

## 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<sup>1\*</sup>, Ezequiel Echevarría Zamora<sup>2</sup>, Agripina Ramírez Sánchez<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD), Santo Domingo, República Dominicana

✉ [einiguez@ucateci.edu.do](mailto:einiguez@ucateci.edu.do)

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

✉ [echevarria@ce.pucmm.edu.do](mailto:echevarria@ce.pucmm.edu.do)

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

✉ [agripinars@gmail.com](mailto:agripinars@gmail.com)

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

E-mail de correspondencia: [einiguez@ucateci.edu.do](mailto: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.

<b>Provincia</b>	<b>Nº fincas piloto</b>	<b>Edad promedio de plantaciones</b>	<b>Cobertura de sombra (%)</b>	<b>Asociación CONACADO</b>
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

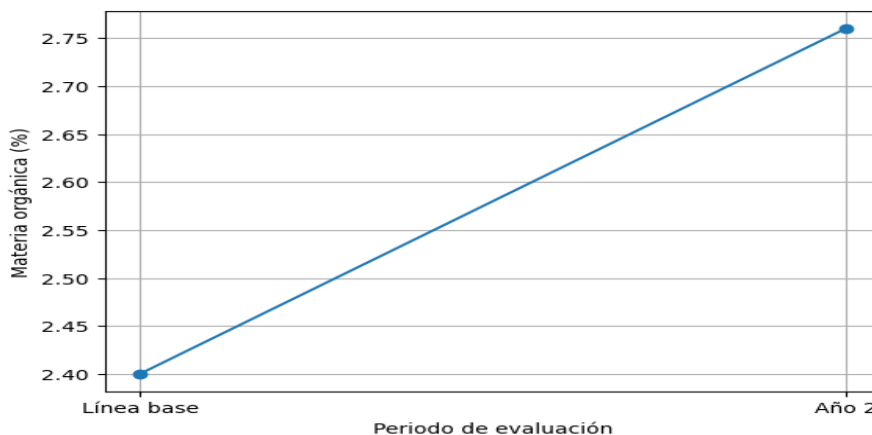
Uno de los impactos más relevantes del modelo agroecológico se observó en los indicadores de fertilidad edáfica. En particular, el contenido de materia orgánica del suelo mostró un incremento significativo durante el período de evaluación.

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**

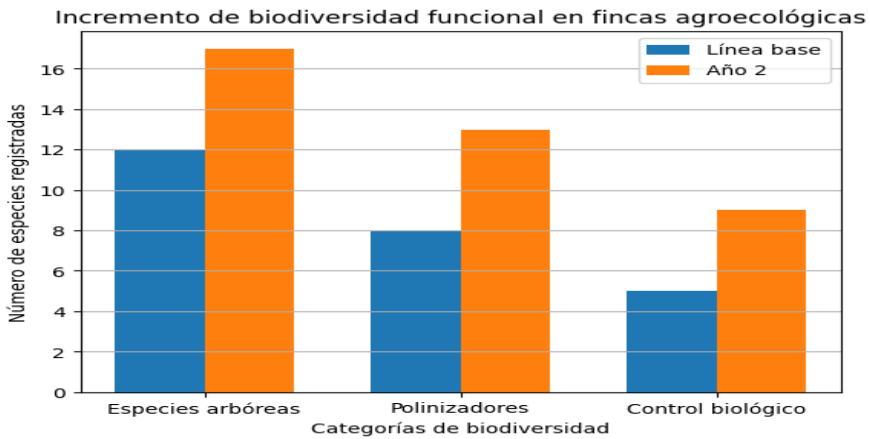
Otro resultado relevante fue el aumento en la biodiversidad funcional dentro de las parcelas agroforestales. Durante el proceso de monitoreo se registró un incremento en la diversidad de especies asociadas al sistema productivo.

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

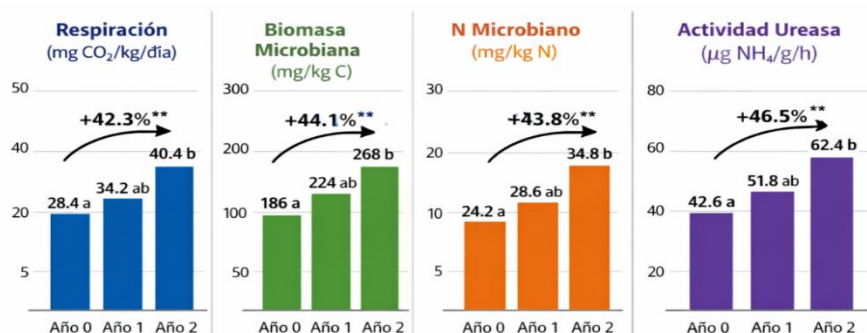
Los indicadores de actividad biológica mostraron incrementos sustanciales y estadísticamente significativos durante el período de evaluación. La respiración edáfica, medida integrada de actividad metabólica microbiana, aumentó 42,3 %, pasando de  $28,4 \pm 7,6$  a  $40,4 \pm 9,8$  mg CO<sub>2</sub>/kg/día ( $p = 0,002$ ). 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  $186 \pm 48$  a  $268 \pm 64$  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 <sub>2</sub> /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 <sub>4</sub> /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 <sup>2</sup> /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  $286 \pm 84$  a  $481 \pm 126$  individuos/m<sup>2</sup> ( $p < 0,001$ ).

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.