCO). (2022). *Quarterly bulletin of cocoa statistics*. Londres, Reino Unido.
- [5] Confederación Nacional de Cacaocultores Dominicanos (CONACADO). (2022). *Informe anual del sector cacaotero dominicano*. República Dominicana.
- [6] Ministerio de Agricultura. (2021). *Plan estratégico del subsector cacao 2020-2030*. República Dominicana.
- [7] Vaast, P., & Somarriba, P. (2014). Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: The role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agroforestry Systems*, 88(6), 947-956.
- [8] Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (MESCyT). (2023). *Política nacional de ciencia, tecnología e innovación*. República Dominicana.
- [9] Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF). (2022). *Informe técnico del cultivo de cacao en República Dominicana*. República Dominicana.
- [10] Field, A., & Hole, G. (2019). *How to design and report experiments*. Sage Publications.
- [11] Bryman, A. (2016). *Social research methods* (5th ed.). Oxford University Press.
- [12] Hair, J. F., et al. (2019). *Multivariate data analysis* (8th ed.). Pearson.
- [13] Pimentel, D., & Burgess, M. (2014). Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States. *Integrated Pest Management*, 3, 47-71.
- [14] Lal, R. (2018). Soil carbon sequestration and climate change. *Soil Science*, 172(12), 943-956.

- [15] Six, J., et al. (2017). Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation. *Soil Biology & Biochemistry*, 32(14), 2099-2103.
- [16] Jose, P. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits. *Agroforestry Systems*, 76, 1-10.
- [17] Tschardtke, T., et al. (2012). Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biological Conservation*, 151, 53-59.
- [18] Somarriba, P., et al. (2018). Cocoa agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 92, 163-178.
- [19] Altieri, M. A. (2016). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74, 19-31.
- [20] Rice, R. A., & Greenberg, R. (2010). Cacao cultivation and the conservation of biological diversity. *Ambio*, 29(3), 167-173.
- [21] Holt-Giménez, E. (2017). *Campesino a campesino*. Food First Books.

Biografía de los autores

Ender Antonio Iñiguez Freites es Doctor en Biotecnología Agrícola Mención Vegetal, Master en Desarrollo Agrario Sostenible, y Profesor Investigador Asociado a la Vicerrectoría de Investigación y Asuntos Académicos de Posgrado en la Universidad Católica del Cibao (UCATECI), La Vega, República Dominicana. Sus líneas de investigación incluyen agricultura digital, sistemas agroforestales sostenibles, resiliencia climática en cultivos tropicales y biotecnología aplicada a la producción agrícola. Es autor de múltiples publicaciones científicas sobre innovación tecnológica en el sector agropecuario.

Ezequiel Echevarría Zamora es MSc. en Ciencias Agroecológicas y Profesor en la Facultad de Ciencias Biológicas y Naturales de la Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra (PUCMM), Santo Domingo, República Dominicana. Sus investigaciones se centran en agroforestería, análisis ecológico de cultivos y gestión sostenible de fincas productivas. Ha participado como investigador principal en proyectos de conservación de biodiversidad y sostenibilidad agrícola en la región del Caribe.

Agripina Ramírez Sánchez es Doctora en Biodiversidad y Gestión Ambiental, Máster En Biología Molecular y Biotecnología y profesora de la Facultad de

Ciencias Sociales de la Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD), República Dominicana. Su trabajo se enfoca en el desarrollo rural, la participación comunitaria en proyectos agroecológicos y el análisis socioeconómico de sistemas productivos sostenibles. Ha colaborado en proyectos de fortalecimiento de capacidades para agricultores en sistemas agroforestales.

Descargo de responsabilidad

Los libros y capítulos de libros publicados en la Editorial Unión Científica representan únicamente las opiniones de los autores. La Editorial Unión Científica, su equipo editorial y sus revisores no se hacen responsables del contenido, las interpretaciones o las consecuencias derivadas de la aplicación de los métodos o conclusiones incluidos en los trabajos. Todas las publicaciones se rigen por las políticas éticas de la editorial.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DEL VOLUMEN

Horizontes de la Cacaocultura de precisión

La culminación de este volumen permite extraer lecciones importantes sobre el presente y el futuro de la cacaocultura tropical. Los resultados presentados en los capítulos precedentes validan una metodología de intervención, al tiempo que establecen un estándar para la gestión de sistemas agroforestales en contextos de alta vulnerabilidad climática.

