



CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
ESCUELA DE POSGRADO

Desempeño agronómico, agroforestal y financiero de cacaotales mejorados en Costa Rica, Perú y República Dominicana

Tesis sometida a consideración de la División de Educación y la Escuela de Posgrados
como requisito para optar al grado de

MAGISTER SCIENTIAE
en Agroforestería y Agricultura Sostenible

María José Borda Borda

Turrialba, Costa Rica
Enero, 2025

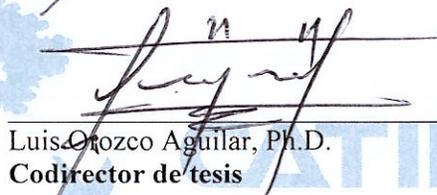
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero de la estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN AGROFORESTERÍA Y
AGRICULTURA SOSTENIBLE**

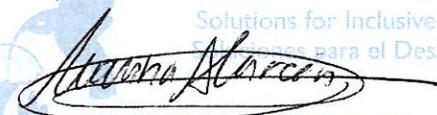
FIRMANTES:



Rolando Cerda Bustillos, Ph.D.
Codirector de tesis



Luis Orozco Aguilar, Ph.D.
Codirector de tesis



Marina Alarcón de Antón, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Mariela Leandro Muñoz, Ph.D.
Decana, Escuela de Posgrado



María José Borda Borda
Candidata

DEDICATORIA

A Dios que ha sido una constante fuente de fortaleza, fidelidad y guía en cada día de mi vida; a mi madre Luisa Fernanda quien es mi pilar y apoyo incondicional; a los amores de mi vida e inspiración a cumplir mis sueños, José María y Yolanda, al resto de mi familia quienes han creído en mi y me han apoyado incondicionalmente; a mis amigos que a lo largo del camino, se han convertido en mi familia elegida; y por último y no menos importante a mis mascotas Cacao y Mokka, quienes me han acompañado y han sido un soporte vital en este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) por abrirme sus puertas hace varios años y convertirse en el lugar donde he crecido profesionalmente, gracias al invaluable apoyo de tantas personas con quienes he compartido este camino.

Al proyecto KoLFACI, cuyo financiamiento ha sido fundamental para mis estudios y para el fortalecimiento de la cacaoicultura y caficultura en América Latina, a través del apoyo a diversos proyectos de investigación.

Al equipo de Farm Tree, quienes me han facilitado y guiado en el proceso de uso de su herramienta, siempre de forma constante y oportuna.

A Rolando Cerda Ph.D y Luis Orozco Ph.D, quienes han sido mentores excepcionales y guías profesionales desde antes de iniciar este proceso y a lo largo del mismo.

A Marina Alarcón de Antón M.Sc, quien, a pesar de la distancia, me ha brindado un gran apoyo y asesoría profesional para el desarrollo de esta investigación.

A Mariela Leandro Ph.D, quien desde el primer día ha creído en mí y ha sido un pilar de apoyo constante para alcanzar este logro.

Al Sr. Rubén Mena y su familia, por abrirme las puertas de su finca en Costa Rica para la toma de datos en campo.

A los técnicos del proyecto KoLFACI, Robert Sequeira y Rocío Fallas de Costa Rica, Enelvi Brito de República Dominicana y Víctor Vargas de Perú, por su valiosa colaboración en la recolección de datos y facilitación de información crucial para este estudio.

Finalmente, a la promoción 2023-2024, quienes han sido un apoyo fundamental en estos dos últimos años; gracias por su ánimo, compañerismo y amistad, que han sido esenciales en esta etapa de mi vida.

CONTENIDO

RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS	3
a. Zona de estudio.....	3
b. Diseño experimental de las parcelas.....	3
c. Revisión de bases de datos	5
d. Variables medidas en campo y calculadas.....	6
e. Estimación del desempeño productivo actual	8
f. Determinación de las relaciones entre rendimiento del cacao y variables de interés.	9
g. Indicadores de desempeño agroforestal usando FarmTree Tool (FTT).....	10
h. Análisis estadístico	10
3. RESULTADOS	11
a. Desempeño productivo actual por clon	11
b. Desempeño productivo actual y proyectado, acumulado y por clon.....	12
c. Variables de arquitectura y su relación con el rendimiento	15
d. Estructura y Composición del SAF-cacao.....	20
e. Desempeño financiero de la producción de cacao y productos agroforestales	20
f. Existencias totales de CO ₂ e	25
4. DISCUSIÓN	26
a. Los clones más promisorios por cada país	26
b. Desempeño actual y proyectado como base para la selección de clones de alto rendimiento.....	27
c. Variables de arquitectura de los árboles de cacao y su relación con el rendimiento.	29
d. Estructura y composición del SAF-cacao.....	31
e. Indicadores estructurales y su relación con el rendimiento y manejo del árbol.....	32
f. Proyección del desempeño financiero de la producción de cacao clonal y productos agroforestales.....	32
g. Potencial de acumulación de CO ₂ e	34
h. Limitación y potencialidad de la herramienta FTT	35
5. CONCLUSIONES	36
6. BIBLIOGRAFÍA	38
7. ANEXOS	43

1. Farm Tree Tool	43
1.1. <i>Metodología de calibración de la herramienta FTT</i>	44
1.2. <i>Supuestos generales</i>	45
2. Protocolos de mediciones	47

Lista de Figuras

<i>Figura 1. Ubicación de las parcelas experimentales de los países de la investigación a) Upala-Alajuela, Costa Rica b) Pucallpa-Ucayali, Perú c) Salcedo-Hermanas Mirabal, República Dominicana</i>	3
<i>Figura 2 Diseño de la parcela mejorada (Costa Rica). Fuente: Ministerio de Agricultura y Ganadería y CATIE</i>	4
<i>Figura 3 Rendimiento acumulado y por clon actual y proyectado para los clones CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6 y PMCT-58 de Costa Rica. a) Rendimiento actual acumulado , b) Rendimiento actual por clon, c) Rendimiento proyectado acumulado por 25 años, d) Rendimiento proyectado por clon por 25 años</i>	13
<i>Figura 4 Rendimiento acumulado y por clon actual y proyectado para los clones ML-102, TSH-565, UF-613, ICS-95 e IMC-67 de República Dominicana. a) Rendimiento actual acumulado , b) Rendimiento actual por clon, c) Rendimiento proyectado acumulado por 25 años, d) Rendimiento proyectado por clon por 25 años</i>	14
<i>Figura 5 Rendimiento acumulado y por clon actual y proyectado para los CMP-15, CMP-99, TSH-565. CMP-6, CMP-74 y CMP-102 de Perú. a) Rendimiento actual acumulado , b) Rendimiento actual por clon, c) Rendimiento proyectado acumulado por 25 años, d) Rendimiento proyectado por clon por 25 años</i>	15
<i>Figura 6 Costos totales, Costa Rica</i>	21
<i>Figura 7 Costos totales, República Dominicana</i>	21
<i>Figura 8 Costos totales, Perú</i>	21
<i>Figura 9 Ingresos totales por componente del SAF-cacao, Costa Rica</i>	22
<i>Figura 10 Ingresos totales por componente del SAF-cacao, República Dominicana</i>	23
<i>Figura 11 Ingresos totales por componente del SAF-cacao, Perú</i>	23
<i>Figura 12 Balance anual, Costa Rica</i>	24
<i>Figura 13 Balance anual, República Dominicana</i>	24
<i>Figura 14 Balance anual, Perú</i>	25
<i>Figura 15 Existencias totales de CO₂e, a) Costa Rica, b) República Dominicana, c) Perú</i>	25
<i>Figura 16 Interfaz de la herramienta FarmTree y ejemplo del indicador de desempeño aroforestal proyectado (rendimiento seco) para el escenario de la parcela mejorada en Costa Rica</i>	43
<i>Figura 17 Materiales necesarios para realizar las mediciones</i>	47
<i>Figura 18 Mediciones estructurales de los árboles de cacao. 2a- Altura total, 2b-Altura productiva, 2c-diámetro de copa</i>	48
<i>Figura 19. Mediciones estructurales de los arboles de cacao 3a-Diámetro de tallo principal, 3b-Número de ramas principales, 3c-Diámetro de las ramas principales</i>	48
<i>Figura 20 Ejemplo 1 , determinación de ramas primarias, secundarias y terciarias</i>	49
<i>Figura 21 Ejemplo 2, determinación de ramas primarias, secundarias y terciarias</i>	50
<i>Figura 22 Materiales necesarios para realizar las mediciones</i>	52
<i>Figura 23 Ejemplo de mediciones en una cepa de banano/plátano</i>	53
<i>Figura 24. Ejemplificación de toma de datos con clinómetro</i>	54
<i>Figura 25. Interfaz de la app Trees</i>	55
<i>Figura 26 Estimación visual del porcentaje de oclusion de la copa</i>	56
<i>Figura 27 Materiales para realizar las mediciones</i>	58

Figura 28 Ejemplo de bloque de cada parcela ✕ Punto aproximado donde se toman los datos de cobertura y submuestra de suelo.....	59
Figura 29. Toma de foto de cobertura de sombra mediante HabitAPP y uso de palo de selfie para superar la altura de los árboles de cacao	59
Figura 30 Proceso de toma de muestra de suelo con barreno	60

Lista de Cuadros

<i>Cuadro 1. Clones establecidos en las parcelas experimentales en la subparcela mejorada .</i>	<i>5</i>
<i>Cuadro 2 Especies de sombra temporal y sombra permanente establecidas en las parcelas experimentales, sistema de siembra y su proyección por hectárea.</i>	<i>5</i>
<i>Cuadro 3 Bases de datos utilizadas del proyecto Cacao- KolFACI "Mejora de la producción de cacao mediante el uso de germoplasma mejorado y prácticas agrícolas climaticante inteligentes" y su contenido, actualizadas a diciembre de2023.</i>	<i>6</i>
<i>Cuadro 4 Variables estructurales medidas en los árboles de cacao</i>	<i>7</i>
<i>Cuadro 5 Variables agroforestales medidas en las especies de sombra</i>	<i>7</i>
<i>Cuadro 6 Variables calculadas con las variables estructurales del cacaotal y variables agroforestales medidas.</i>	<i>8</i>
<i>Cuadro 7 Índices de mazorca de los clones de la investigación.</i>	<i>9</i>
<i>Cuadro 8 . Indicadores de desempeño por categoría generada por la herramienta FarmTree</i>	<i>10</i>
<i>Cuadro 9 Desempeño productivo de los clones de cacao de Costa Rica.....</i>	<i>11</i>
<i>Cuadro 10. Desempeño productivo de los clones de cacao de República Dominicana.....</i>	<i>12</i>
<i>Cuadro 11 Desempeño productivo de los clones de cacao de Perú.....</i>	<i>12</i>
<i>Cuadro 12 Análisis de variables de arquitectura de los clones de cacao de Costa Rica.....</i>	<i>16</i>
<i>Cuadro 13 Índices de rendimiento y vigorosidad, Costa Rica</i>	<i>16</i>
<i>Cuadro 14 Análisis de la relación de las variables de arquitectura con el rendimiento de los clones de cacao de Costa Rica</i>	<i>17</i>
<i>Cuadro 15 Análisis de variables de arquitectura de los clones de cacao de República Dominicana</i>	<i>18</i>
<i>Cuadro 16 Índices de rendimiento y vigorosidad,, República Dominicana.....</i>	<i>18</i>
<i>Cuadro 17 Análisis de la relación de las variables de arquitectura con el rendimiento de los clones de cacao de República Dominicana.....</i>	<i>19</i>
<i>Cuadro 18 Estructura agroforestal de la parcela de Costa Rica</i>	<i>20</i>

ARTÍCULO 1

Desempeño agronómico, agroforestal y financiero de cacaotales mejorados en Costa Rica, Perú y República Dominicana.

María José Borda-Borda¹, Rolando Cerda-Bustillos¹, Luis Orozco-Aguilar¹; Marina Alarcón de Anton².

¹ Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

² Farm Tree B.V, Wageningen, Países Bajos.

RESUMEN

La producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) en sistemas agroforestales (SAF) es importante para los medios de vida de pequeños agricultores (as) en América Latina y el Caribe (ALC), donde predomina la producción bajo sombra. Sin embargo, este sector enfrenta desafíos importantes como bajos rendimientos asociados al uso de materiales genéticos de bajo potencial, el envejecimiento de las plantaciones y el manejo agronómico/agroforestal ineficiente. Por tanto, una modernización responsable de la cacaocultura regional es una necesidad en la región. En esta investigación se evaluó el desempeño agronómico, agroforestal y financiero de clones de cacao mejorados en Costa Rica, Perú y República Dominicana establecidos en SAF modernos y con prácticas de agricultura climáticamente inteligente. Se midieron variables estructurales de los árboles de cacao, como altura, diámetro de copa, área basal del tronco y longitud de ramas, y se analizó su relación con el rendimiento de cacao. Además se hizo un análisis financiero de estos SAF con datos proyectados a 25 años con la herramienta FarmTree Tool (FTT). Los clones más promisorios identificados fueron CATIE-R4 y CATIE-R6 en Costa Rica, TSH-565 en República Dominicana y CMP-15 en Perú, los cuales presentaron rendimientos significativamente superiores y mayor estabilidad en el tiempo en comparación con otros clones. Los análisis financieros revelaron que, a pesar de los altos costos iniciales de establecimiento, los SAF-cacao ofrecen ingresos sostenibles a largo plazo, gracias a la diversificación productiva (cacao, frutales y madera); además, los sistemas demostraron potencial de captura de carbono que idealmente se podrían traducir en más ingresos por pagos de servicios. La relación entre variables de la arquitectura de los árboles con los rendimientos, destacó la importancia de calcular índices como el de eficiencia productiva (IEP), y otros índices como la longitud de ramas productivas y su relación con la producción de frutos. Estos índices contribuyen al conocimiento técnico y sirven para reflexionar sobre el manejo de podas por cada tipo de clon. En conclusión, la implementación de sistemas agroforestales con clones mejorados, acompañada de un manejo adecuado, constituye una estrategia productiva, financiera y ambientalmente atractiva y sostenible.

Palabras clave: clones, rendimiento, sombra, ingresos, índices de producción

ABSTRACT

The production of cacao (*Theobroma cacao* L.) in agroforestry systems (AFS) is crucial for supporting small-scale farmers in Latin America and the Caribbean (LAC), where shaded systems prevail. However, this sector faces significant challenges, such as low yields due to the use of low-potential genetic materials, aging plantations, and inefficient agronomic/agroforestry practices. Therefore, responsible modernization of regional cocoa production is necessary. This research evaluated the agronomic, agroforestry, and financial performance of improved cocoa clones in Costa Rica, Peru, and the Dominican Republic, established in modern AFS with climate-smart practices. Structural variables of cocoa trees, such as height, canopy diameter, trunk basal area, and branch length, were measured, and their relationship with yield was analyzed. Additionally, a financial analysis of these AFS was conducted using projected data over 25 years with the FarmTree Tool (FTT). The most promising clones identified were CATIE-R4 and CATIE-R6 in Costa Rica, TSH-565 in the Dominican Republic, and CMP-15 in Peru, which showed significantly higher yields and greater stability over time compared to other clones. Financial analyses revealed that, despite high initial establishment costs, AFS-cocoa systems offer sustainable long-term income, thanks to production diversification; moreover, the systems demonstrated carbon capture potential, which could translate into additional income from service payments. The relationship between tree architecture variables and yields highlighted the importance of calculating indices such as productive efficiency index (IEP) and branch length's relation to fruit production. These indices contribute to technical knowledge and serve as a basis for pruning management for each clone. In conclusion, implementing agroforestry systems with improved clones, coupled with proper management, constitutes an attractive and sustainable productive, financial, and environmental strategy.

Key words: clones, yield, shade, incomes, index of production

1. INTRODUCCIÓN

La producción de cacao desempeña un papel clave en los medios de vida de numerosos pequeños agricultores en América Latina y el Caribe (ALC). En la actualidad, el 20,3% de la producción mundial de cacao proviene de ALC, alcanzando un total de 1,002,000 t, con Ecuador, Brasil, Perú, República Dominicana y Colombia como los principales productores (ICCO, 2023). En la región el cultivo de cacao ocupa aproximadamente 1,8 millones de ha, siendo la principal fuente de ingresos para unos 430,000 productores. A nivel regional la productividad varía entre 100 y 700 kg/ha/año, en contraste, las fincas comerciales alcanzan un promedio de 1,5 ton/ha/año (ILAC, 2020). Se estima que una característica distintiva de este cultivo en la región es que el 85% se lleva a cabo bajo sombra, empleando sistemas agroforestales (SAF) (Somarriba & Lopez, 2018).

A pesar de su importancia, el sector enfrenta un desafío significativo relacionado con los bajos rendimientos que caracterizan a la mayoría de las plantaciones. Los bajos rendimientos se atribuyen principalmente a razones genéticas, el envejecimiento de los árboles de cacao y la falta de aplicación de prácticas de manejo, como las podas y el manejo de sombra (Phillips et al., 2009, Daymont et al, 2022). Además, la alta incidencia de enfermedades fungosas en fruto, causadas por *Moniliophthora roreri* y *Phytophthora palmivora*, también son un desafío, ya que provocan pérdidas entre el 30% y el 80% de la producción en ALC (Bowers et al., 2001; Phillips-Mora et al., 2006).

Ante este contexto, se vuelve imperativo buscar innovaciones tecnológicas que eleven los rendimientos e impulsen la sostenibilidad de la producción. Estas innovaciones incluyen el uso de variedades superiores, un manejo eficaz del cultivo, principalmente la fertilización y las podas regulares, medidas costo-efectivas para el control de enfermedades y la diversificación de los sistemas de producción (Somarriba et al, 2021; Antolinez et al., 2020).

El cultivo de cacao abarca diversos sistemas y enfoques, principalmente en forma de monocultivo y SAF. El monocultivo implica el manejo de cacao en extensiones significativas de tierra dedicadas exclusivamente a este cultivo, con el objetivo principal de maximizar la productividad mediante prácticas intensivas, como el uso de fertilizantes químicos y pesticidas. Aunque estas prácticas pueden aumentar la eficiencia del cultivo, también pueden tener un impacto negativo en la conservación de la biodiversidad, la salud del suelo y la sostenibilidad a largo plazo (Andres et al., 2016). En contraste, los SAF-cacao representan un enfoque que combina árboles de cacao con otras especies en un mismo sitio, promoviendo un entorno más diverso y equilibrado. Un estudio en Bolivia y Costa de Marfil mostró que los SAF presentaron un aumento en el rendimiento total del sistema (incluyendo todos los productos cosechados) de hasta un 161% en comparación con monocultivos de cacao. Además, en estos sistemas se observó una menor incidencia de plagas y enfermedades en comparación con los monocultivos. (Andres et al., 2016).

En la última década, ha surgido un creciente interés en los SAF-cacao debido a su capacidad para ofrecer diversos servicios ecosistémicos en comparación con los sistemas de monocultivo. Se considera que los SAF-cacao, vistos como una estrategia de producción sostenible a largo plazo, además de ser vitales para la conservación de la biodiversidad (Bennett et al., 2022; Harvey et al., 2006; Perfecto et al., 2007), mejoran la polinización (Beenhouwer et al., 2013), contribuyen a la diversificación de los ingresos de las familias mediante la producción de madera, frutas, productos de ciclo corto, entre otros (Cerdeira et al., 2014; Notaro et al., 2020); mejoran la seguridad alimentaria de las familias (Niether et al., 2020; Somarriba, 2013), aportan al ciclaje de nutrientes en el sistema (Gama-Rodrigues, 2011), mejorando la fertilidad del suelo (Mbow et al., 2014) y el secuestro de carbono (Somarriba et al., 2013).

El uso de material genético superior también desempeña un papel esencial en la producción de cacao. La selección de variedades apropiadas resulta fundamental para lograr un crecimiento óptimo, mayor productividad y una alta calidad del cacao (Argout et al., 2011). El desarrollo y uso de variedades genéticamente mejoradas se percibe como una de las decisiones más efectivas para garantizar la sostenibilidad de la producción de cacao (Mata-Quirós et al., 2021). La investigación genética ha permitido identificar variedades resistentes a enfermedades y con características deseables, como sabor y aroma, tales como las variedades mejoradas producto del Programa de Mejoramiento Genético de cacao del CATIE, las cuales se han identificado como un grupo de seis clones con buena producción, tolerancia a enfermedades como la moniliasis y mazorca negra y características deseables de calidad (Phillips-Mora et al., 2017).

La implementación de variedades o clones mejorados, en combinación con la aplicación de prácticas agronómicas de manejo adecuadas, permitirán aumentar significativamente la producción y combatir las enfermedades de manera eficaz y de manera amigable con el ambiente (Mata-Quirós et al., 2021). Este enfoque integral, que abarca desde la conservación de la diversidad genética hasta la transferencia efectiva de tecnologías mejoradas a los agricultores, es fundamental para fortalecer la resiliencia del cultivo de cacao en la región.

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar el desempeño agronómico y financiero de diferentes clones de cacao en SAF-mejorados, en tres países de ALC. Los resultados ofrecen información clave sobre la productividad resultante de la adopción de prácticas con enfoque de agricultura climáticamente inteligente y la adopción de dichos SAF mejorados. Además, aporta nuevos datos para comprender la relación entre el rendimiento productivo y las variables de arquitectura de los árboles de cacao. Asimismo, el uso de herramientas que modelen desempeño agroforestal como FTT tienen un potencial para proyectar, rendimiento e indicadores financieros útiles apoyar la toma de decisiones productivas y de inversión de productores, proyectos y actores privados interesados en cultivar cacao bajo SAF.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

a. Zona de estudio

La investigación se enmarcó en el proyecto “*Mejora de la producción de cacao mediante el uso de germoplasma mejorado y prácticas agrícolas climáticamente inteligentes*”, financiado por la Secretaría de la Cooperación Coreana para la Alimentación y la Agricultura en América Latina (KoLFACI), ejecutado por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), y con la participación de centros nacionales de investigación de ocho países de ALC. El objetivo principal de este proyecto fue implementar parcelas de investigación en los países meta. Al momento hay 29 parcelas mejoradas con clones, 23 parcelas tradicionales mejoradas y 23 parcelas testigos en similar modalidad agroforestal (Cerda, 2023).

Esas parcelas mejoradas se utilizan como escenario para comparar la gestión tradicional de las fincas de cacao con un paquete tecnológico integral, estas fueron renovadas con clones de cacao mejorados o clones locales con características promisorias; se diversificaron sus especies de sombra bajo un arreglo agroforestal definido, además de aplicar el paquete de manejo que incluye prácticas de agricultura climáticamente inteligente, como el manejo de sombra, poda de los árboles de cacao, fertilización, control de enfermedades, entre otras.

El estudio se realizó en una parcela mejorada de Perú, Costa Rica y República Dominicana, las cuales llevan más años en evaluación y disponen de bases de datos más completas. En la Figura 1 se presentan la ubicación de las parcelas en evaluación por cada país.



Figura 1. Ubicación de las parcelas experimentales de los países de la investigación
a) Upala-Alajuela, Costa Rica b) Pucallpa-Ucayali, Perú c) Salcedo-Hermanas Mirabal, República Dominicana

b. Diseño experimental de las parcelas

Cada finca posee una parcela, cuya extensión varía entre 0.5 y 1 ha, dividida en dos secciones: una destinada a la subparcela convencional y otra a la subparcela mejorada. La parcela mejorada, que es el enfoque de esta investigación, se estableció bajo un diseño agroforestal definido (Figura 2). Los clones de cacao se disponen en filas siguiendo la secuencia recomendada por las instituciones de investigación de cada país, sembrados en un arreglo de tres bolillo, con un distanciamiento de 3 m. El diseño de la parcela sigue un esquema de bloques al azar, compuesto por 5 bloques que contienen el mismo conjunto de clones. Este

diseño se mantiene constante en los tres países, variando únicamente los clones de cacao en evaluación y las especies de sombra utilizadas.

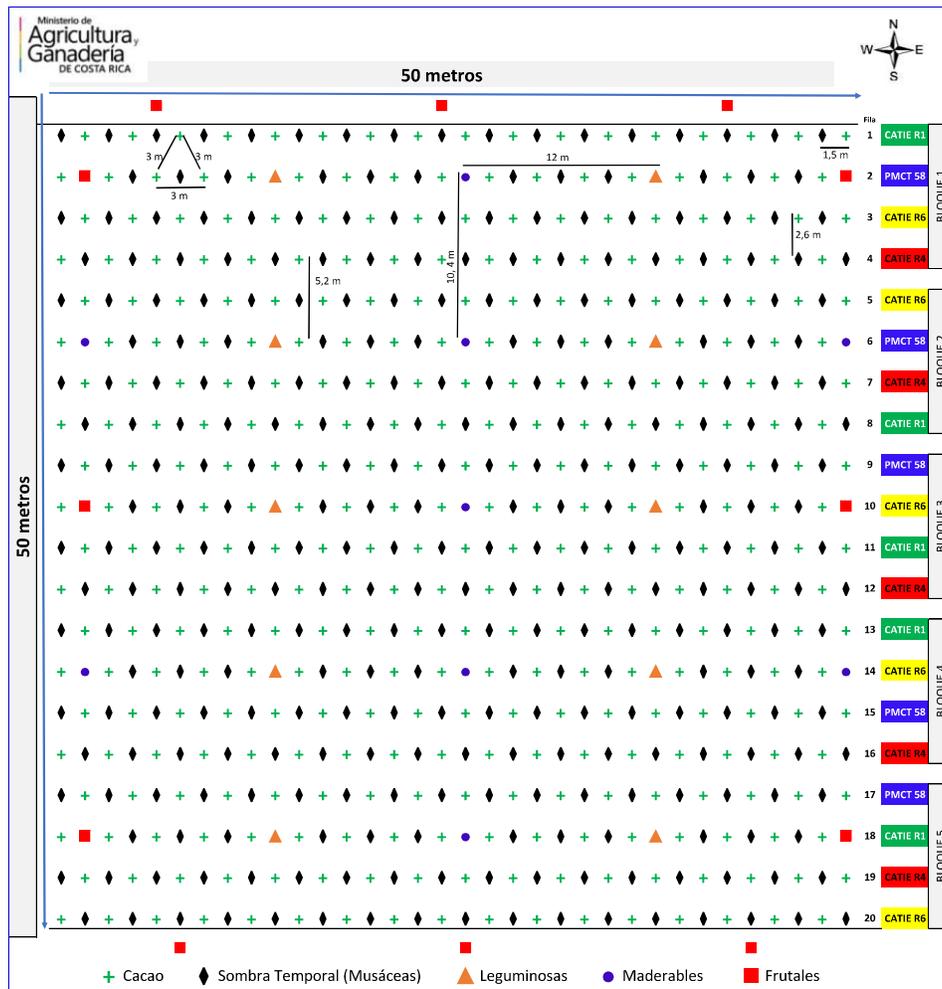


Figura 2 Diseño de la parcela mejorada (Costa Rica).
Fuente: Ministerio de Agricultura y Ganadería y CATIE

En las parcelas designadas para la investigación se introdujeron clones de cacao recomendados por las entidades pertinentes de cada país (Cuadro 1). En el caso de Costa Rica, el CATIE recomienda la siembra del paquete de seis clones con características superiores de producción y tolerancia a la moniliasis (Phillips-Mora et al., 2012). En República Dominicana, la Coordinadora Nacional de Cacaoteros Dominicanos ha clasificado los clones como clones de alto rendimiento y con notables atributos de calidad (CONACADO, 2021), y son recomendados para la siembra por el Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF). En Perú, la Asociación de Productores de Cacao VRAE ha evaluado las selecciones de materiales CMP durante más de dos décadas, centrándose en características de alta productividad y tolerancia a enfermedades. Estos clones han sido cuidadosamente conservados y recomendados para el fomento de cacaotales mejorados bajo sombra (Bioversity International, 2022).

Cuadro 1. Clones establecidos en las parcelas experimentales en la subparcela mejorada

Perú	Costa Rica	República Dominicana
CMP-6	CATIE-R1	ICS-95
CMP-15	CATIE-R4	IMC-67
CMP-74	CATIE-R6	UF-613
CMP-99	PMCT-58	TSH-565
CMP-102	CC-137	ML-102
TSH-565	ICS-95	
(Bioversity International, 2022)	(Phillips-Mora et al., 2012)	(CONACADO, 2021)

Las especies de sombra incorporadas al SAF son adaptadas a cada zona de intervención. Estas especies se destacan por su idoneidad como árboles de sombra permanente y han sido plantadas a una distancia de 10,4 x 12 m . En el Cuadro 2 se detallan las especies establecidas en cada parcela mejorada.

Cuadro 2 Especies de sombra temporal y sombra permanente establecidas en las parcelas experimentales, sistema de siembra y su proyección por hectárea.

Componente	Distancia de siembra	Sistema de siembra	Árboles/ha	Costa Rica	Perú	República Dominicana
Cacao	3 x 3 m	Tresbolillo	1283		Cacao (<i>Theobroma cacao</i> L)	
Musáceas	3 x 3 m	Tresbolillo	1283		Banano (<i>Musa</i> sp)	Plátano (<i>Musa</i> sp)
Maderables	24 x 10,4 m	Rectangular	40	Cedro amargo (<i>Cedrela odorata</i>)	Shihuahuaco (<i>Dipteryx odorata</i>)	Caoba Hondureña (<i>Swietenia macrophylla</i>)
Leguminosas	24 x 10,4 m	Rectangular	40	Guaba (<i>Inga</i> sp)	Guaba (<i>Inga</i> sp)	Leucaena (<i>Leucaena leucocephala</i>)
Frutales	21m en línea	Lineal	24	Aguacate (<i>Persea americana</i>)	--	Zapote (<i>Pouteria sapota</i>)

Fuente: Adaptado de los Informes técnico KoLFACI de Costa Rica, Perú y República Dominicana

c. Revisión de bases de datos

Durante los seis años de ejecución del proyecto KoLFACI (2018-2023), cada país desarrolló una serie de bases de datos que respaldan las prácticas llevadas a cabo y el seguimiento en las parcelas. Estas bases de datos han sido completadas por los extensionistas responsables y los productores involucrados en el proyecto. El Cuadro 3 detalla las bases de datos utilizadas y su contenido.

Cuadro 3 Bases de datos utilizadas del proyecto Cacao- KolFACI "Mejora de la producción de cacao mediante el uso de germoplasma mejorado y prácticas agrícolas climaticante inteligentes" y su contenido, actualizadas a diciembre de 2023.

Base de datos	Descripción	Contenido
Actividades y costos	Actividades realizadas desde el establecimiento de la plantación y sus costos asociados (mano de obra e insumos utilizados), hasta el año presente. - Frecuencia de toma de datos: cada vez que se realiza una actividad de manejo.	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Cacaotal</i> (mejorado) - <i>Etapa</i> (establecimiento, crecimiento, producción) - <i>Actividad</i> (manejo) - <i>Mano de obra</i> (familiar, contratada) - <i>Unidad mano de obra</i> - <i>Insumo</i> - <i>Unidad de insumo</i>
Producción y enfermedades de la parcela mejorada	Registro de la cantidad de mazorcas sanas y afectadas por distintas plagas y enfermedades por clon, en la parcela mejorada - Frecuencia de toma de datos: En cada cosecha de cacao.	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Bloque</i> - <i>Fila</i> - <i>Clon</i> - <i>N° mazorcas</i> (sanas, monilia, mazorca negra, escoba de bruja, ardilla, pájaros, otros)
Beneficios obtenidos	Registro detallado de todos los beneficios obtenidos por componente, especificando si fueron destinados para la venta o para autoconsumo, así como el ingreso total generado. Frecuencia de toma de datos: cada vez que se tenía un beneficio de los diferentes componentes	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Cacaotal</i> (mejorado) - <i>Producto cosechado y cantidad</i> - <i>Vendido / Autoconsumo</i> - <i>Ingreso</i>

Fuente: Elaboración propia con base a las bases de datos del proyecto Cacao-KolFACI

Con el objetivo de garantizar la calidad y consistencia de las bases de datos y su contenido, se llevó a cabo una revisión y depuración en colaboración con investigadores y técnicos locales. Se identificaron datos atípicos mediante la estadística básica, observando valores mínimos, máximos, promedios y se corrigieron los datos atípicos mediante re-cálculos y una revisión detallada de la documentación del proyecto.

d. Variables medidas en campo y calculadas

De forma complementaria, se midieron diversas variables estructurales en todos los árboles de cacao de la parcela mejorada (Cuadro 4), diferenciándolos por las filas correspondientes a cada clon dentro de los bloques establecidos en el diseño de la parcela (Figura 2). Estas mediciones se realizaron antes de la poda de mantenimiento correspondiente al año. Todas las variables estructurales de los árboles de cacao se registraron una sola vez cuando la parcela mejorada bajo estudio tenía 4 años desde su establecimiento.

Cuadro 4 Variables estructurales medidas en los árboles de cacao

Variable	Metodología
Altura total de la planta (m)	Medición desde el nivel del suelo hasta el ápice de la planta, utilizando una cinta métrica industrial o vara telescópica
Altura productiva de la planta (m)	Medición desde el nivel del suelo hasta la altura donde se evidenció presencia de flores y frutos (generalmente hasta donde empieza la mayor parte del follaje de la copa), utilizando una cinta métrica industrial.
Diámetro de copa (m)	Medición del diámetro de la copa en sentido N-S y E-O. Luego los datos se promedian y registran en metros.
Circunferencia del tro principal (cm)	Medición de la circunferencia del tronco principal a 15 cm sobre el suelo con una cinta de costura.
Número de ramas principales	Conteo de número de ramas principales que se identificaron a 50 cm desde el suelo.
Circunferencia de las ramas principales (cm)	Medición de la circunferencia de cada rama principal en su base con una cinta de costura.
Longitud de ramas productivas (m)	Medición de la longitud productiva de cada rama principal, incluyendo los segmentos de ramas primarias, ramas secundarias y hasta terciarias, hasta alcanzar la altura productiva con una cinta de costura.

Fuente: Elaboración propia

Para complementar las variables estructurales del cacaotal, se midieron un conjunto de variables agroforestales en todas las especies de sombra presentes en la parcela correspondiente (Cuadro 5). Todas las mediciones se realizaron una sola vez.

Cuadro 5 Variables agroforestales medidas en las especies de sombra

Variable	Metodología
Inventario forestal	Registro de las especies presentes en la parcela mejorada.
Circunferencia a la Altura del Pecho (cm)	Medición de la circunferencia del tronco a 1,3 metros desde el suelo con una cinta de costura.(Félix, 2018).
Altura del tronco (m)	Medición por medio de la app “Trees”
Altura total (m)	
Diámetro de copa (m)	Medición del diámetro de la copa en sentido N-S y E-O Luego los datos se promedian y registran en metros.
% cobertura (parcela)	Medición por medio de la app “HabitApp”(Farfán V. et al., 2016). Se realizó en al menos tres puntos de los bloques de los clones.
Conteo de musáceas	Se realizó el registro de cada cepa de musáceas que tenga más de un pseudotallo. En cada pseudotallo con más de 5 cm de grosor, se midió la circunferencia (CAP) y el diámetro de copa (m).

Fuente: Elaboración propia

En el Anexo 1 se encuentran los protocolos para las mediciones de arquitectura de los árboles de cacao, mediciones agroforestales y mediciones de cobertura de sombra.

A partir de las mediciones de arquitectura de las plantas de cacao y en combinación con los datos de producción por clon registrados en las bases de datos del proyecto KoLFACI, se realizaron cálculos de varios índices productivos para evaluar la vigorosidad y eficiencia productiva del cacao (Cuadro 6).

Cuadro 6 Variables calculadas con las variables estructurales del cacaotal y variables agroforestales medidas.

Variable	Metodología de cálculo	Fuente
Área basal (cm²)	Cálculo mediante la siguiente fórmula: $g = \frac{\pi}{4} \times dap^2$	Félix, 2018
Índice de eficiencia productiva (IEP) (kg/cm²)	Cálculo mediante la siguiente fórmula: $IEP = \frac{P}{A}$ <i>P: Cosecha por planta en kg</i> <i>A: Área basal del tronco a 15 cm del suelo.</i>	Eskes, 1999
Índice de vigorosidad (IV) (m³)	Cálculo mediante la siguiente fórmula: $IV = \frac{C^2}{4} \sqrt{H^2 * \frac{L^2}{4}}$ <i>C: Circunferencia del tallo (m)</i> <i>H: Altura de la planta (m)</i> <i>L: Diámetro de la copa (m)</i>	Adaptado de Solórzano et al., 2016

e. Estimación del desempeño productivo actual

Se calculó el rendimiento de cacao seco por hectárea para cada uno de los clones seleccionados, desglosándolos por país y para cada año desde el inicio de producción. Además, se determinó el rendimiento acumulado para cada clon. Este cálculo se realizó a partir del contenido de mazorcas sanas registradas en las bases de datos y sus índices de mazorca, según lo indicado en el Cuadro 7. El cálculo se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{Rendimiento} = \frac{\mathbf{NF (fila)}}{\mathbf{IM}}$$

NF (fila): Número de frutos por cada fila de cada clon

IM: Índice de Mazorca de cada clon

Fuente: (Orozco et al., 2019)

Estos cálculos se realizaron por fila de cada bloque, de la parcela correspondiente (0,25 ha). Para extrapolar los datos a una hectárea, se multiplicó el total por fila por el número de filas contenidas en 1 ha según la disposición en campo (aproximadamente 20 filas por clon).

Cuadro 7 Índices de mazorca de los clones de la investigación.

Clon	Origen	Índice de mazorca	Referencias
CMP-6	Perú	17,3	(Justo Dominguez, 2019)
CMP-15	Perú	15	(Bioversity International, 2022)
CMP-74	Perú		*
CMP-99	Perú	15,7	(Bioversity International, 2022) (Justo Dominguez, 2019)
CMP-102	Perú	*	*
TSH-565	Trinidad y Tobago	15,5	(Garcia, 2010)
CATIE-R1	Costa Rica	29	(Phillips-Mora et al., 2012)
CATIE-R4	Costa Rica	18	
CATIE-R6	Costa Rica	24	
PMCT-58	Costa Rica	27	
CC-137	Costa Rica	24	
ICS-95 T1	Trinidad y Tobago	22	
IMC-67	Perú	18	(Garcia, 2010)
UF-613	Costa Rica	24	(Mata-Quirós et al., 2021)
ML-102	República Dominicana	22	(Rodríguez, 2017)

*Se consideró un promedio de índice de mazorca de clones similares.

f. Determinación de las relaciones entre rendimiento del cacao y variables de interés

Después de realizar mediciones y cálculos de las variables estructurales del cacao, se analizaron las relaciones entre el rendimiento y las características de la arquitectura de los árboles de cacao. Estas relaciones se calcularon para cada fila de clon, considerando cada una como una repetición dentro de los bloques del diseño experimental. Estas relaciones se determinaron dividiendo el rendimiento promedio por clon del último año registrado (2023) entre la variable de interés. Las relaciones analizadas incluyeron:

1. Rendimiento por altura total del árbol (*kg cacao seco / m altura total*)
2. Rendimiento por altura productiva del árbol (*kg cacao seco / m altura productiva*)
3. Rendimiento por área basal del tronco (*kg cacao seco / cm² tronco*)
4. Rendimiento por el diámetro de copa (*kg cacao seco / m copa*)
5. Rendimiento por número de ramas principales (*kg de cacao seco / número de ramas*)
6. Rendimiento por diámetro de ramas principales (*kg de cacao seco / cm rama*)
7. Rendimiento por metro de ramas productivas (*kg cacao seco/m lineal de ramas*).

8. Rendimiento por número de segmentos productivos (*kg cacao seco / número de segmentos*)
9. M lineales de ramas productiva para producir 1 kg de cacao (*m lineal de ramas / kg cacao seco*)
10. Número de segmentos productivos para producir 1 kg de cacao (*número de segmentos / kg cacao seco*)

g. Indicadores de desempeño agroforestal usando FarmTree Tool (FTT)

Utilizando la herramienta FTT, se proyectaron diversos indicadores de desempeño agronómico y financiero (Cuadro 8) para el escenario de las parcelas agroforestales mejoradas de cada país. FTT es una herramienta en línea desarrollada específicamente para evaluar el desempeño productivo, financiero y ambiental de sistemas agroforestales, a lo largo del tiempo (FarmTree B.V., 2023) En el anexo 2 se detalla en qué consiste la herramienta, así como su metodología de calibración y supuestos generales.