Sinergia técnico-ecológica

Se ha demostrado que la digitalización y la agroecología no son caminos divergentes. El monitoreo computarizado actúa como el cerebro del sistema, permitiendo que las prácticas agroecológicas se apliquen con una precisión quirúrgica, optimizando recursos y maximizando la respuesta biológica del ecosistema.

Impacto en la fertilidad y productividad

La evidencia empírica es contundente: el incremento del 15 % en la materia orgánica del suelo constituye el motor principal detrás del aumento del 12 % en la productividad. Esto confirma que la salud del suelo es el activo más valioso para la resiliencia productiva, permitiendo que la planta de cacao mantenga su rendimiento incluso bajo presiones climáticas.

Aceptación y valor social

El éxito de un modelo piloto se mide por su capacidad de ser adoptado. La valoración positiva del 80 % de los productores de CONACADO subraya que, cuando la tecnología se presenta como una solución tangible a problemas económicos y ambientales, la resistencia al cambio disminuye y se fortalece el tejido social comunitario.

2. Perspectivas de aplicación (2026-2027)

De cara al futuro, este libro abre nuevas líneas de trabajo y expansión para el sector:

- i. El marco metodológico aquí expuesto está diseñado para ser transferible. El próximo paso natural es la expansión de este modelo piloto a una escala regional, adaptando los algoritmos de monitoreo a diferentes microclimas y variedades de cacao, asegurando que la cacaocultura de precisión sea accesible para pequeños y medianos productores.
- ii. Las perspectivas apuntan hacia el uso de modelos de Machine Learning más avanzados que puedan predecir brotes de plagas o deficiencias nutricionales antes de que sean visibles, permitiendo una agricultura proactiva en lugar de reactiva.
- iii. Los datos generados por el monitoreo sistemático ofrecen una trazabilidad sin precedentes. Esto abre la puerta a certificaciones de Cacao Climáticamente Inteligente, permitiendo a los productores acceder a mercados internacionales de especialidad que premian la sostenibilidad verificable con mejores precios.

En última instancia, este volumen concluye que la resiliencia no es un estado que se alcanza, sino una capacidad que se cultiva. La tecnología y la agroecología son las herramientas que permitirán que el cacao dominicano sobreviva al cambio climático al mismo tiempo que prospere en él.

3. Futuras líneas de investigación para la colección

El modelo desarrollado en esta obra constituye un punto de partida para una nueva generación de estudios en el ámbito de la agricultura tropical. Con el fin de profundizar en la sostenibilidad del sector, se proponen las siguientes rutas de investigación para futuros volúmenes de la colección:

- Optimización de algoritmos de predicción climática que permita investigar la integración de redes neuronales y Deep Learning para el desarrollo de sistemas de alerta temprana que permitan predecir con mayor exactitud el impacto de eventos climáticos extremos sobre la fenología del cacao.
- Valoración económica de servicios ecosistémicos en el que se pueda cuantificar monetariamente el impacto de la biodiversidad funcional y el secuestro de carbono en fincas bajo conversión agroecológica, facilitando la creación de mecanismos de pago por servicios ambientales para pequeños productores.
- Nanotecnología y nutrición edáfica para explorar el uso de nanofertilizantes de liberación controlada en sistemas agroforestales para potenciar el aumento de materia orgánica y la resiliencia del suelo frente a procesos de erosión y lixiviación.
- Dinámicas de gobernanza y ética de datos donde se analice el impacto social de la digitalización del campo, estudiando cómo la propiedad y el acceso a los datos agrícolas influyen en la soberanía alimentaria y en el fortalecimiento de las organizaciones cooperativas.
- Trazabilidad y mercados de especialidad para desarrollar estudios sobre la implementación de tecnologías blockchain vinculadas al monitoreo de precisión para garantizar la transparencia en la cadena de suministro y mejorar el posicionamiento del cacao de origen en mercados de alto valor.



EDITORIAL
UNIÓN CIENTÍFICA

GLEBE

E-ISSN:3103-1234

ISBN: 978-9942-7391-9-3



9 789942 739193

VOL 2(1) 2026
ENERO - ABRIL 2026