Cuadro 8. Indicadores de desempeño por categoría generada por la herramienta FarmTree

Categoría	Indicador	Unidad
Rendimiento	Rendimiento (materia seca) por clon	ton cacao seco / ha
	Rendimiento (materia seca) por conjunto de clones	ton cacao seco / ha
Financiero	Balance anual	USD / ha
	Costos de establecimiento y manejo por componente	USD / ha
	Ingresos por componente	USD / ha
Carbono	Existencias totales de CO2e	ton CO2e / ha

h. Análisis estadístico

Para analizar las variables medidas y calculadas, así como el rendimiento anual y las relaciones entre rendimiento y las variables estructurales del cacao, se empleó el siguiente modelo general:

$$Y_{ijk} = \mu + C_i + t_j + Ct_{ij} + b_k + \varepsilon_{ijk}$$

$$b_k \sim N(0, \sigma_b^2), \varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$$

Y_{ijk} = Variable interés

C_i = Clon evaluado

t_j = tiempo

b_k = bloque

El análisis estadístico se realizó mediante un Modelo Lineal General y Mixto, con la prueba LSD de Fisher para la comparación de medias. Se usaron valores F para medir las diferencias, junto con *p*-values para determinar la significancia estadística (< 0,05). Los errores estándar

(E.E.) acompañan las medias para mostrar la variabilidad asociada a los resultados. Todo el procesamiento y análisis de los datos se realizó con el software estadístico InfoStat (Di Rienzo et al., 2011).

Las variables de interés fueron: rendimiento por año, rendimiento por árbol, índice de eficiencia productiva, altura total, altura productiva, diámetro de copa, área basal, número de ramas principales, diámetro de ramas principales, número de segmentos por planta, longitud de ramas productivas, índice de vigorosidad, rendimiento por metro de altura total y productiva, rendimiento por cm² de área basal del tronco, rendimiento por metro de diámetro de copa, rendimiento por número de ramas principales, rendimiento por centímetro de diámetro de rama principal, rendimiento por metro lineal de ramas productivas, rendimiento por número de segmentos productivos, m lineales de ramas productivas por 1kg de cacao seco y número de segmentos productivos por 1 kg de cacao seco.

3. RESULTADOS

a. Desempeño productivo actual por clon

Costa Rica

El clon CATIE-R4 registró los mayores rendimientos por hectárea en todos los años evaluados, con diferencias significativas respecto a los otros clones. El rendimiento de este clon fue notable en años consecutivos, pasando de 336,89 kg/ha en 2022 a 549,11 kg/ha en 2023. El clon CATIE-R6 registró un alto rendimiento, aunque por debajo de CATIE-R4. En cambio, el clon PMCT-58 mostró consistentemente los valores más bajos en todas las evaluaciones, con una media de 266,22 kg/ha en 2023 (Cuadro 9).

Cuadro 9 Desempeño productivo de los clones de cacao de Costa Rica

VARIABLE RENDIMIENTO kg cacao seco / ha	CLON DE CACAO				E.E.	F-value	p-value
	CATIE-R1	CATIE-R4	CATIE-R6	PMCT-58			
	Media						
Año 3 – 2021	146,9 c	336,89 a	295,17 a	241,78 b	21,2	29,16	<0,0001
Año 4 – 2022	168,41 c	600,44 a	439,5 b	290,81 c	47,07	16	0,0002
Año 5 – 2023	188,34 d	549,11 a	459,33 b	266,22 c	23,76	65,49	<0,0001

República Dominicana

El clon TSH-565 presentó el mayor rendimiento tanto por hectárea, con 693,55 kg/ha en el sexto año de producción (2024). Por otro lado, el clon UF-613 tuvo los rendimientos más bajos.(Cuadro 10).

Cuadro 10. Desempeño productivo de los clones de cacao de República Dominicana

VARIABLE RENDIMIENTO kg cacao seco / ha	CLON DE CACAO					E.E.	F- value	p- value
	ML-102	TSH- 565	UF-613	ICS-95	IMC-67			
	Media							
Año 6 – 2024	497,08 b	693,55 a	351,79 b	373,7 b	486,9 b	72,05	4,86	0,0145

Perú

El clon CMP-15 registró los mayores rendimientos durante todos los años de evaluación, especialmente en 2023, donde alcanzó 538,13 kg/ha, seguido por TSH-565 con 501,68 kg/ha. Ambos clones demostraron un desempeño superior y consistente en diferentes años. En contraste, el clon CMP-102 registró los rendimientos más bajos, particularmente en los años 2021 y 2022, con valores de 21 y 17,63 kg/ha, respectivamente. Los clones CMP-6 y CMP-74 mostraron resultados intermedios, manteniéndose por encima del clon CMP-102, pero sin alcanzar los niveles productivos de CMP-15 y TSH-565 (Cuadro 11).

Cuadro 11 Desempeño productivo de los clones de cacao de Perú

VARIABLE RENDIMIENTO kg cacao seco / ha	CLON DE CACAO						E.E.	F- value	p- value
	CMP- 15	CMP- 99	TSH- 565	CMP- 6	CMP- 74	CMP- 102			
	Media								
Año 3 - 2021	189,38 a	171,59 a	159,87 a	87,05 b	67,5 bc	21 c	27,3 1	11,33	0,0001
Año 4 - 2022	132,75 a	74,9 b	171,1 a	40,92 bc	74,63 b	17,63 c	17,5	10,7	0,0002
Año 5 - 2023	538,13 a	260,64 b	501,68 a	168,21 c	180,75 bc	99,38 c	31,8 8	38,47	<0,00 01

b. Desempeño productivo actual y proyectado, acumulado y por clon

En esta sección se presentan los gráficos del rendimiento actual y proyectado de los clones de cacao de los tres países, tanto de manera acumulada como por clon y por año de evaluación. El rendimiento actual es resultante de los datos analizados a partir de las bases de datos y el proyectado se generó con la herramienta *Farm Tree Tool*.

Costa Rica

El rendimiento actual acumulado (Figura 3a), se puede observar un aumento entre los años 3 y 4, manteniéndose estable en el año 5. La producción total alcanzó su máximo alrededor de 1500 kg de cacao seco/ha, mostrando una tendencia general creciente. Al observar el rendimiento actual por clon (Figura 3b), los clones CATIE-R4 y CATIE-R6 mantienen una trayectoria creciente y superior a lo largo de los años, mientras que CATIE-R1 se sitúa con un rendimiento bajo y estable durante el mismo periodo. El rendimiento proyectado

acumulado (Figura 3c), sugiere que CATIE-R4 y CATIE-R6 continúan con un rendimiento elevado y sostenido en los años siguientes, por otro lado, CATIE-R1 seguirá con niveles de rendimiento inferiores y este sistema puede alcanzar su máximo potencial productivo cerca de los 2500 kg cacao seco/ha.

En general, tanto los datos actuales como las proyecciones de FTT identificaron a CATIE-R4 y CATIE-R6 como los clones más productivos en términos de rendimiento por hectárea.

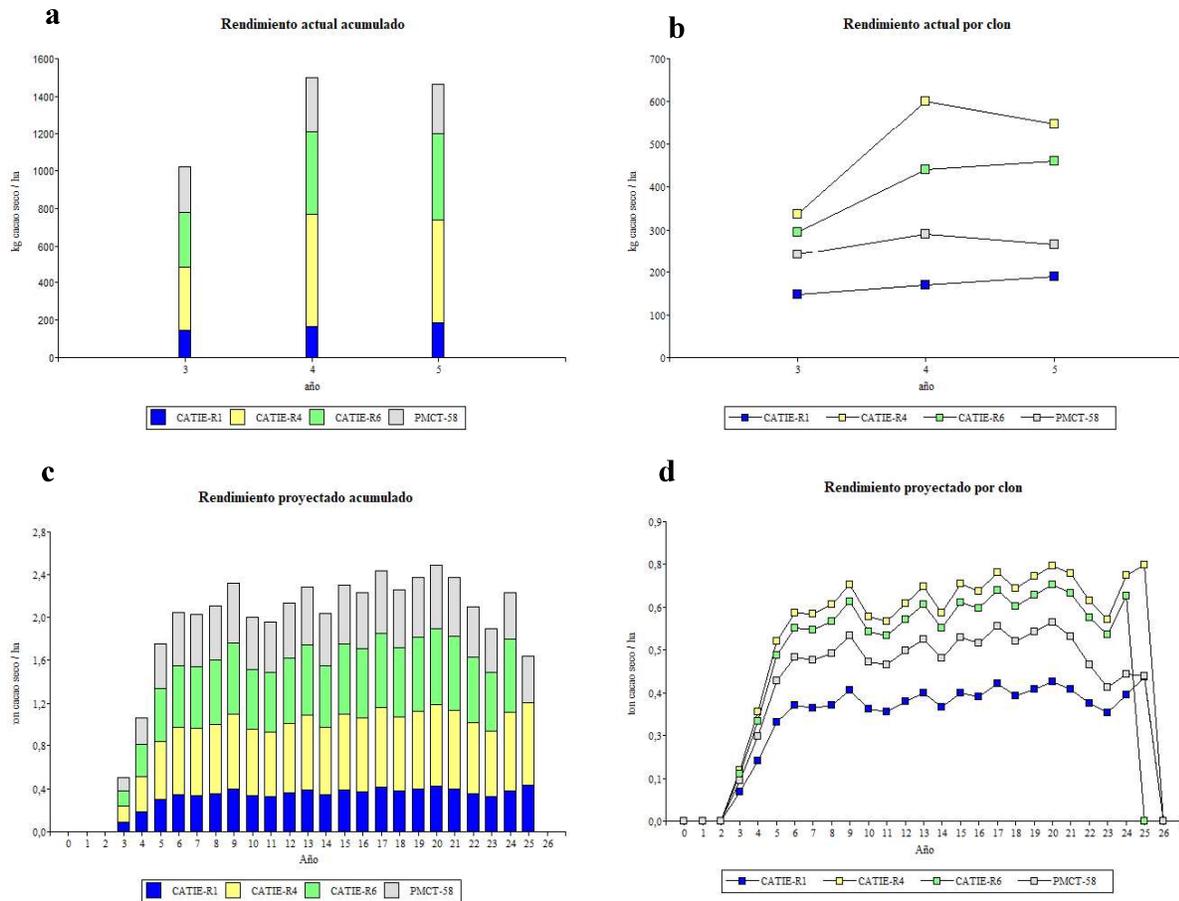


Figura 3 Rendimiento acumulado y por clon actual y proyectado para los clones CATIE-R1, CATIE-R4, CATIE-R6 y PMCT-58 de Costa Rica. a) Rendimiento actual acumulado, b) Rendimiento actual por clon, c) Rendimiento proyectado acumulado por 25 años, d) Rendimiento proyectado por clon por 25 años

República Dominicana

El rendimiento actual acumulado (Figura 4a) muestra que en el año 6 se obtuvieron un aproximado de 2500 kg cacao seco/ha. En el rendimiento actual por clon (Figura 4b), el clon TSH-565 destaca con la mayor productividad superando ampliamente a los demás clones; en contraste, IMC-67 muestra el rendimiento más bajo. En el rendimiento proyectado acumulado (Figura 4c), los datos indican que el clon TSH-565 continuará liderando en los próximos años, seguido de cerca por ML-102, cuyo rendimiento también se proyecta como

estable y elevado. Por otro lado, el clon IMC-67 mantiene los valores más bajos a lo largo de las proyecciones. Finalmente, en el rendimiento proyectado por clon (Figura 4d), el clon TSH-565 presenta una tendencia de alta productividad en los años proyectados, reafirmando su posición como el clon más productivo de manera similar, ML-102 mantiene una curva de rendimiento estable. En general, el clon TSH-565 presenta un mejor desempeño tanto en los datos actuales como en las proyecciones futuras.

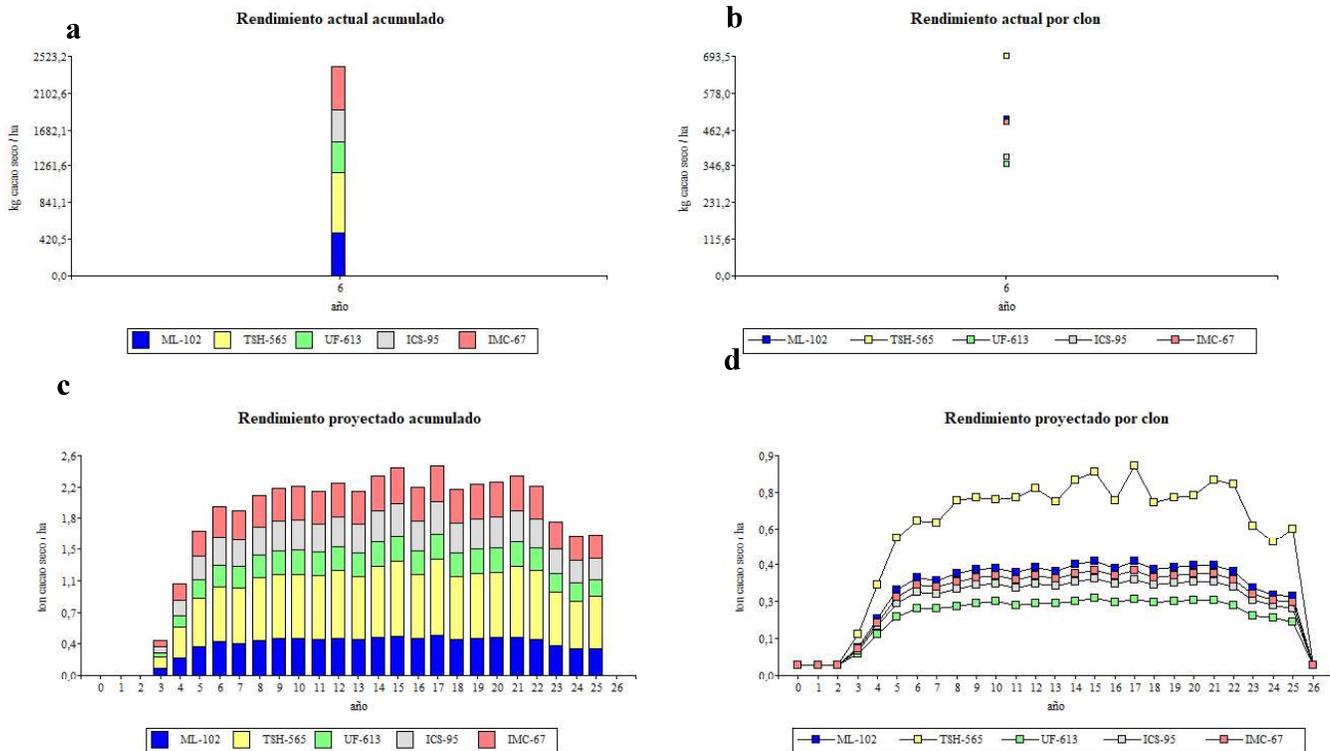


Figura 4 Rendimiento acumulado y por clon actual y proyectado para los clones ML-102, TSH-565, UF-613, ICS-95 e IMC-67 de República Dominicana. a) Rendimiento actual acumulado , b) Rendimiento actual por clon, c) Rendimiento proyectado acumulado por 25 años, d) Rendimiento proyectado por clon por 25 años

Perú

El rendimiento acumulado actual (Figura 5a) se observa que estos clones en el quinto año presentan un rendimiento de 1800 kg caao seco/ha. En el rendimiento actual por clon (Figura 5b), el clon CMP-15 sobresale en el quinto año de evaluación con el mayor rendimiento; en contraste, el clon CMP-102 muestra los rendimientos más bajos de forma consistente a lo largo del periodo. Los clones CMP-99 y TSH-565 registran niveles intermedios de rendimiento, posicionándose como opciones productivas, aunque por debajo de CMP-15. El rendimiento proyectado acumulado (Figura 5c) estima que este sistema tiene un potencial productivo de 2500 kg cacao seco/ha. Finalmente, el rendimiento proyectado por clon (Figura 5d) sugiere que CMP-15 y CMP-99 se mantendrán como los clones más productivos en los próximos años, mientras que CMP-102 seguirá con una tendencia baja y estable. En conjunto,

los clones CMP-15 y CMP-99 presentan mejor desempeño tanto en los rendimientos actuales como en las proyecciones a largo plazo.

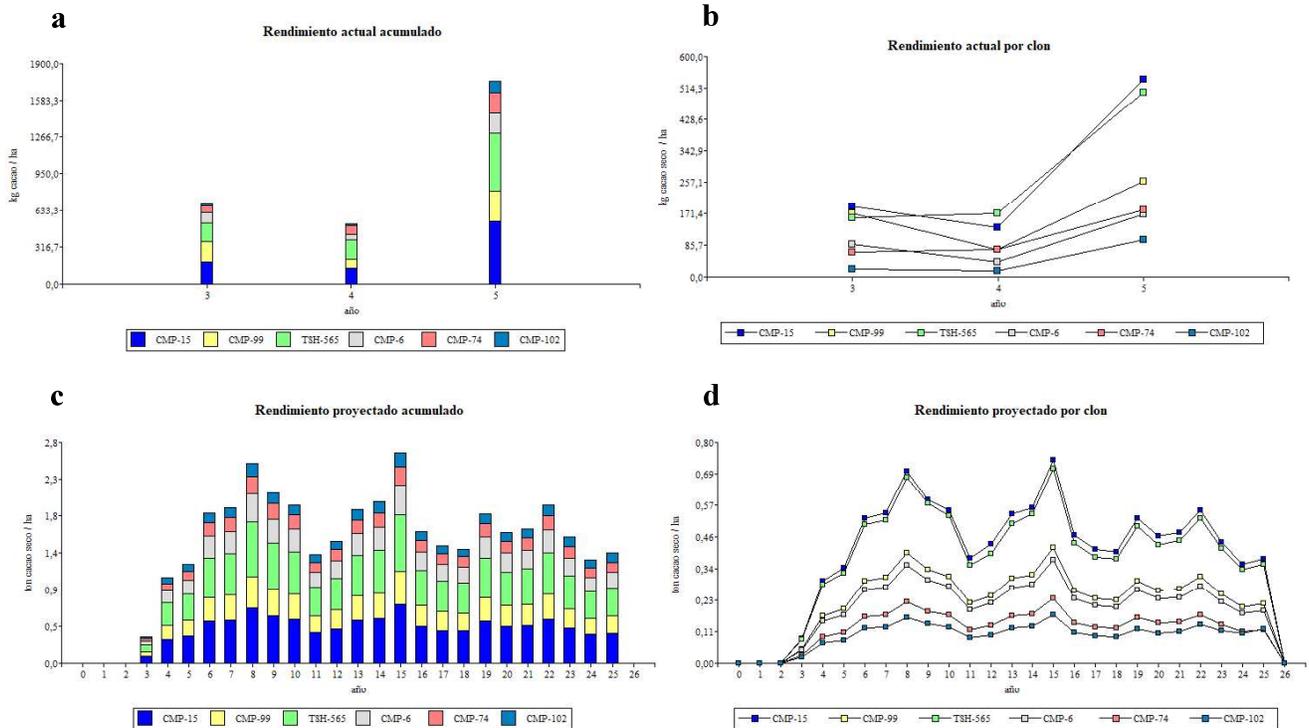


Figura 5 Rendimiento acumulado y por clon actual y proyectado para los CMP-15, CMP-99, TSH-565, CMP-6, CMP-74 y CMP-102 de Perú. a) Rendimiento actual acumulado, b) Rendimiento actual por clon, c) Rendimiento proyectado acumulado por 25 años, d) Rendimiento proyectado por clon por 25 años

c. Variables de arquitectura y su relación con el rendimiento

Esta sección analiza las relaciones entre las características de arquitectura de los árboles de cacao y el rendimiento por árbol en Costa Rica y República Dominicana. No se presentan datos de Perú debido a que las mediciones de los árboles de cacao no se pudieron realizar.

Costa Rica

En el Cuadro 12, se puede observar que el clon CATIE-R6 se destacó en la mayoría de las variables de arquitectura, registrando la mayor altura total (3,86 m) y el mayor diámetro de copa (4,11 m). En contraste, CATIE-R1 mostró la altura total más baja (3,18 m). En cuanto a la altura productiva, CATIE-R6 lideró con 2,25 m, seguido por CATIE-R4 y PMCT-58, que registraron valores similares. En términos de área basal del tronco, los clones CATIE-R6 y CATIE-R4 dominaron con 124,43 cm² y 117,63 cm² respectivamente, superando significativamente a PMCT-58 y CATIE-R1.

El número de ramas principales no mostró diferencias significativas entre los clones CATIE-R1, CATIE-R4 y CATIE-R6, aunque PMCT-58 presentó menos ramas. En cuanto al diámetro de las ramas principales, CATIE-R6 registró el mayor valor (6,21 cm), mientras que PMCT-58 tuvo el más bajo (5,52 cm).

Cuadro 12 Análisis de variables de arquitectura de los clones de cacao de Costa Rica

VARIABLE	Media general	CLON DE CACAO				EE	F- valu e	p-value
		CATIE- R1	CATIE- R4	CATIE- R6	PMCT- 58			
		Media						
Altura total (m)	3,6	3,18 c	3,73 ab	3,86 a	3,63 b	0,06	23,34	<0,0001
Altura productiva (m)	2,07	1,92 c	2,06 b	2,25 a	2,06 b	0,06	12,51	0,0005
Diámetro de copa (m)	3,77	3,46 b	3,76 b	4,11 a	3,75 b	0,11	7,7	0,0009
Área basal (cm ²)	105,29	95,08 b	117,63 a	124,43 a	84,01 b	3,84	24,37	<0,0001
Número de ramas principales	4	4 a	4 a	4 a	3 b	0,14	7,17	0,0002
Diámetro de ramas principales (cm)	5,97	5,52 a	6,05 a	6,21 a	6,07 b	0,16	8,76	0,0004
Número de segmentos por planta	36	33,8	37,2	39,6	34	3,19	3,31	0,0574
Longitud de ramas productivas (m)	25,61	24,01	25,45	28,46	24,52	1,94	2,05	0,1604

El Cuadro 13 muestra que el clon CATIE-R4 destaca con el mayor rendimiento promedio de cacao seco por árbol (1,62 kg) y el IEP más alto (2,52 kg/cm²), mientras que CATIE-R6 ocupa el segundo lugar en ambas variables (1,35 kg y 1,92 kg/cm², respectivamente). Por otro lado, CATIE-R1 presenta los valores más bajos tanto en rendimiento (0,55 kg) como en IEP (0,92 kg/cm²). En cuanto al índice de vigorosidad (IV), CATIE-R6 lidera (0,61 m³), seguido por CATIE-R4 (0,46 m³), siendo CATIE-R1 nuevamente el de menor valor (0,28 m³).

Cuadro 13 Índices de rendimiento y vigorosidad, Costa Rica

VARIABLE RENDIMIENTO	Media general	CLON DE CACAO				E.E.	F-value	p-value
		CATIE- R1	CATIE-R4	CATIE-R6	PMCT-58			
		Media						
kg cacao seco / árbol	1,07	0,55 d	1,62 a	1,35 b	0,78 c	0,07	65,5	<0,0001
IEP* (kg cacao seco / cm ²)	1,81	0,92 a	2,52 c	1,92 b	1,9 b	0,13	49,96	<0,0001
Índice de Vigorosidad "IV" (m ³)	0,42	0,28 c	0,46 c	0,61 a	0,33 c	0,04	15,25	0,0002

En cuanto al rendimiento por unidad estructural (Cuadro 14), CATIE-R4 mostró la mayor eficiencia estructural, liderando en rendimiento por unidad de altura total, altura productiva,

área basal del tronco y diámetro de copa. Si bien CATIE-R6 también mostró buenos resultados, su rendimiento fue inferior al de CATIE-R4 en algunas variables. El clon PMCT-58, por su parte, presentó consistentemente valores más bajos. CATIE-R1 mostró un desempeño intermedio, con valores cercanos a los de PMCT-58 en variables clave como el rendimiento por área basal y altura productiva.

En las variables de eficiencia estructural, CATIE-R4 mostró la menor longitud de ramas productivas y el menor número de segmentos necesarios para producir un kilogramo de cacao. En cambio, CATIE-R1 registró la mayor longitud de ramas productivas y el mayor número de segmentos por kilogramo, seguido de PMCT-58.

Cuadro 14 Análisis de la relación de las variables de arquitectura con el rendimiento de los clones de cacao de Costa Rica

RELACIONES <i>kg de cacao seco</i>	Media general	CLON DE CACAO				E.E.	F- value	p-value
		CATIE- R1	CATIE- R4	CATIE- R6	PMCT- 58			
		Media						
Kg / m de altura total	0,29	0,17 c	0,43 a	0,35 b	0,22 c	0,02	42,38	<0,0001
Kg / m de altura productiva	0,51	0,29 c	0,79 a	0,6 b	0,38 c	0,04	47,03	<0,0001
Kg / cm² de área basal del tronco	0,009	0,006 d	0,014 a	0,011 b	0,009 c	0,00059	57	<0,0001
Kg / m de diámetro de copa	0,28	0,16 c	0,43 a	0,33 b	0,21 c	0,02	57,82	<0,0001
Kg / número ramas principales	0,29	0,14 c	0,43 a	0,36 a	0,23 b	0,02	38,24	<0,0001
Kg / cm de diámetro de rama principal	2,9	1,37 d	4,53 a	3,7 b	2,19 c	0,23	50,43	<0,0001
Kg / m lineal de ramas productivas	0,04	0,02 d	0,06 a	0,05 b	0,03 c	0,0026	72,68	<0,0001
Kg / número de segmentos productivos	0,02	0,02 d	0,04 a	0,03 b	0,02 c	0,0026	45,41	<0,0001
m lineales de ramas productivas / 1 kg	27,98	43,27 a	15,71 c	21,28 c	31,67 b	2,08	40,2	<0,0001
Número de segmentos / 1 kg	39,38	61,12 a	22,84 c	29,84 c	43,77 b	3,30	40,39	<0,0001

República Dominicana

Las diferencias en la arquitectura entre los clones fueron menos marcadas que en Costa Rica. No se observaron diferencias significativas en la altura total ni en la altura productiva entre los clones, todos rondando los 3,2 m y 2,4 m, respectivamente. Sin embargo, el diámetro de copa fue mayor en los clones ML-102 (3,69 m) y UF-613 (3,67 m), mientras que TSH-565, ICS-95 e IMC-67 presentaron diámetros menores (Cuadro 15). En cuanto al número de ramas principales, ML-102 y TSH-565 lideraron con 4 ramas, mientras que ICS-95 e IMC-67 mostraron los valores más bajos. En términos del diámetro de las ramas principales, UF-613 registró el mayor valor (5,94 cm), aunque sin diferencias significativas respecto a otros clones.

En las variables de número de segmentos y longitud de ramas productivas, el clon UF-613 mostró los valores más altos, con 52,72 segmentos y 27,83 m de longitud de ramas productivas, mientras que IMC-67 tuvo los valores más bajos (31,46 segmentos y 16,13 m).

Cuadro 15 Análisis de variables de arquitectura de los clones de cacao de República Dominicana

VARIABLE	Media general	CLON DE CACAO					E.E.	F-value	p-value
		ML-102	TSH-565	UF-613	ICS-95	IMC-67			
		Media							
Altura total (m)	3,16	3,29	3,17	3,17	3,15	3,04	0,1	1	0,4431
Altura productiva (m)	2,33	2,42	2,4	2,44	2,22	2,21	0,12	1,04	0,4249
Diámetro de copa (m)	3,35	3,69 a	3,25 b	3,67 a	3,19 b	2,98 b	0,11	8,85	0,0014
Área basal (cm ²)	102,40	113,12 a	111,02 a	102,56 a	98,55 a	86,78 a	17,84	0,58	0,6833
Número de ramas principales	3	4 ab	4 ab	4 ab	3 bc	3 c	0,33	4,21	0,0234
Diámetro de ramas principales (cm)	5,54	5,05	5,58	5,94	5,36	5,78	0,43	1,47	0,2707
Número de segmentos por planta	38,59	41,13 b	31,76 b	52,72 a	35,91 b	31,46 b	4,42	6,48	0,0051
Longitud de ramas productivas (m)	20,36	21,54 b	17,68 bc	27,83 a	18,64 bc	16,13 c	1,83	8,43	0,0018

El Cuadro 16 muestra que el clon TSH-565 destaca con el mayor rendimiento promedio de cacao seco por árbol (2,04 kg), mientras que los clones ICS-95, UF-613 y ML-102 presentan los valores más bajos (1,1 kg, 1,03 kg y 1,46 kg, respectivamente).

En cuanto al IEP, el clon TSH-565 también muestra el valor más alto (1,39 kg/cm²), seguido del clon IMC-67 (1,27 kg/cm²), aunque las diferencias no son estadísticamente significativas.

Finalmente en el IV, el clon ML-102 lidera con 0,39 m³, seguido de TSH-565 (0,29 m³) y UF-613 (0,32 m³). No obstante, las diferencias tampoco son significativas.

Cuadro 16 Índices de rendimiento y vigorosidad, República Dominicana

VARIABLE RENDIMIENTO	Media general	CLON DE CACAO					E.E.	F-value	p-value
		ML-102	TSH-565	UF-613	ICS-95	IMC-67			
		Media							
kg cacao seco / árbol	1,41	1,46 b	2,04 a	1,03 b	1,1 b	1,43 b	0,21	4,86	0,0145
IEP* (kg cacao seco / cm ²)	1,05	0,95	1,39	0,71	0,95	1,27	0,26	2,58	0,0909
Índice de Vigorosidad "IV" (m ³)	0,28	0,39	0,29	0,32	0,24	0,18	0,05	2,52	0,0967

En las relaciones de arquitectura de la planta con el rendimiento, el clon TSH-565 destacó en la mayoría de las variables, con mayores rendimientos por unidad de altura total, altura productiva, diámetro de copa y número de ramas principales. En contraste, UF-613 presentó los valores más bajos en la mayoría de las variables. El rendimiento por área basal del tronco fue similar entre ML-102 y TSH-565.

En las variables de eficiencia estructural, TSH-565 mostró la menor longitud de ramas productivas y el menor número de segmentos necesarios para producir un kilogramo de cacao. En cambio, UF-613 registró la mayor longitud de ramas productivas y el mayor número de segmentos por kilogramo, seguido de ICS-95 (Cuadro 17).

VARIABLE RENDIMIENTO (kg cacao seco / árbol)	CLON DE CACAO						E.E.	F- value	P- valu e
	Media general	ML-102	TSH-565	UF-613	ICS-95	IMC-67			
Kg / m de altura total	0,44	0,44 b	0,64 a	0,33 b	0,35 b	0,47 b	0,06	5,65	0,0085
Kg / m de altura productiva	0,61	0,60 bc	0,86 a	0,43 c	0,5 bc	0,66 ab	0,09	5,35	0,0103
Kg / m de cm² de área basal del tronco	0,01	0,0	0,02	0,01	0,01	0,02	0,0039	2,58	0,0908
Kg / m de diámetro de copa	0,42	0,39 bc	0,63 a	0,28 c	0,34 bc	0,48 b	0,06	8,24	0,0019
Kg / número ramas principales	0,46	0,54 bc	0,61 a	0,29 c	0,34 c	0,54 ab	0,07	5,4	0,0101
Kg / m de diámetro de rama principal	0,26	0,29 ab	0,37 a	0,18 c	0,21 bc	0,25 bc	0,04	6,93	0,0039
Kg / m lineal de ramas productivas	0,07	0,07 bc	0,12 a	0,04 d	0,06 cd	0,09 ab	0,01	10,58	0,0007
Kg / número de segmentos productivos	0,04	0,04 bc	0,07 a	0,02 c	0,03 bc	0,05 b	0,01	8,21	0,002
m lineales de ramas productivas / 1 kg cacao seco	17,2	16,87 bc	8,78 c	27,73 a	21,56 ab	11,48 c	4,14	5,51	0,0094
Número de segmentos / 1 kg cacao seco	33,01	32,13	15,81	52,37	42,27	22,47	9,03	4,92	0,0140

Cuadro 17 Análisis de la relación de las variables de arquitectura con el rendimiento de los clones de cacao de República Dominicana

d. Estructura y Composición del SAF-cacao

Al quinto año desde el establecimiento del sistema, se registraron las siguientes densidades y áreas basales para los principales componentes del SAF-cacao , junto con la cobertura promedio de la parcela de Costa Rica:

Cuadro 18 Estructura agroforestal de la parcela de Costa Rica

Variable	Árboles / ha
Densidad Cacao (árboles / ha)	1283
Densidad Árboles (árboles / ha)	164
Densidad Musáceas (plantas / ha)	156
Área basal Cacao (m² / ha)	14,28
Área basal Árboles (m² / ha)	13,64
Área basal Musáceas (m² / ha)	17,4
Cobertura (%)	44%

e. Desempeño financiero de la producción de cacao y productos agroforestales

A través de los indicadores financieros generados por la herramienta FTT y sus proyecciones a 25 años, se evaluó el desempeño potencial de los SAF-cacao mejorados en los tres países de estudio. Para las proyecciones, se calibró la herramienta con datos de costos de establecimiento y mantenimiento de cacao en los primeros 5 años.¹

El primer indicador analizado es el de "costos totales", el cual desglosa los gastos por hectárea asociados a los insumos y la mano de obra. El año 0 representa los costos de establecimiento, mientras que los años 1 a 25 reflejan los costos de mantenimiento anuales.

En los tres países, se observó un patrón similar: el año 0, correspondiente al establecimiento del sistema, concentró los costos más altos. A partir del segundo año, los costos se estabilizan, con pequeños incrementos en algunos años, provenientes de los ingresos por intercultivos

En Costa Rica (Figura 6), la inversión inicial para establecer el sistema es de 11,400 USD/ha. Esta alta inversión se distribuye de manera equilibrada entre insumos (como fertilizantes y material vegetal) y mano de obra. Entre los años 1 y 24, los costos se estabilizan alrededor de 1,500-2,000 USD/ha, con incrementos puntuales en los años de renovación del SAF, como en el año 25. El uso de sombra temporal y permanente también influye en los costos iniciales, siendo visible en la proporción de costos en el año 0.

¹ Nota: no se calibraron los costos de las especies asociadas, por lo que las proyecciones de costos para estas especies se corresponden a datos por defecto.

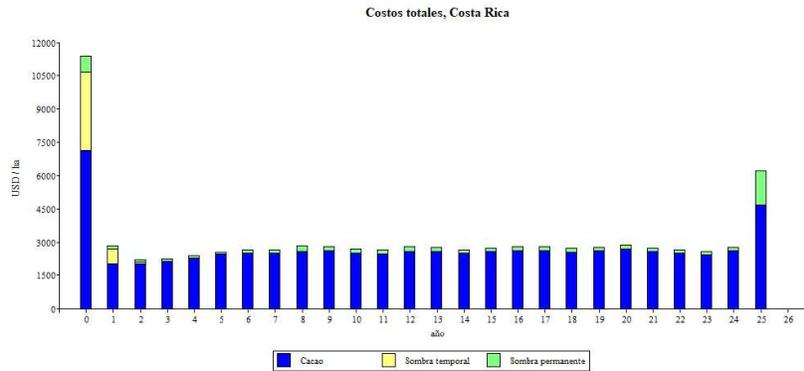


Figura 6 Costos totales, Costa Rica

En República Dominicana (Figura 7), los costos de establecimiento ascienden a 9,225 USD/ha. Los costos de mantenimiento anuales permanecen estables en un rango de 1,000-1,500 USD/ha durante la mayoría de los años del ciclo productivo. Sin embargo, se observan incrementos significativos en los años 24 y 25, cuando se realiza la renovación del sistema.

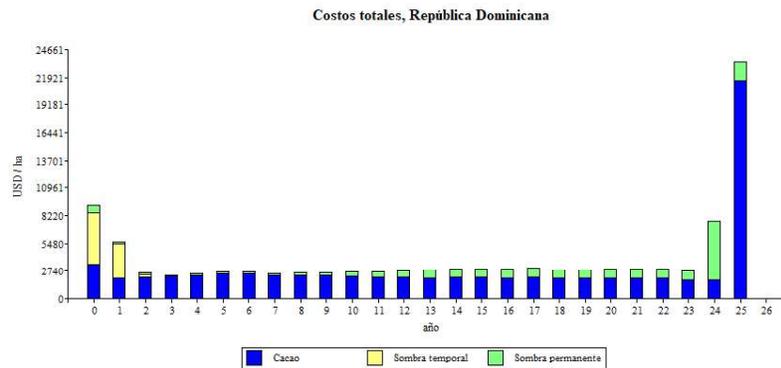


Figura 7 Costos totales, República Dominicana

En Perú (Figura 8), los costos de establecimiento inicial son de 6,102 USD/ha en el año 0. A partir del segundo año, los costos se estabilizan en torno a 1,000-1,200 USD/ha, con pequeños picos en los años donde se realizan labores de mantenimiento. Al final del ciclo, se observa un aumento en los costos en el año 25, asociado con las actividades de renovación del SAF.

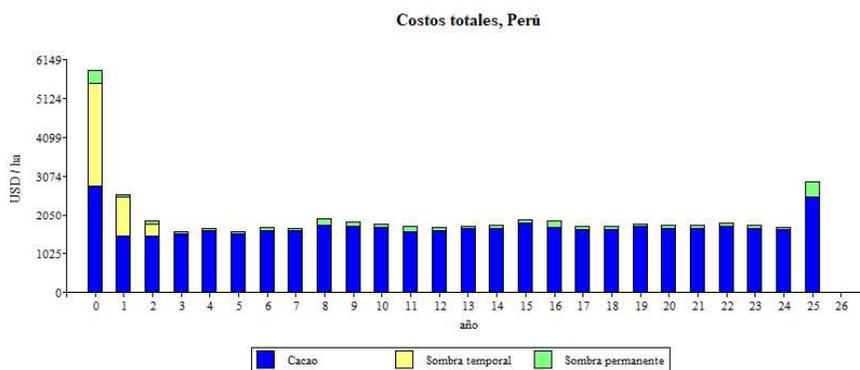


Figura 8 Costos totales, Perú

El segundo indicador financiero analizado es el de “ingresos totales”, el cual desglosa las fuentes de ingreso generadas por los diferentes componentes del SAF-cacao.

En Costa Rica (Figura 9), durante los primeros años del establecimiento, las especies anuales como yuca, maíz y banano generan ingresos que oscilan entre 400 y 2,511 USD/ha. A partir del año 3, el cacao se convierte en la principal fuente de ingresos, con aportes que comienzan a estabilizarse hacia el año 6. En este período, los ingresos anuales del cacao se mantienen entre 4,200 y 5,600 USD/ha. Además, el sistema se diversifica con la introducción del aguacate, que genera ingresos adicionales entre 115 y 150 USD/ha. Finalmente, en el año 25, el aprovechamiento del cedro proporciona un ingreso significativo por madera de 5,715 USD/ha; cada árbol genera aproximadamente 142 USD en ingresos lo que sugiere un rendimiento de madera por árbol de 0.369 m³ y un precio estimado de venta de 385 USD por metro cúbico.

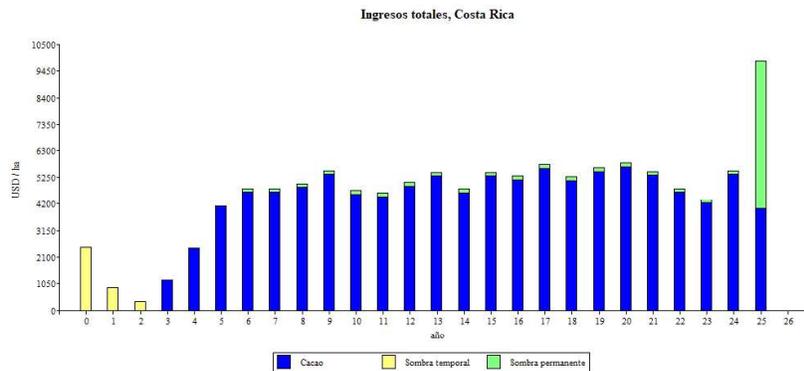


Figura 9 Ingresos totales por componente del SAF-cacao, Costa Rica

En República Dominicana (Figura 10), durante el establecimiento del sistema, las especies anuales como maíz, frijol, yuca y plátano generan ingresos iniciales que varían entre 1,600 y 4,009 USD/ha. A partir del año 3, el cacao se posiciona como la principal fuente de ingresos, alcanzando niveles estables entre 4,317 y 4,522 USD/ha a partir del año 6. En este mismo año, la diversificación del sistema incluye el zapote, que aporta ingresos adicionales de 80 a 670 USD/ha. El mayor ingreso del ciclo se registra en el año 25, con la cosecha de la caoba, que genera 34,515 USD/ha, un aporte significativo al SAF-cacao. Esta cifra se traduce en un ingreso de aproximadamente 863 USD por cada árbol de caoba cosechado. Con un

rendimiento estimado de 0.863 m³ de madera por árbol y un precio de venta promedio de 1,000 USD por m³.

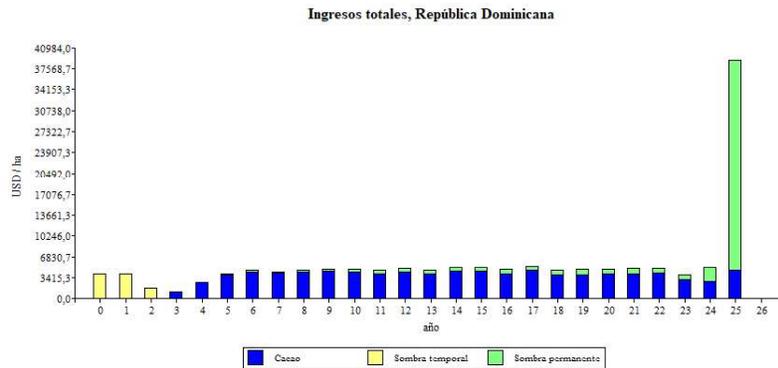


Figura 10 Ingresos totales por componente del SAF-cacao, República Dominicana

En Perú (Figura 11), durante los primeros años del establecimiento, los cultivos anuales como maíz, yuca y banano generan ingresos entre 1,281 y 2,463 USD/ha. A partir del año 3, el cacao se convierte en la fuente principal de ingresos, estabilizándose entre 3,065 y 6,241 USD/ha desde el año 6. En este período, la introducción de aguacate contribuye a la diversificación del SAF, con aportes anuales entre 44 y 111 USD/ha. Finalmente, en el año 25, la cosecha del shihuahuaco genera 1,362 USD/ha. Con una densidad de 40 árboles por hectárea, este ingreso equivale aproximadamente a 34 USD por árbol, con un rendimiento de madera estimado en 1.44 m³ por árbol.

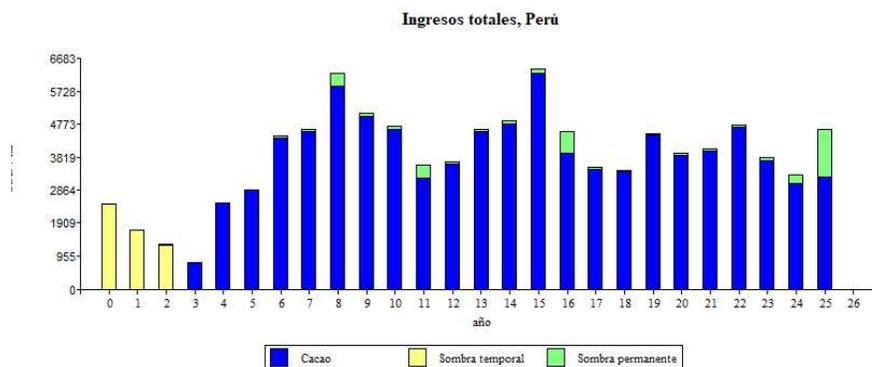


Figura 11 Ingresos totales por componente del SAF-cacao, Perú

El tercer indicador financiero analizado es el "balance anual", el cual permite identificar los períodos de inversión inicial, el punto de equilibrio financiero y el momento en que el SAF-cacao comienza a generar beneficios económicos.

En Costa Rica (Figura 12), el balance anual muestra pérdidas significativas durante los primeros tres años, con el mayor déficit registrado en el año 0 debido a los altos costos de establecimiento, que ascienden a cerca de -9,500 USD/ha. A partir del año 4, el sistema comienza a mejorar su balance y alcanza el punto de equilibrio financiero en el año 5. Desde ese momento, el sistema agroforestal genera beneficios constantes, con un promedio anual

de entre 1,000 y 3,000 USD/ha. En el año 25, se observa un incremento significativo en los beneficios debido a la cosecha de especies maderables.

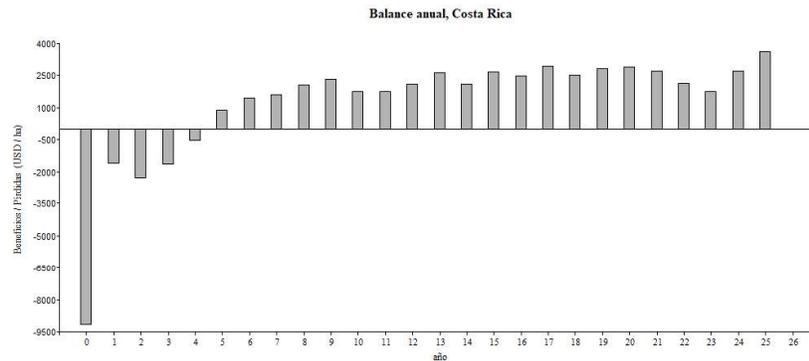


Figura 12 Balance anual, Costa Rica

En República Dominicana (Figura 13), los primeros cinco años registran pérdidas económicas, con un déficit máximo de -6,400 USD/ha en el año 0, reflejando la alta inversión inicial. El sistema logra alcanzar el punto de equilibrio financiero en el año 6, con un balance positivo sostenido en los años siguientes. Durante este período, los beneficios anuales oscilan entre 500 y 2,500 USD/ha. En el año 25, se produce un incremento significativo en los beneficios, superando los 16,000 USD/ha, atribuible a la cosecha de caoba.

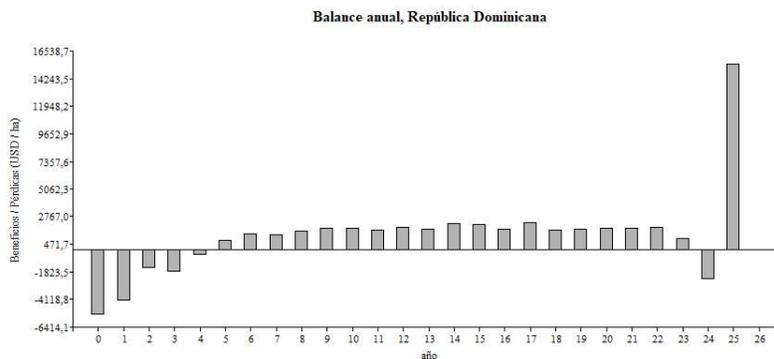


Figura 13 Balance anual, República Dominicana

En Perú (Figura 14), el balance anual muestra pérdidas importantes en los primeros años, con un déficit máximo de aproximadamente -4,396 USD/ha en el año 0 debido a los costos de establecimiento. El sistema comienza a recuperarse a partir del año 4, alcanzando el equilibrio financiero en el año 5. A partir del año 7, los beneficios se vuelven constantes, con picos destacados en los años 9 y 15, donde las ganancias alcanzan los 3,500 USD/ha. Aunque se observan fluctuaciones en los ingresos a lo largo del ciclo productivo, el sistema mantiene un balance positivo hasta el año 25.

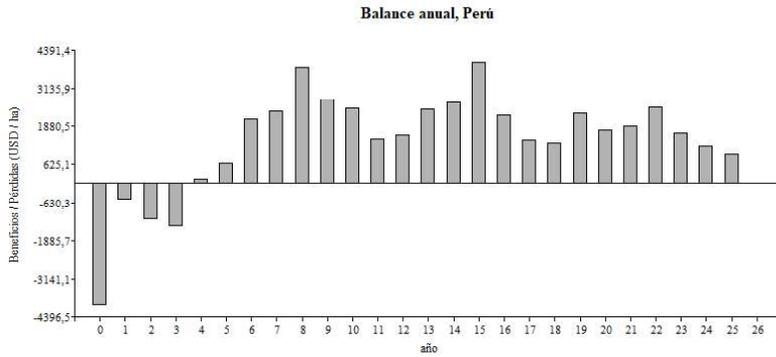


Figura 14 Balance anual, Perú

f. Existencias totales de CO2e

En la Figura 15, en los tres países se observa una tendencia común en la acumulación de CO2e en el tiempo, con diferencias en la magnitud y estabilidad de dicha acumulación. Tanto Costa Rica como República Dominicana muestran una tendencia de acumulación de carbono bastante constante y sostenida, alcanzando sus valores máximos alrededor del año 23 (aproximadamente 270 y 315 toneladas de CO2e por hectárea, respectivamente); y un decaimiento en el año 25. Perú muestra un patrón más inestable, con fluctuaciones en la acumulación de CO2e a lo largo del período analizado. A diferencia de Costa Rica y República Dominicana, Perú no presenta un aumento lineal, sino más bien picos y caídas en diferentes años, alcanzando su máximo de alrededor de 85 toneladas de CO2e por hectárea.

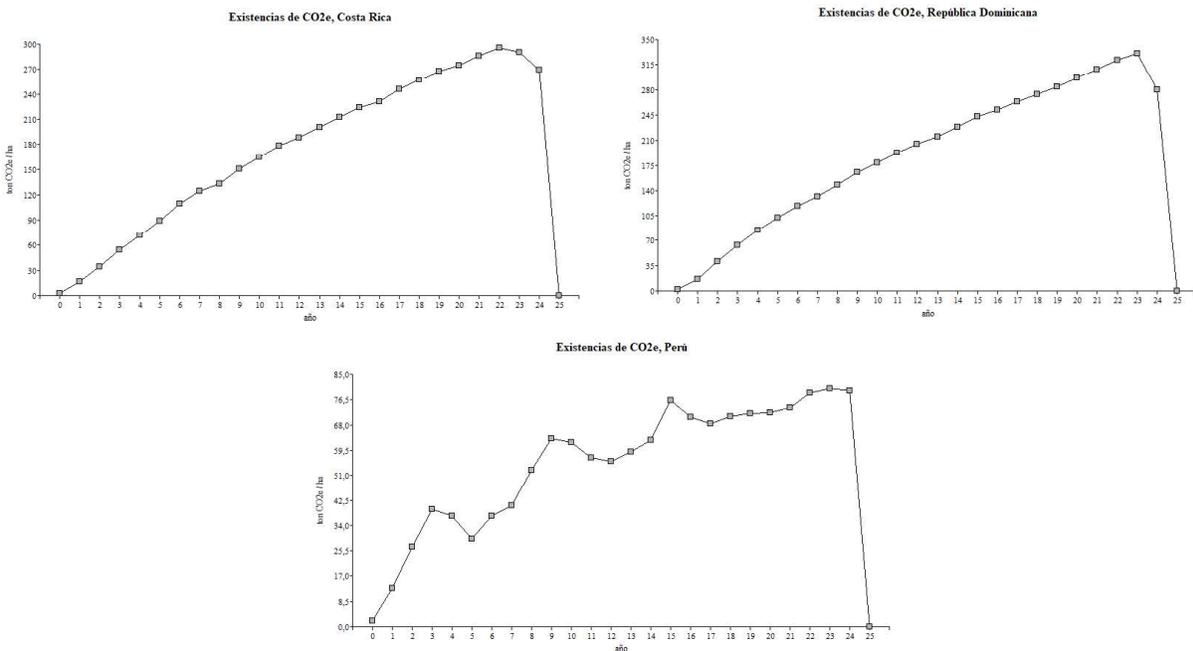


Figura 15 Existencias totales de CO2e, a) Costa Rica, b) República Dominicana, c) Perú

4. DISCUSIÓN

a. Los clones más promisorios por cada país

En Costa Rica, los clones CATIE-R4 y CATIE-R6 mostraron los rendimientos más altos durante los tres años de evaluación. Estos resultados son consistentes con lo reportado en el catálogo de clones seleccionados por el CATIE para siembras comerciales, en el cual, tras una evaluación agronómica de 11 años, dichos clones fueron consistentemente los más productivos. De manera similar, el clon PMCT-58 registró los rendimientos más bajos, lo que también coincide con los datos del ensayo, donde ha presentado producciones inferiores (Phillips-Mora et al., 2012). El estudio de Tarqui Freire (2020), evaluó el desempeño agroforestal de estos clones bajo diversas condiciones agroecológicas en Costa Rica, también confirma estos hallazgos; el estudio subraya que los rendimientos de los clones CATIE-R4 y CATIE-R6 superan el promedio nacional, particularmente cuando se implementan prácticas de manejo intensivo, como podas y fertilización.

En República Dominicana, el clon TSH-565 destacó como el clon de mayor rendimiento y superó significativamente a los demás clones. Estos resultados son consistentes con estudios previos realizados en la estación agrícola Cotové en Colombia, donde el clon TSH-565 ha sido identificado como un clon altamente productivo y adaptable en sistemas agroforestales (Ramírez et al., 2022).

En Perú, los clones CMP-15 y TSH-565 se destacan por su mayor rendimiento durante todos los años del estudio. Estos resultados coinciden con estudios previos que resaltan su alto potencial productivo en diversos entornos agroecológicos y estos datos refuerzan su potencial de rendimiento cuando se utilizan en sistemas con manejo de podas y fertilización (Armengot et al., 2023; Macavilca, 2023; Ramírez et al., 2022). El rendimiento intermedio de los clones CMP-6 y CMP-74 sugiere que, aunque no alcanzan los niveles de los mejores clones, aún superan a CMP-102 de manera consistente, lo que subraya la importancia de seleccionar clones genéticamente superiores para optimizar la productividad. Estudios recientes en clones locales y genotipos internacionales sugieren que clones como CMP-15 no solo tienen un alto rendimiento, sino también una mayor resistencia a enfermedades y mejor adaptación a las condiciones locales, lo que contribuye a su destacada productividad. (Armengot et al., 2023; Justo Dominguez, 2019). Esto refuerza la necesidad de continuar invirtiendo en prácticas agronómicas adecuadas para maximizar los rendimientos de estos clones en el largo plazo.

La comparación entre los rendimientos actuales obtenidos en el estudio y los valores nacionales también es reveladora. En Costa Rica, por ejemplo, el rendimiento promedio nacional en 2020 fue de 273 kg/ha (ILAC, 2020), mientras que en este estudio se alcanzaron hasta 1,463 kg/ha en el quinto año. En República Dominicana, el rendimiento reportado para 2021 fue de 500 kg/ha (GaiaCacao, 2021), estos datos contrastan con los 2,402 kg/ha

obtenidos en el sexto año en el estudio. Por su parte, en Perú, los rendimientos promedio nacionales de 598 kg/ha en 2022 (Solidaridad, 2023), contrastan con los 1,748 kg/ha obtenidos en el quinto año en este estudio. Estas diferencias subrayan el impacto positivo de las prácticas de manejo mejoradas y la selección de clones adecuados en el rendimiento.

Aunque algunos clones presentan rendimientos superiores, no se puede descartar que los demás también responden bien en estos sistemas mejorados, lo que indica que todos los clones están expresando su potencial bajo esas condiciones de manejo con enfoque de agricultura climáticamente inteligente. Las variaciones en rendimiento entre clones en cada país muestran que tanto el entorno ambiental como la genética del clon influyen fuertemente en los resultados. Esto sugiere que los productores podrían beneficiarse al seleccionar los clones que mejor se adapten a las condiciones agroambientales locales.

b. Desempeño actual y proyectado como base para la selección de clones de alto rendimiento

En Costa Rica, las proyecciones a largo plazo indicaron que los clones CATIE-R4 y CATIE-R6 mantendrán su liderazgo en productividad, destacándose como opciones óptimas para las plantaciones comerciales. Estos resultados coinciden con las observaciones de Phillips-Mora et al. (2012), quienes afirman que estos clones no solo fueron seleccionados por su rendimiento inicial, sino también por su capacidad de mantener una producción estable y creciente a lo largo del tiempo. La proyección a 25 años refuerza su viabilidad como alternativas sostenibles, con un rendimiento acumulado elevado y sostenido, superando los 2000 kg/ha como en los estudios de los clones CATIE de Phillips-Mora et al. (2012). En contraste, los clones PMCT-58 y CATIE-R1 muestran un rendimiento bajo tanto en los datos actuales como en las proyecciones, sugiriendo una baja eficiencia productiva que puede limitar su adopción en plantaciones comerciales. La tendencia de CATIE-R1 hacia un rendimiento estable pero reducido indica que su potencial podría ser útil solo en sistemas más diversificados, donde el enfoque no sea maximizar la productividad por hectárea.

En República Dominicana, los resultados y las proyecciones subrayan el destacado rendimiento del clon TSH-565, que se consolida como la opción más productiva a largo plazo. Estos resultados están alineados con la literatura que atribuye su éxito a su vigor y resistencia a enfermedades, lo que le confiere una ventaja competitiva en condiciones de campo (Calderón et al., 2024). El rendimiento proyectado de TSH-565 se mantiene alto durante todo el período analizado, consolidando su posición como un clon mayor rendimiento. Por otro lado, el clon ML-102, aunque con menor productividad en comparación con TSH-565, muestra un rendimiento estable. El IMC-67, sin embargo, presenta niveles consistentemente bajos tanto en los datos actuales como en las proyecciones, lo que indica una baja adaptación y eficiencia que podría justificar su reemplazo por clones mejorados

En el caso de Perú, el clon CMP-15 se destaca como la opción más productiva tanto en los datos actuales como en las proyecciones futuras, mostrando un rendimiento sobresaliente en el quinto año de evaluación. Esta estabilidad en el rendimiento convierte a CMP-15 en una alternativa altamente rentable para las plantaciones a largo plazo. El rendimiento consistente del clon CMP-99 también lo posiciona como una opción atractiva, al ofrecer una productividad elevada aunque por debajo de CMP-15. El clon TSH-565 se mantiene como un competidor sólido en términos de productividad, sugiriendo que podría ser útil en regiones donde se prioricen rendimientos altos con cierta estabilidad genética (Justo Dominguez, 2019; Macavilca, 2023). En cambio, CMP-102 muestra niveles bajos de rendimiento tanto en las evaluaciones actuales como en las proyecciones, lo que confirma su limitada viabilidad para sistemas comerciales. Esta situación refuerza la necesidad de explorar estrategias de reemplazo o integración con clones como CMP-15 y CMP-99 para mejorar la eficiencia en las plantaciones (Macavilca, 2023).

Los resultados sugieren que la selección de clones adecuados para cada contexto agroclimático es esencial para maximizar el rendimiento, sin embargo, en sistemas manejados por pequeños productores, los rendimientos podrían situarse entre 800 y 1500 kg/ha, lo que igualmente representaría un logro significativo para su adopción.

La herramienta FarmTree Tool (FTT) ha sido útil para proyectar rendimientos a largo plazo, aunque es importante señalar que presenta ciertas limitaciones. Las discrepancias entre los rendimientos actuales y las proyecciones en los primeros tres años productivos sugieren subestimación y sobre estimación, especialmente en los clones evaluados en Costa Rica, República Dominicana y Perú. Se recomienda que para un futuro uso de la herramienta, se realice una calibración más exhaustiva de los clones de cacao y especies asociadas, con un mayor número de datos de campo complementados con datos de la literatura, para mayor precisión de las proyecciones del modelo. Sin embargo, esta herramienta sigue siendo valiosa como una guía general para identificar tendencias de rendimiento a largo plazo que tienen en cuenta variaciones en el clima, suelo y manejo agrícola, y por lo tanto planificar la gestión de los clones más productivos. Además, la herramienta y modelo permiten generar proyecciones no solo para rendimiento, sino también para otros indicadores, como por ejemplo el potencial de carbono secuestrado de estos sistemas o su desempeño financiero, entre otros. Esto ofrece un valor añadido a su uso en el estudio de la sostenibilidad de sistemas agroforestales mejorados y su consecuente toma de decisiones. A medida que se recopilen más datos sobre los clones y las condiciones locales, será posible calibrar la herramienta para mejorar la precisión de sus proyecciones. Es importante destacar que las proyecciones no garantizan que todos los productores alcancen los niveles estimados, ya que la productividad real depende de múltiples factores, incluidos el manejo agronómico y las condiciones ambientales específicas de cada región, incluida la incidencia de plagas y enfermedades que no está modelada en la herramienta.

c. Variables de arquitectura de los árboles de cacao y su relación con el rendimiento.

El análisis de las relaciones entre las variables de arquitectura y el rendimiento en Costa Rica revela que la estructura del árbol es un factor determinante en la productividad del cacao. Los clones con características estructurales destacadas, como CATIE-R6 y CATIE-R4, mostraron mayores rendimientos por árbol, lo que refleja una relación directa entre la arquitectura y el rendimiento productivo.

El clon CATIE-R6 se distingue no solo por ser el más alto (3,86 m), sino también por tener el mayor diámetro de copa (4,11 m) y el área basal más amplia (124,43 cm²). Tal como sugieren Phillips-Mora et al. (2012) un mayor diámetro de copa optimiza la interceptación de luz solar, lo cual es clave para maximizar la fotosíntesis. Esto concuerda con estudios como los de Jagoret et al. (2017), que subrayan cómo las copas amplias promueven una mejor eficiencia fotosintética, contribuyendo al desarrollo de los frutos y, por tanto, al rendimiento final. Sin embargo, considerando las distancias de siembra de 3x3 m en plantaciones de cacao, es importante manejar cuidadosamente variables como la altura total y el diámetro de copa. Aunque estas características son indicadores clave para optimizar la interceptación de luz solar y maximizar la eficiencia fotosintética, su manejo debe ser controlado para evitar el entrecruzamiento de ramas entre árboles cercanos y facilitar el manejo.

Además, la mayor área basal de CATIE-R6 respalda una eficiente distribución de recursos hacia las ramas productivas, permitiendo una mayor formación de vainas. Un tronco grueso, como el de CATIE-R6, facilita el transporte de agua y nutrientes esenciales, lo que potencia el rendimiento. Estudios de Tarqui Freire (2020), corroboran que los árboles con áreas basales mayores tienden a ser más productivos, ya que pueden sostener un flujo constante de nutrientes hacia las partes productivas del árbol.

Aunque CATIE-R6 tiene un desempeño sobresaliente, el clon CATIE-R4 también se destaca en varias métricas de eficiencia (Cuadro 14). Ambos clones muestran una mayor producción por unidad de altura, área basal, diámetro de copa, diámetro de ramas principales y metros lineales de ramas productivas. En las métricas de eficiencia estructural, como los metros lineales de ramas productivas y el número de segmentos necesarios para producir 1 kg de cacao seco, no se observan diferencias significativas entre los clones. Sin embargo, ambos destacan por requerir la menor cantidad de estructura para alcanzar esta producción, lo que resalta su eficiencia estructural. El hecho de necesitar menos tejido productivo por kilogramo de cacao refleja una distribución superior de recursos hacia los frutos, lo que se traduce en una alta productividad con menor biomasa. Esto sugiere que estos clones pueden alcanzar su potencial productivo con menos ramas, facilitando así las labores de poda y manejo. No obstante, aunque estos clones presenten un desempeño superior, es necesario sembrarlos en conjunto siguiendo el diseño de siembra recomendado, dado sus características de compatibilidad.

Otro aspecto relevante es la robustez estructural del clon CATIE-R6, con ramas principales de mayor diámetro basal (6,21 cm). Esto no solo contribuye a su capacidad de soportar mayor peso, sino que también optimiza la distribución de nutrientes hacia los frutos en desarrollo. En contraste, los clones con ramas más delgadas, como PMCT-58, enfrentan limitaciones en la cantidad de frutos que pueden sostener y en la eficiencia con la que distribuyen los recursos, lo que explica sus rendimientos inferiores.

El IEP es significativamente mayor en los clones CATIE-R4 y CATIE-R6, lo que indica un excelente aprovechamiento de su estructura. Este indicador, refleja la capacidad de estos genotipos para alcanzar altas producciones con un desarrollo estructural moderado, una característica deseable que permite optimizar el espacio y los recursos disponibles. Clones con un IEP alto, como CATIE-R4 y CATIE-R4, facilitan mayores densidades de siembra gracias a su porte, lo que mejora el manejo agronómico en términos de control de enfermedades, podas y densidad de plantación. Por otro lado, el IV, que representa la biomasa total de los árboles, también es superior en CATIE-R4 y CATIE-R6, lo que sugiere un mayor volumen estructural. Esta robustez les permite sostener una mayor producción de frutos, sin embargo, se debe manejar variables como altura total y diámetro de copa para facilitar el manejo de las plantaciones.

En República Dominicana, las solo variables de arquitectura como el diámetro de copa, el número de ramas principales, el número de segmentos por planta y la longitud de las ramas productivas muestran diferencias estadísticamente significativas. No obstante, las diferencias en los valores medios entre clones no son considerablemente amplias, lo que sugiere que, aunque existen variaciones estructurales, estas no son lo suficientemente marcadas como para generar contrastes pronunciados en la arquitectura de los clones evaluados.

Con respecto a los índices de rendimiento y vigorosidad, tampoco presentan diferencias significativas; sin embargo, se destaca con un mayor IEP y mayor producción por planta el clon TSH-565. Estos resultados evidencian que este clon optimiza su estructura hacia la producción. Este clon demuestra que no necesariamente se requiere de un gran tamaño o biomasa para alcanzar una alta producción, lo que podría reducir la necesidad de prácticas intensivas de poda o aumentar la densidad de siembra de este clon. Este rasgo hace que TSH-565 sea ideal para sistemas de manejo más intensivos en los que se busca maximizar la producción por unidad de superficie (Calderón et al., 2024). Sin embargo, su susceptibilidad moderada a enfermedades como la Mazorca Negra y la Moniliasis debe considerarse ante posibles cambios en las condiciones fitosanitarias del país. Aunque actualmente la Moniliasis no está presente en el país, su llegada representaría una amenaza significativa para este clon, a pesar de sus fortalezas productivas en las condiciones actuales (Brito, 2021).

En contraste, UF-613 muestra índices más bajos tanto en vigorosidad como en eficiencia productiva, lo que sugiere que, aunque tiene una estructura aparentemente robusta y un mayor número de segmentos productivos, no logra traducir estas características en un buen

rendimiento. Esto indica que el porte del clon no siempre se correlaciona con una alta eficiencia en la producción, destacando la importancia de estos índices como indicadores clave para seleccionar clones que maximicen el rendimiento.

d. Estructura y composición del SAF-cacao

La densidad de árboles de cacao en el sistema estudiado refleja un manejo intensivo, diseñado para maximizar la producción del cultivo principal. Este diseño incluye también una alta densidad de árboles y plantas de musáceas, lo que evidencia el asocio característico de las especies de sombra en estos sistemas. Sin embargo, al analizar este sistema bajo el enfoque del modelo competitivo de área basal para plantaciones de cacao adultas propuesto por Somarriba et al., 2018, el cual indica que el área basal de los árboles de sombra tienen influencia alguna en el rendimiento de las plantas de cacao.

El modelo establece que la suma del área basal total de las plantas en el sistema debe cumplir con la siguiente relación:

$$P = [K + D (M+F+ L+O)] \leq 40 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$$

Donde: P = área basal total, K = área basal del cacao, D = área basal de los árboles de sombra incluyendo: M = árboles maderables, F = árboles frutales, L = árboles leguminosos y O = otros árboles de sombra. El modelo sugiere los siguientes umbrales permitidos:

$$K \text{ máximo} = 28\text{-}30 \text{ m}^2\text{ha}^{-1} \quad D \text{ máximo} = 10\text{-}12 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$$

Los resultados obtenidos para la parcela en Costa Rica muestran que el área basal del cacao ($K= 14,8 \text{ m}^2/\text{ha}$) está dentro de los valores permitidos, considerando que se trata de una plantación joven en etapa inicial de producción. Sin embargo, el área basal de los árboles de sombra y las musáceas ($D= 31,04 \text{ m}^2/\text{ha}$) supera el rango recomendado por el modelo. Esto indica la necesidad de implementar un manejo adecuado de las especies de sombra, en este caso particular las plantas de musáceas, que suelen utilizarse para brindar sombra temporal durante los primeros años del establecimiento de la plantación.

Con respecto a la cobertura de sombra de la parcela (44%) esta se encuentra dentro del rango permitido para una plantación en su quinto año desde su establecimiento, (Somarriba Eduardo, 2005) indica que una plantación debe tener entre 50-60% de sombra en los primeros dos años de edad del cacaotal y luego de esto, esta debe ser reducida paulatinamente a mediada que el cacaotal desarrolla su copa hasta llegar a un rango de 20-40% de cobertura, en plantaciones adultas de más de ocho años de edad.

e. Indicadores estructurales y su relación con el rendimiento y manejo del árbol

El IEP y el IV son indicadores que permiten evaluar el desempeño productivo y estructural de los árboles. El IEP, al relacionar la producción con el área basal, es un indicador práctico para medir la eficiencia del árbol en el aprovechamiento de su estructura. Por otro lado, el IV refleja la biomasa total del árbol, lo que proporciona información sobre su robustez. Sin embargo, un IV elevado no siempre se traduce en mayor eficiencia productiva, ya que una estructura voluminosa puede aumentar los requerimientos de mantenimiento y dificultar las labores agronómicas. En este sentido, el IEP resulta más adecuado para considerar en sistemas con un diseño de siembra de alta densidad.

Las características estructurales de un árbol, como la altura, el diámetro de copa y la longitud de las ramas productivas, tienen un impacto directo en el rendimiento. La altura y diámetro de copa de las plantas deben ser manejados cuidadosamente para evitar el sombreado entre árboles y garantizar que la luz solar se distribuya de manera uniforme en toda la estructura del árbol. La longitud de las ramas productivas también son clave para la eficiencia del árbol; este indicador tiene un potencial para poder responder el nivel de manejo de podas entre diferentes genotipos. Estas relaciones estructurales son fundamentales para diseñar prácticas agronómicas más eficientes y sostenibles que potencien el rendimiento.

El manejo de podas debe basarse en índices y relaciones estructurales que permitan optimizar el equilibrio entre producción y desarrollo del árbol. Indicadores como el IEP ayudan a identificar árboles eficientes, con estructuras que requieren menos mantenimiento y menos recursos para alcanzar altos rendimientos. Esto permite enfocar las podas en eliminar ramas no productivas o mal ubicadas, promoviendo una estructura más eficiente.

f. Proyección del desempeño financiero de la producción de cacao clonal y productos agroforestales.

El análisis financiero basado en la herramienta FTT ofrece una perspectiva integral sobre los costos e ingresos proyectados, así como su balance anual a lo largo de 25 años en los sistemas agroforestales de Costa Rica, República Dominicana y Perú. Aunque puede haber ligeras sub o sobreestimaciones con respecto a los datos actuales que se tienen de campo de los primeros 5 años productivos, especialmente en costos de establecimiento y manejo; el valor de estas proyecciones radica en observar las tendencias, lo cual permite una planificación agronómica y de inversión estratégicas.

Para analizar estas tendencias, se han identificado cuatro fases en el ciclo productivo:

1. **Establecimiento (Año 0 al Año 2):** Esta etapa es la más costosa debido a los gastos iniciales de establecimiento. En los tres países, el año 0 representa el mayor costo, especialmente en Costa Rica, con un costo de 11,400 USD/ha, seguido de República Dominicana y Perú, con 9,225 y 6,102 USD/ha respectivamente. Estos costos reflejan la inversión en insumos y mano de obra necesarios para implementar el sistema, incluyendo la siembra de cacao y sombras temporales y permanentes. Durante esta fase, el balance financiero es negativo, y se observan pérdidas significativas, especialmente en el año 0. Esto sugiere que los productores podrían requerir apoyo financiero en esta etapa, como incentivos o financiamiento, para amortiguar el impacto inicial del establecimiento del sistema.

1. **Inicio de Producción (Año 3 al Año 6):** A partir del año 3, los sistemas comienzan a generar ingresos gracias a los cultivos anuales, que ayudan a reducir las pérdidas iniciales. En esta fase, el cacao empieza a establecerse como fuente de ingresos primaria, mientras que los ingresos por intercultivos, aunque temporales, contribuyen a suavizar el balance financiero. Estos intercultivos no cubren completamente los costos, sino que amortiguan, y reducen el impacto negativo de los primeros años. El balance se vuelve positivo en Costa Rica y Perú hacia el año 5, mientras que en República Dominicana el punto de equilibrio se alcanza en el año 6.
2. **Plena Producción (Año 7 al Año 22):** Durante esta fase, el cacao se convierte en la principal fuente de ingresos, alcanzando su estabilidad productiva. En Costa Rica, los ingresos anuales del cacao se mantienen entre 4,200 y 5,600 USD/ha, mientras que en República Dominicana y Perú, los ingresos por cacao se estabilizan en rangos similares. La diversificación con productos como aguacate y zapote en Costa Rica y República Dominicana respectivamente, genera ingresos adicionales, lo que contribuye a la estabilidad financiera del sistema. Esta diversificación es clave para mitigar riesgos y reforzar la sostenibilidad económica a largo plazo. Sin esta diversidad de productos, el balance sería más vulnerable a fluctuaciones en el mercado del cacao. Los costos de mantenimiento durante esta fase permanecen relativamente estables, permitiendo una planificación de recursos más controlada.
3. **Decaimiento de la Producción (Año 23 al Año 25):** En esta última fase, se observa una reducción en la productividad del cacao, acompañada de un aumento en los costos debido a las actividades de renovación del sistema. Sin embargo, los ingresos por especies maderables como el cedro en Costa Rica, la caoba en República Dominicana y el shihuahuaco en Perú compensan parcialmente esta caída en la producción de cacao. Estas cosechas maderables al final del ciclo representan una importante fuente de ingresos, que resalta la viabilidad de los SAF a largo plazo.

En el indicador de balance se observó que, en promedio, en los tres países este alcanza un valor de 2500 USD/ha al año, lo que equivale aproximadamente a 208 USD/ha al mes. Este indicador permite estimar el mínimo de hectáreas necesarias para garantizar a los productores un ingreso promedio que resulte atractivo, el cual puede ser comparado con los salarios base de cada país. En el caso de Costa Rica, el salario base ronda los 600 USD mensuales, lo que implica que se necesitarían aproximadamente tres hectáreas para generar un ingreso similar al salario mínimo. En Perú, donde el salario base es de aproximadamente 450 USD, serían necesarias dos hectáreas. Por otro lado, en República Dominicana, con un salario base de 750 USD, se requerirían alrededor de 3.5 hectáreas para alcanzar un ingreso comparable.

g. Potencial de acumulación de CO₂e

El análisis de la acumulación de CO₂e en los SAF-cacao en Costa Rica, República Dominicana y Perú muestra tendencias interesantes sobre el potencial para almacenar carbono a largo plazo. En general, la acumulación de CO₂e siguió una trayectoria de aumento hasta alrededor del año 23, cuando se alcanza el punto máximo, seguido de una disminución en el año 25, coincidiendo con la cosecha de especies maderables y la renovación del SAF-cacao. Estos resultados concuerdan con investigaciones previas que destacan la capacidad de los SAF-cacao para funcionar como sumideros de carbono a medida que la biomasa arbórea se incrementa (Montagnini & Nair, 2004)

En Costa Rica y República Dominicana, el almacenamiento de CO₂e muestra una tendencia constante y sostenida, lo cual puede atribuirse a las tasas de crecimiento de las especies de sombra y del cacao. Para el año 23, el sistema en República Dominicana alcanza un valor máximo de 315 toneladas de CO₂e/ha, mientras que en Costa Rica se registra un máximo de 270 toneladas de CO₂e/ha. La capacidad de los SAF-cacao para acumular carbono a lo largo del tiempo es consistente con estudios en café debido a su estructura multiestratificada y diversidad de especies (Schroth et al., 2009)

En contraste, el sistema en Perú muestra un patrón de acumulación de CO₂e más inestable, con fluctuaciones marcadas a lo largo del tiempo y un almacenamiento máximo significativamente menor, de alrededor de 85 toneladas de CO₂e/ha. Estas fluctuaciones pueden reflejar la limitación de acumulación por variaciones en el clima, ya sea de temperatura o precipitación.

La disminución observada en el año 25 en los tres países corresponde a la cosecha de las especies maderables al final del ciclo productivo.

En términos financieros, las proyecciones de FTT también revelan tendencias clave, como la necesidad de apoyo económico en las primeras fases de establecimiento del sistema debido a los altos costos iniciales. Esto refuerza la utilidad de FTT para anticipar puntos críticos en el balance general, permitiendo a los productores identificar períodos en los que podrían

requerir apoyo adicional, como financiamiento o incentivos económicos. El potencial de secuestro de carbono, proyectado por la herramienta, sugiere una oportunidad de ingresos adicionales mediante la venta de créditos de carbono en estos sistemas. Estos ingresos pueden contribuir a mitigar los altos costos económicos en años críticos, dependiendo de la dinámica y acceso a los mercados de carbono locales en cada país.

Los resultados de las proyecciones de CO₂e en los SAF-cacao representan una oportunidad para que los productores generen ingresos adicionales. Al actuar como sumideros de carbono, estos sistemas pueden acceder a mercados de carbono, como el programa Asombrate (<https://asombrate.org>), que opera en países como Perú, beneficiando a productores de café y cacao. Al adoptar prácticas que incrementen la captura de carbono y demuestren sostenibilidad a largo plazo, los productores pueden comercializar créditos de carbono, estableciendo así una fuente alternativa de ingresos y contribuyendo a la mitigación del cambio climático.

h. Limitación y potencialidad de la herramienta FTT

La herramienta FarmTree Tool (FTT) fue fundamental para la proyección de rendimientos en SAF-Cacao, permitiendo estimar indicadores productivos, financieros y ambientales a largo plazo. Sin embargo, su aplicación presenta ciertas limitaciones .

Una de las principales limitaciones es la precisión de sus indicadores, ya que los valores pueden estar subestimados o sobrestimados. Estas desviaciones se deben a que la herramienta no considera ciertas variaciones agroclimáticas, como el impacto de eventos climáticos extremos, tales como sequías o tormentas, a nivel diario o semanal, debido a que su escala temporal es mensual y anual. A pesar de esta limitación, la herramienta incorpora los principales efectos climáticos, como las temperaturas y precipitaciones mensuales y anuales, para diferentes cultivos, incluido el cacao y las especies asociadas en este estudio. En el análisis comparativo de los datos de rendimiento de los primeros cinco años de campo frente a los generados por la herramienta, se observó una subestimación de entre el 40 % y el 50 % en los años iniciales de producción, mientras que en años posteriores se evidenciaron sobreestimaciones promedio del 10 %. Es necesario ajustar esta limitación para generar escenarios más precisos.

Otra limitación de la herramienta es la exclusión del efecto de plagas y enfermedades en el modelo, las cuáles afectan en gran medida al rendimiento actual de cacao en los tres países de estudio. Esto afecta la precisión de las proyecciones y puede generar expectativas de rendimiento que no siempre reflejan los valores reales obtenidos en campo. Es importante observar también que el manejo específico de cada parcela influye en gran medida el rendimiento actual a obtener. De igual forma, el alcance de las especificaciones de manejo de la parcela en la herramienta determinará los rendimientos proyectados. La herramienta ofrece al usuario una amplia gama de opciones de manejo que se pueden especificar en la

interfaz para cada escenario (incluyendo opciones para especificar los regímenes y fracciones de raleo y poda de todas las especies, el uso de residuos de los cultivos, etc.). La medida en que los parámetros de manejo de la herramienta reflejen la gestión actual de las parcelas determinará en gran medida la precisión de las proyecciones de rendimiento. Por lo tanto, siempre se recomienda ajustar cuidadosamente los parámetros predeterminados en función de los datos de campo, para obtener proyecciones más precisas y específicas para cada contexto.

Para mejorar esta precisión, la herramienta requiere una calibración específica para cada clon de cacao y especies asociadas, en cada contexto local. En esta investigación, la calibración incluyó ajustes en los costos de producción (costos de establecimiento y mantenimiento, desglosados por insumos y mano de obra) y las características biofísicas de los clones, adaptando el modelo a las condiciones de cada país. La calibración no incluyó un ajuste exhaustivo del rendimiento, manejo y costos de las especies asociadas de las parcelas, las cuales se recomienda para mejorar la precisión y confiabilidad del modelo. Sin embargo, este proceso es complejo y depende de la disponibilidad continua de datos locales actualizados para lograr proyecciones confiables a largo plazo. Las bases de datos del proyecto KoLFACI pueden aportar insumos clave para la calibración de las proyecciones de FTT en los 8 países donde existen las parcelas mejoradas.

A pesar de estas limitaciones, FTT es una herramienta valiosa que permite observar tendencias generales de productividad, desempeño financiero y ambiental para un amplio rango de indicadores, más allá de los incluidos en este estudio (por ejemplo fertilidad del suelo, capacidad de retención de agua, biodiversidad, etc). Su interfaz en línea y capacidad para integrar múltiples tipos de datos (como clima, suelo y características de los clones) facilitan el análisis y la planificación estratégica de distintos SAF.

5. CONCLUSIONES

Los datos de este estudio muestran que la combinación de prácticas agrícolas climáticamente inteligentes con la selección de material genético superior impulsa significativamente la productividad en los tres países evaluados. Para el quinto año desde el establecimiento, se alcanzaron rendimientos de 1460 kg/ha en Costa Rica y 1746 kg/ha en Perú, mientras que en República Dominicana, la producción llegó a 2400 kg/ha en el sexto año.

Los resultados de este estudio confirman que la selección de clones adecuados para cada contexto agroclimático es esencial para maximizar la productividad del cacao. Clones como CATIE-R4 en Costa Rica, TSH-565 en República Dominicana y CMP-15 en Perú se destacan por su alto rendimiento al quinto año y proyecciones prometedoras a lo largo de los años. Igualmente la combinación de clones evaluados en cada país, tiene una respuesta positiva en

el rendimiento, pues así en conjunto pueden al menos duplicar o triplicar el rendimiento promedio nacional por unidad de área. Por otro lado, clones como PMCT-58 y CMP-102 tuvieron desempeños limitados, lo que resalta la importancia de continuar con la investigación y evaluación de nuevas opciones genéticas para integrar en el diseño y fomentos de nuevos SAF-Cacao.

Las proyecciones financieras indican que, aunque los primeros años de inversión pueden representar un reto económico, los sistemas alcanzan el punto de equilibrio financiero a mediano plazo y generan beneficios constantes hasta el cierre del ciclo productivo. Además, la captura de carbono en los SAF-Cacao representa un ingreso potencial adicional que complementa los ingresos para las familias al tiempo que contribuyen con un servicio ambiental. Siempre y cuando, el pago por secuestro de carbono se materialice en cada país evaluado, ahora es solo un escenario ideal.

El análisis evidencia que la estructura del árbol influye en la productividad del cacao, destacando la importancia de seleccionar clones con una arquitectura eficiente y un aprovechamiento óptimo de recursos. Clones como CATIE-R6 y CATIE-R4 en Costa Rica, y TSH-565 en República Dominicana, muestran una mayor eficiencia productiva al combinar altos rendimientos con un desarrollo estructural moderado. Estas características no solo permiten alcanzar mayores densidades de siembra, sino que también facilitan prácticas de manejo agronómico como la poda y el control de enfermedades. Sin embargo, la productividad no siempre está ligada a una mayor biomasa o tamaño del árbol, como lo evidencian clones con estructuras robustas pero menores rendimientos, como UF-613. Esto subraya la relevancia de indicadores como el IEP y el IV en la evaluación y selección de materiales genéticos.

La herramienta FarmTree Tool (FTT) ha sido útil en la proyección del desempeño productivo, financiero y ambiental de los sistemas agroforestales de cacao mejorados evaluados en esta investigación. Su capacidad para integrar datos climáticos, económicos y biofísicos permite visualizar escenarios a largo plazo, identificar clones de alto rendimiento y analizar el potencial económico y de captura de carbono en sistemas diversificados. Aunque presenta limitaciones, como la falta de consideración de plagas, enfermedades y eventos climáticos extremos a corto plazo, y su necesidad de calibración inicial con datos locales, su uso ofrece una base sólida para la toma de decisiones.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Andres, C., Comoé, H., Beerli, A., Schneider, M., Rist, S., & Jacobi, J. (2016). *Cocoa in Monoculture and Dynamic Agroforestry*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_3
- Antolinez, E. Y., Almanza, P. J., Barona, A. F., Polanco, E., & Serrano, P. A. (2020). *Estado Actual de la Cacaocultura : Una Revisión de sus Principales Limitantes . Current State of Cocoa Plantation: A Review of its Main Limitations*. 0–3. <https://doi.org/10.19053/01228420.v17.n2.2020.10729>
- Argout, X., Salse, J., Aury, J. M., Guiltinan, M. J., Droc, G., Gouzy, J., Allegre, M., Chaparro, C., Legavre, T., Maximova, S. N., Abrouk, M., Murat, F., Fouet, O., Poulain, J., Ruiz, M., Roguet, Y., Rodier-Goud, M., Barbosa-Neto, J. F., Sabot, F., ... Lanaud, C. (2011). The genome of *Theobroma cacao*. *Nature Genetics*, *43*(2), 101–108. <https://doi.org/10.1038/ng.736>
- Armengot, L., Picucci, M., Milz, J., Hansen, J. K., & Schneider, M. (2023). Locally-selected cacao clones for improved yield: a case study in different production systems in a long-term trial. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *7*(December), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1253063>
- Beenhouwer, M. De, Aerts, R., & Honnay, O. (2013). A global meta-analysis of the biodiversity and ecosystem service benefits of coffee and cacao agroforestry. *“Agriculture, Ecosystems and Environment,”* *175*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.05.003>
- Bennett, R. E., Sillett, T. S., Rice, R. A., & Marra, P. P. (2022). Impact of cocoa agricultural intensification on bird diversity and community composition. *Conservation Biology*, *36*(1), 1–10. <https://doi.org/10.1111/cobi.13779>
- Bioversity International. (2022). *Catálogo de cacao del Perú*. 1–103. <https://cacaodiversity.org/wp-content/uploads/2023/02/Libro-de-Cacao-Peru-elegidos2.pdf>
- Bowers, J. H., Bailey, B. A., Hebbar, P. K., Sanogo, S., & Lumsden, R. D. (2001). The Impact of Plant Diseases on World Chocolate Production. *Plant Health Progress*, *2*(1). <https://doi.org/10.1094/php-2001-0709-01-rv>
- Calderón, S., Castillo, R., & Santana, K. (2024). *EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO, RENDIMIENTO Y RENTABILIDAD DE UNA PARCELA DE CACAO MANEJADA*

BAJO EL ENFOQUE DE PRÁCTICAS DE AGRICULTURA CLIMÁTICAMENTE INTELIGENTES EN SALCEDO, RD.

- Cerda, R. (2023). Productividad de cacao en la red de parcelas KoLFACI: generación de conocimiento para la toma de decisión en LAC. In *Foro Latinoamericano-Caribeño de Cacao*.
- Cerda, R., Deheuvels, O., & Calvache, D. (2014). *Contribution of cocoa agroforestry systems to family income and domestic consumption : looking toward intensification*. 957–981. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9691-8>
- CONACADO. (2021). *Catálogo* (p. 23). <https://conacado.com.do/nuevo-catalogo-de-clones-de-alto-rendimiento/>
- Di Rienzo, J. A., Macchiavelli, R., & Casanoves, F. (2011). *Modelos Lineales Mixtos InfoStat*.
- Eskes, A. B. (1999). Working Procedures for Cocoa Germplasm Evaluation and Selection. *Proceedings of the CFC/ICCO/IPGRI Project Workshop, August*.
- Farfán V., F., Bermúdez, L., & González, N. (2016). Evaluación de herramientas para valorar el porcentaje de sombra en sistemas agroforestales con café. *472 Avances Técnicos Cenicafe*, 472(2), 1–8.
- FarmTree B.V. (2023). *FarmTree: a model for projecting the performance of Agroforestry plots and Landscapes*. www.farmtree.earth
- Félix, Y. J. (2018). Dasometría apuntes de clase y guía de actividades prácticas. 2014, 103. https://www.academia.edu/35493332/DASOMETRÍA_Apuntes_de_Clase_y_Guía_de_Actividades_Prácticas
- GaiaCacao. (2021). *Dominican Republic Cocoa Case Study*. November.
- Gama-Rodrigues, A. C. (2011). Soil organic matter, nutrient cycling and biological dinitrogen-fixation in agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 81(3), 191–193. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9372-9>
- García, L. (2010). Catálogo de cultivares de cacao del Perú. *Ministerio de Agricultura de Perú*, 112 p. <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/direccionesyoficinas/dgca/cultivares>

_cacao.pdf

- Harvey, C. A., Gonzalez, J., & Somarriba, E. (2006). Dung beetle and terrestrial mammal diversity in forests, indigenous agroforestry systems and plantain monocultures in Talamanca, Costa Rica. *Biodiversity and Conservation*, 15(2), 555–585. <https://doi.org/10.1007/s10531-005-2088-2>
- ICCO. (2023). *Boletín Trimestral de estadísticas del cacao, Volumen XLIX NO 2, año cacaoero 2022/23* (Issue 2).
- ILAC. (2020). Observatorio del cacao fino y de aroma para América Latina. *Iniciativa Latinoamericana Del Cacao*, 8, 8–10. http://scioteca.caf.com/handle/123456789/1530%0Ahttps://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1530/Iniciativa_Latinoamericana_del_Cacao_Boletín_No.8.pdf?sequence=1
- Jagoret, P., Michel, I., Ngnogué, H. T., Lachenaud, P., Snoeck, D., & Malézieux, E. (2017). *Structural characteristics determine productivity in complex cocoa agroforestry systems*.
- Justo Dominguez, L. E. (2019). Caracterización botánico-agronómica de seis clones de cacao (*Theobroma cacao* L.) de la colección mendis paredes en Castillo Grande. *Universidad Nacional Agraria de La Selva*, 9–32. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1659>
- Macavilca, L. A. (2023). *Caracterización morfológica, agronómica y sensorial de tres clones promisorios de Theobroma cacao L. en la zona de Rio Tambo*.
- Mata-Quirós, A., Brito, E., & Cerda, R. (2021). Mejoramiento genético de cacao y uso de clones resistentes a enfermedades. *Proyecto Biodiversidad En Paisajes Productivos*, 16.
- Mbow, C., Smith, P., Skole, D., Duguma, L., & Bustamante, M. (2014). Achieving mitigation and adaptation to climate change through sustainable agroforestry practices in africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6(1), 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.09.002>
- Montagnini, F., & Nair, P. K. R. (2004). Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 61–62(1–3), 281–295. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029005.92691.79>
- Niether, W., Jacobi, J., Blaser, W. J., Andres, C., & Armengot, L. (2020). Cocoa agroforestry

- systems versus monocultures: A multi-dimensional meta-analysis. *Environmental Research Letters*, 15(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb053>
- Notaro, M., Gary, C., & Deheuvels, O. (2020). Plant diversity and density in cocoa-based agroforestry systems: how farmers' income is affected in the Dominican Republic. *Agroforestry Systems*, 94(3), 1071–1084. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00472-7>
- Orozco, L., Somarriba, E., Cerda, R., Astorga, C., & Bastide, P. (2019). ¿ Como hacerlo ? *Como estimar la cosecha actual y futura de un cacaotal*. 1–4.
- Perfecto, I., Armbrecht, I., Philpott, S. M., Soto-Pinto, L., & Dietsch, T. V. (2007). Shaded coffee and the stability of rainforest margins in northern Latin America. In *Environmental Science and Engineering* (Issue January). https://doi.org/10.1007/978-3-540-30290-2_12
- Phillips-Mora, W., Arciniegas-Leal, A., Mata-Quirós, A., & Motamayor-Arias, J. C. (2012). *Catálogo de clones de cacao seleccionados por el CATIE para siembras comerciales*.
- Phillips-Mora, W., Cawich, J., Garnett, W., & Aime, M. C. (2006). First report of frosty pod rot (moniliasis disease) caused by *Moniliophthora roreri* on cacao in Belize. *Plant Pathology*, 55(4), 584. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2006.01378.x>
- Phillips-Mora, W., Mata-Quirós, A., & arci. (2017). Generation of cacao clones with durable resistant against frosty pod rot (*Moniliophthora roreri* (Cif. & Par.) Evans et al.). *Journal of Chemical Information and Modeling*, 9, 9.
- Phillips, W., Castillo, J., Arciniegas, A., Mata, A., Leandro, M., Astorga, C., Motamayor, J., Guyton, B., Seguine, E., & Schnell, S. (2009). *Overcoming the main limiting factors of cacao production in Central America through the use of improved clones develop at CATIE*. September, 1–7.
- Ramírez, C. H. E., Córdoba-gaona, Ó. D. J., Londoño, G. A. C., & Bustamante, G. M. (2022). *YIELD OF COCOA UNDER DIFFERENT AGROFORESTRY SYSTEMS IN A DRY TROPICAL FOREST IN WESTERN COLOMBIA*. 34(1), 39–50.
- Rodriguez, O. (2017). *Importancia de la Investigación en la Sostenibilidad del Cultivo Cacao Orlando Rodríguez Septiembre, 2017*.
- Schroth, G., Laderach, P., Dempewolf, J., Philpott, S., Haggard, J., Eakin, H., Castillejos, T., Moreno, J. G., Pinto, L. S., Hernandez, R., Eitzinger, A., & Ramirez-Villegas, J. (2009).

- Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 14(7), 605–625. <https://doi.org/10.1007/s11027-009-9186-5>
- Solidaridad. (2023). *Cacao, Bosques y Diversidad: Reporte del Cacao peruano 2023*. <https://produccionsostenible.org.pe/actualidad/cacao-bosques-y-diversidad-reporte-del-cacao-peruano-2023/>
- Solórzano, R., Casanova, T., & Plaza, L. (2016). Mejoramiento y homologación de los procesos y protocolos de investigación, validación y producción de servicios en cacao y café. In *Iniap* (Issue 433, pp. 21–30). <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/4392>
- Somarriba, E. (2013). Oferta mundial de tecnologías de producción de cacao prioritarias para elevar los rendimientos , mejorar la calidad del cacao y asegurar la sostenibilidad y seguridad alimentaria de las familias cacaoteras de Centroamérica. *RUTA/UNOPS/USAID*.
- Somarriba, E., & Lopez, A. (2018). Coffee and Cocoa Agroforestry Systems: Pathways to Deforestation, Reforestation, and Tree Cover Change. *International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank*, 46. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9035%0Awww.worldbank.org>
- Somarriba, E., Orozco-Aguilar, L., Cerda, R., & López-Sampson, A. (2018). *Analysis and design of the shade canopy of cocoa-based agroforestry systems* (pp. 469–500). <https://doi.org/10.19103/as.2017.0021.29>
- Somarriba, E., Quesada, F., Orozco, L., Cerda, R., Villalobos, M., Orozco, S., Astorga, C., Deheuvels, O., Say, E., & Villagas, R. (2013). *Sombra del Cacao Sombra del Cacao* (pp. 1–45). file:///C:/Users/UsuarioEAT/Downloads/La_sombra.pdf
- Somarriba Eduardo. (2005). ¿Cómo evaluar y mejorar el dosel de sombra en cacaotales? *Agroforestería de Las Américas*, 41–42(December), 122–130.
- Tarqui Freire, O. M. (2020). *Desempeño agroforestal y económico de los clones de cacao (Theobroma cacao L.) del CATIE en diferentes condiciones agroecológicas en Costa Rica*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

7. ANEXOS

1. Farm Tree Tool

La herramienta FarmTree Tool (FTT) es un modelo basado en software que permite diseñar parcelas agroforestales diversas y proyectar su desempeño a largo plazo en términos de indicadores de producción, financieros y agroecológicos. La herramienta consta de una interfaz en línea conectada a un modelo de software que calcula las principales interacciones y competición por recursos (de espacio, nutrientes, e hídricos) entre especies en una parcela agroforestal y generar proyecciones de impacto a largo plazo.

La herramienta se ejecuta en línea y el usuario interactúa a través de la interfaz mediante una suscripción personalizada a la herramienta, garantizando la facilidad de uso de la herramienta. La metodología de la herramienta FTT se centra en la integración de distintos tipos de datos para cuantificar el desempeño de diferentes sistemas agrícolas: datos de la finca, clima, suelo, y composición de especies en la parcela y su manejo. La herramienta consta de datos por defecto, sin embargo, para generar proyecciones que reflejen el contexto local, requiere integración de datos locales. Estos datos provienen de diversas fuentes, principalmente datos de entrada del usuario (necesarios para definir un escenario) y datos de entrada del modelo (como datos climáticos y de suelo, características biofísicas y económicas de especies de árboles y cultivos, entre otros).

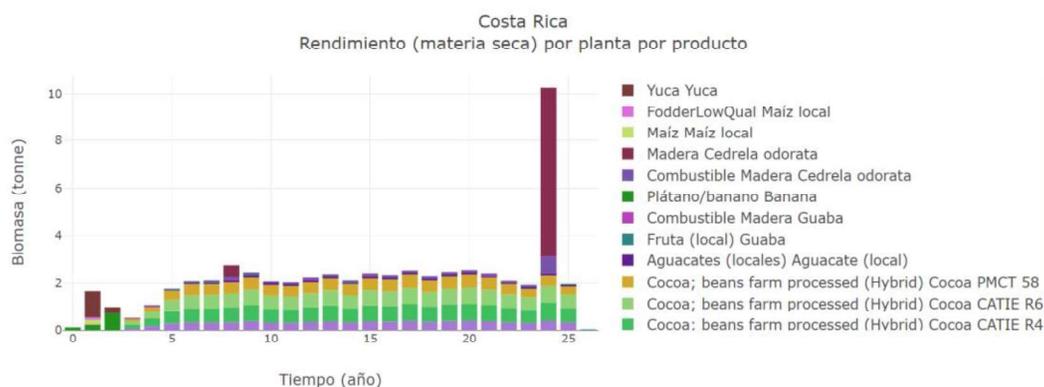


Figura 16 Interfaz de la herramienta FarmTree y ejemplo del indicador de desempeño aroforestal proyectado (rendimiento seco) para el escenario de la parcela mejorada en Costa Rica

La recopilación de datos comienza con la definición de un escenario agrícola, donde el usuario especifica las características clave de la parcela, como la ubicación, el tamaño, la pendiente, el clima, la composición del suelo, etc. Estos datos se introducen manualmente a través de la interfaz en línea. El escenario se compone de una definición de parcela y un plano de parcela.

La definición de la parcela incluye información sobre el proyecto, la ubicación, la economía y la configuración de la parcela. El plano de la parcela abarca la descripción de los componentes del sistema agrícola, como árboles, cultivos y otros elementos, así como su manejo. Se detallan aspectos como las especies de árboles y cultivos, la densidad de plantación, los ciclos de cultivo, los costos asociados, los precios locales, entre otros.

Además de los datos de entrada del usuario, la herramienta utiliza datos específicos de ubicación, como datos climáticos locales², datos de suelos específicos³, propiedades biofísicas de árboles y cultivos, prácticas de manejo y precios locales de productos e insumos. Estos datos se obtienen de diversas fuentes, como bases de datos climáticas, SoilGrids.org y la base de datos interna de Componentes de Sistemas Agroforestales (CAFS). La base de datos CAFS contiene información sobre las características biofísicas y económicas de especies de árboles y cultivos definidas para diferentes países y regiones globales.

1.1. Metodología de calibración de la herramienta FTT

Con el objetivo de asegurar una mayor precisión y confiabilidad en que las proyecciones y sean lo más precisas y ajustadas al contexto local, se realizó una calibración de la herramienta. La calibración estuvo enfocada principalmente en el rendimiento, características biofísicas, y manejo y costos de producción de los clones de cacao, utilizando los datos de los tres primeros años productivos de las tres parcelas mejoradas de cada país. Para llevar a cabo dicho proceso, se realizaron los siguientes pasos:

1. Recopilación de Datos de Campo para FTT:

- Se obtuvieron datos detallados de cada parcela, incluyendo rendimiento por características biofísicas (altura), precios de productos, insumos y prácticas de manejo de las bases de datos.

2. Recreación los diseños de parcela en FTT:

- Se recrearon los diseños de las tres parcelas seleccionadas (1 por país) utilizando la interfaz de la FTT.

3. Comparación de proyecciones de FTT con las proyecciones de los datos de CATIE:

² Las proyecciones climáticas específicas integradas en la herramienta FarmTree provienen de la base de datos CMIP6 del programa de observación 'Copernicus' de la Unión Europea (O'Neill et al., 2016). O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482.

³ Los datos de suelo específicos del sitio se obtienen de SoilGrids.org para usarse como datos de entrada en FarmTree Tool. SoilGrids es un sistema de mapeo digital global de suelos que utiliza el aprendizaje automático para mapear la distribución espacial de las propiedades del suelo en todo el mundo. <https://soilgrids.org/>

- Se compararon los rendimientos obtenidos en las parcelas de cada país y se contrarrestaron con los datos proyectados por la herramienta los primeros 5 años.
4. *Identificación de diferencias significativas y evaluación:*
- Se anotaron las diferencias más notables entre los conjuntos de datos para cada indicador y se determinó la necesidad de calibración específica para ciertos clones de cacao.
5. *Calibración de especies en la base de datos de FarmTree:*
- Internamente, se realizó la calibración de la producción de cacao por país y por clon, desglosando los resultados por clon específico y ajustando su rendimiento durante los primeros tres años productivos, con base en los datos obtenidos de las bases de datos. Además, se integraron y calibraron los datos generales relacionados con los costos de producción, insumos y mano de obra a nivel de parcela, asegurando que la información refleje de manera precisa las condiciones productivas y económicas de cada contexto.
6. *Generación de proyecciones y validación con datos CATIE:*
- Recalculación de las proyecciones utilizando la base de datos interna actualizada de FarmTree.
7. *Utilización de Proyecciones "Verificadas" para Evaluación a Largo Plazo:*
- Se emplearon las proyecciones validadas para evaluar el desempeño a largo plazo de cacao en cada país.

1.2. Supuestos generales

Para los tres países se utilizaron los siguientes supuestos para la recreación de los escenarios:

Supuesto	Costa Rica	República Dominicana	Perú
Duración del proyecto	25 años		
Precio salario / jornal	20 USD	25 USD	13,5 USD
Precio cacao seco*	2,37 USD		
Capacidad técnica	80%		
Acceso al mercado	100%		
Mano Obra establecimiento	184 jornales / ha	132 jornales / ha	127 jornales / ha

Costos insumos establecimiento	4745 USD / ha	938 USD / ha	1670 USD / ha
Mano Obra mantenimiento	80 jornales / ha	97 jornales / ha	111 jornales / ha
Costos insumos mantenimiento	1240 USD / ha	671 USD / ha	583 USD / ha

** Precios de cacao considerados antes de los aumentos a nivel global*

2. Protocolos de mediciones

PROTOCOLO PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES DE ARQUITECTURA DE PLANTAS DE CACAO CLONAL. Parcela mejorada – Proyecto KolFACI 2024

OBJETIVO

- Evaluar las dimensiones de los árboles de cacao, tales como la altura total, el diámetro de la copa, la circunferencia del tronco, así como el número y la longitud de las ramas productivas, con el fin de comprender su estado arquitectónico.

MATERIALES



Figura 17 Materiales necesarios para realizar las mediciones

METODOLOGÍA

Las mediciones deben llevarse a cabo antes de la poda de mantenimiento. Para estas mediciones es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Medir la altura total del árbol con la vara telescópica o cinta métrica de construcción y registrarla en metros (Figura 2a).
2. Determinar y medir con la vara telescópica o cinta métrica de construcción la altura productiva y registrarla en metros.

La altura productiva es hasta donde todavía se puede evidenciar presencia de flores y frutos, generalmente será hasta donde empieza la mayor parte del follaje de la copa

(Figura 2b). Tomar en cuenta que esta altura productiva es específica para cada árbol (no se define una altura productiva general).

3. Medir el diámetro de la copa con la cinta métrica en dos direcciones formando una + y registrar ambos valores en metros (Figura 2c).



Figura 18 Mediciones estructurales de los árboles de cacao.
2a- Altura total, 2b-Altura productiva, 2c-diámetro de copa

4. Medir la circunferencia del tronco principal a 15 cm desde el suelo (CAP) con la cinta de costura y registrarla en centímetros (Figura 3a).
5. Contar el número de ramas principales que se pueden identificar a 50 cm desde el suelo (Figura 3b).
6. Medir el diámetro de cada rama principal en su base con la cinta de costura y registrarlo en centímetros (Figura 3c).

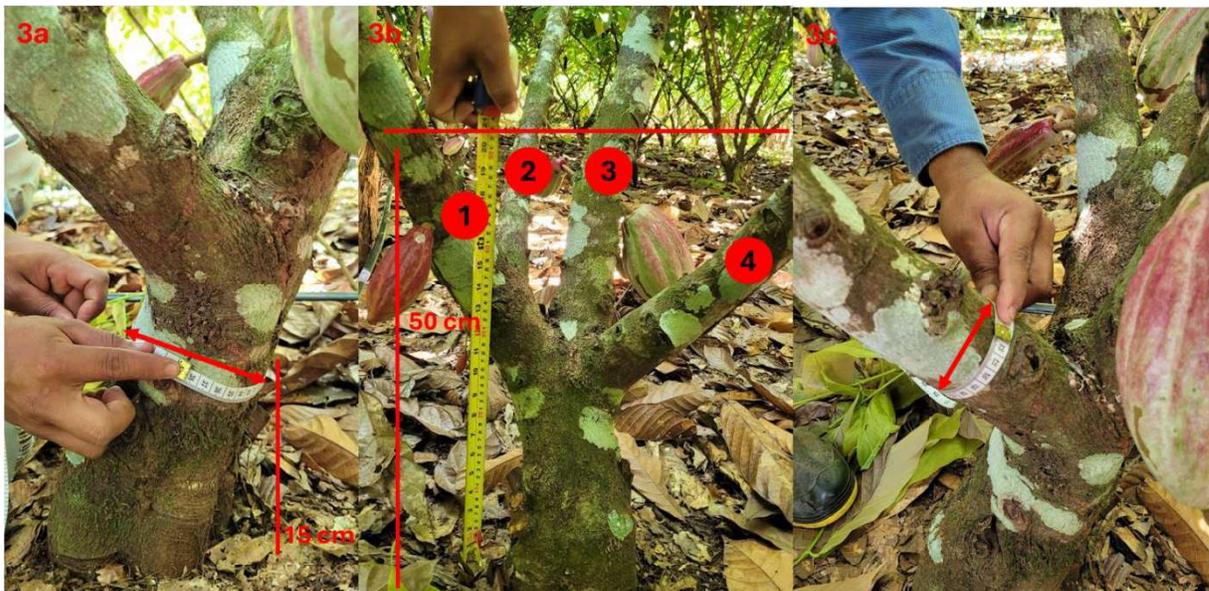


Figura 19. Mediciones estructurales de los árboles de cacao
3a-Diámetro de tallo principal, 3b-Número de ramas principales, 3c-Diámetro de las ramas principales

7. Determinar la longitud productiva de cada segmento con una cinta de costura, desde el tronco principal, pasando por las ramas principales, hasta los segmentos de ramas secundarias y terciarias, hasta alcanzar la altura productiva determinada anteriormente, estas mediciones se registran en centímetros (Figura 4,5).

Un segmento es desde donde comienza una rama hasta donde se bifurca. Se miden todas las ramas que tengan desde 1 cm de grosor, las ramas de menos de 1 cm de grosor, no se miden.

Se recomienda hacer las mediciones de los segmentos empezando por las rama principal y siguiendo por las ramas secundarias y terciarias de dicha rama, luego se pasa a la siguiente rama principal, para evitar confusiones.



Figura 20 Ejemplo 1 , determinación de ramas primarias, secundarias y terciarias.



Figura 21 Ejemplo 2, determinación de ramas primarias, secundarias y terciarias.

Repetir este procedimiento por cada árbol de cacao identificando su bloque, clon y número de fila en los respectivos formularios para toma de datos en campo.

País: _____ Ubicación: _____ Fecha de medición: _____ Responsable: _____
 Ø: _____ Diámetro _____ de _____ la _____ rama
 S1-S26: _____ Segmento

Bloque: _____ Fila: _____ Clon: _____ Planta: _____ Altura total: _____ Altura productiva: _____
 Diámetro copa 1: _____ Diámetro copa 2: _____ CAP: _____ Número de ramas principales: _____

Rama	Ø	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	
1																												
2																												
3																												
4																												
5																												

Bloque: _____ Fila: _____ Clon: _____ Planta: _____ Altura total: _____ Altura productiva: _____
 Diámetro copa 1: _____ Diámetro copa 2: _____ CAP: _____ Número de ramas principales: _____

Rama	Ø	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	
1																												
2																												
3																												
4																												
5																												

Bloque: _____ Fila: _____ Clon: _____ Planta: _____ Altura total: _____ Altura productiva: _____
 Diámetro copa 1: _____ Diámetro copa 2: _____ CAP: _____ Número de ramas principales: _____

Rama	Ø	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	
1																												
2																												
3																												
4																												
5																												

PROTOCOLO PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES AGROFORESTALES

Parcela mejorada – Proyecto KolFACI

2024

OBJETIVO

- Registrar medidas de dimensiones de árboles de sombra plantados en las parcelas mejoradas del proyecto KolFACI, incluyendo la circunferencia del tronco, altura del tronco y total, diámetro y opacidad de la copa para estimar cobertura de sombra y arquitectura de los arboles.

MATERIALES



Figura 22 Materiales necesarios para realizar las mediciones

METODOLOGÍA

Para cada árbol maderable, frutal o de servicio presente en la parcela:

1. Registrar la especie (nombre común) y ubicarla en el croquis si no se encuentra en el diseño inicial.
2. Medir la altura total con la vara telescópica, clinómetro o app móvil “Trees”, según



valores en metros. En cada dirección de medición, la cinta debe tocar el tronco del árbol.

4. Medir la circunferencia de tronco con la cinta de costura a la altura del pecho (1,3 m sobre el suelo) y registrarlos en centímetros. En el caso que haya dos o más troncos, medirlos a la altura del pecho y registrar ambos datos.

5. Mediante el método de estimación visual propuesto por Somarriba 2004, estimar el porcentaje de opacidad de la copa en una escala de 0 a 100% (Anexo 2).

Para las musáceas (plátano o banano) presentes en la parcela, considerar como una cepa cada grupo de plantas provenientes de una planta madre que superen la altura de los árboles de cacao:

1. Registrar en el croquis en que lugar de la parcela se encuentra la cepa.
2. Medir con la cinta de costura la circunferencia a la altura del pecho (CAP: a 1,3m sobre el suelo) de cada tallo de cada planta que esté generando sombra a los árboles de cacao.
3. Medir el ancho de cobertura de la copa de toda la cepa en dos direcciones formando una + y registrar ambos valores en metros.
4. Mediante el método de estimación visual propuesto por Somarriba 2002, estimar el porcentaje de opacidad de la copa en una escala de 0 a 1 (Anexo 2).

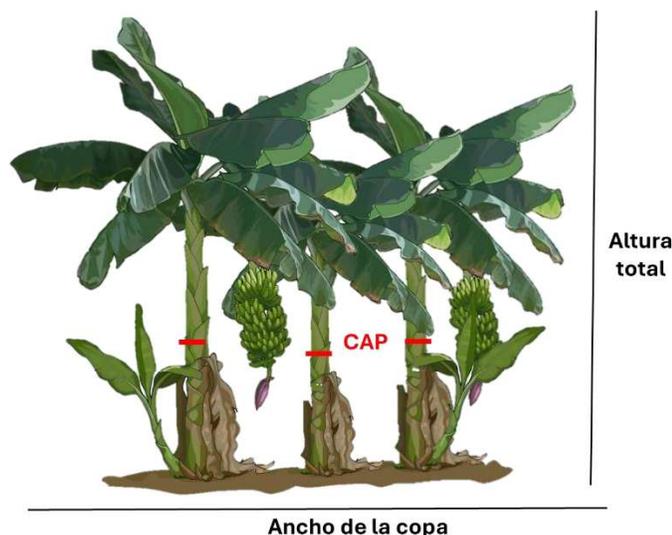


Figura 23 Ejemplo de mediciones en una cepa de banano/plátano

Nota: No medir los hijos menos de 5 cm de diametro o que no estén generando sombra a los árboles de cacao.

ANEXOS

Anexo 1.

Medición con clinómetro

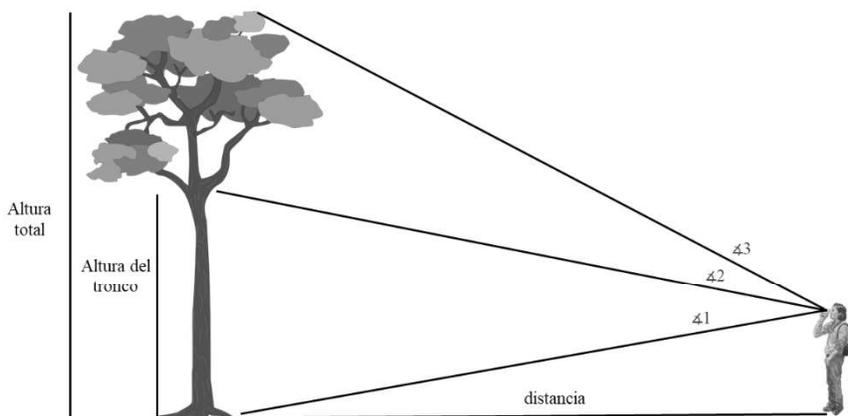


Figura 24. Ejemplificación de toma de datos con clinómetro

1. Ubicarse en un lugar donde tenga visibilidad completa de la copa y la base del árbol y medir la distancia a la que se encuentra del árbol y anotarla.
2. Con el clinómetro visualizar el ángulo (α) de la base del árbol y anotarlo.
3. Con el clinómetro visualizar el ángulo (α) de la altura del tronco del árbol y anotarlo.
4. Con el clinómetro visualizar el ángulo (α) de la copa del árbol y anotarlo.

Medición con app Trees

Descargar la app “Trees” en el siguiente link (únicamente disponible para Android):

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.forest.trees>

Esta app utiliza la misma lógica del clinómetro por lo cual debe ubicarse en un lugar donde tenga visibilidad completa de la copa y la base del árbol.

1. Anotar la distancia en la que se encuentra del árbol en el botón “DISTANCIA”.
2. Con el celular aún fijo a la altura de la cabeza inclinar el dispositivo hasta visualizar la base del árbol en la + central de la pantalla y presionar el botón “PARTE INFERIOR”.
3. Con el celular fijo a la altura de la cabeza inclinar el dispositivo hasta visualizar la copa del árbol en la + central de la pantalla y presionar el botón “PARTE SUPERIOR”.
4. Presionar el botón “CALCULAR” y tendrá el valor estimado de la altura.

Realizar el mismo proceso para estimar la altura al tronco, únicamente en el paso 3 debe apuntar hacia donde considere la parte donde termina el tronco.



Figura 25. Interfaz de la app Trees

Anexo 2.

Método de estimación visual (Somarriba 2002)

1. Desde la base del árbol, observe la copa en todas las direcciones y elija un punto de corte que divida la copa en dos mitades iguales (lado A y B). A veces, distintos cortes pueden dividir la copa en mitades iguales. Cada mitad luego se divide en cuartos.
2. Analice las dimensiones de las áreas de follaje y los espacios vacíos en cada mitad de la copa. Visualice mentalmente cómo sería si el espacio bloqueado de una mitad se moviera hacia la otra.
 - Si al mover el follaje de A a B se llena exactamente B, la oclusión es del 50%.
 - Si no se llena B, pero se llena un cuarto, la oclusión es del 25%.
 - Si se llena más de un cuarto, se divide en octavos y se hace una estimación visual.
 - Si es menos de un cuarto, se repite el proceso de división en octavos hasta obtener una estimación.

3. Si el espacio B se llena en exceso, la oclusión es mayor al 50%. Se repite el proceso descrito en el paso 2 para determinar cuánto más se llena.

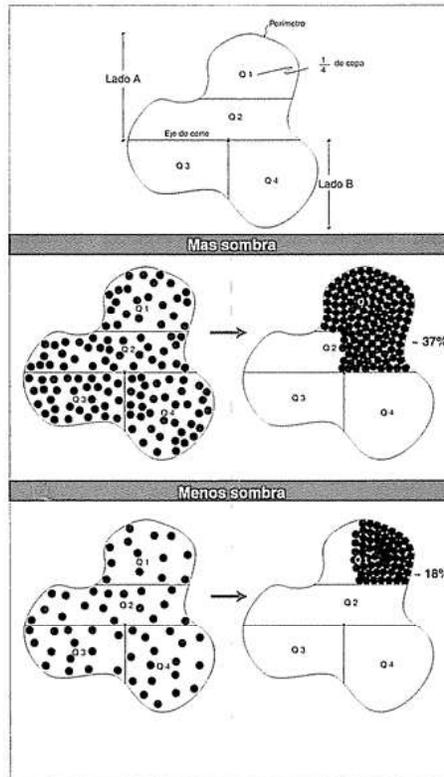


Figura 26 Estimación visual del porcentaje de oclusión de la copa
Fuente: Somarriba, 2002

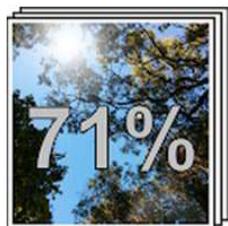
Tener en cuenta que 0% es sin cobertura de sombra y 100% es cobertura total.

PROTOCOLO PARA LA EVALUACIÓN DE COBERTURA DE SOMBRA Y TOMA DE MUESTRAS DE SUELO
Parcela mejorada – Proyecto KolFACI
2024

OBJETIVO

- Estimar la cobertura de sombra en los bloques de las parcelas mejoradas de cacao.
- Tomar muestras de suelo en los mismos puntos de medición de cobertura para análisis físico químico posterior.

MATERIALES



Dispositivo con la app móvil “HabitAPP”



Barreno de 20 cm de muestreador o pala para toma de muestra



Bolsas plásticas transparentes
Balde plástico

Figura 27 Materiales para realizar las mediciones

Link de descarga de la app HabitAPP

<https://toolbox.coffeeandclimate.org/tools/habitapp-shade-measurement-tool/>



HabitApp.apk

“hacer doble click en la imagen si en playstore no se encuentra disponible al app”

METODOLOGÍA

- a) Identificar cinco puntos equidistantes a lo largo de la fila central de cada bloque (Figura 2). Por ejemplo, si la parcela tiene una longitud de 50 m, tomar las mediciones de cobertura y muestras de suelo cada 10 m.

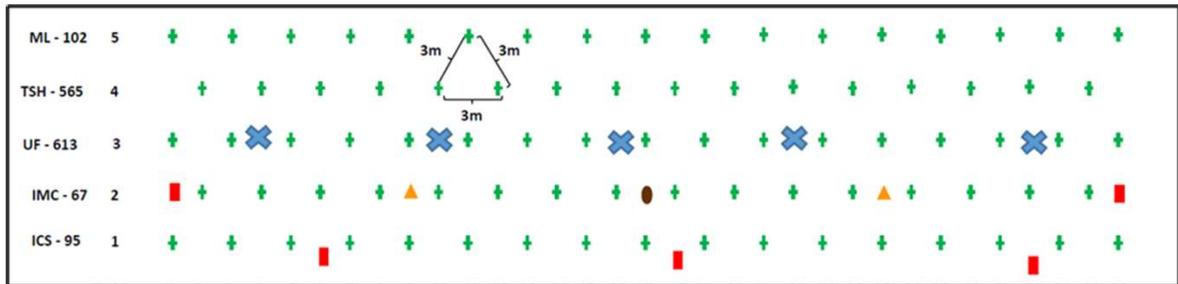


Figura 28 Ejemplo de bloque de cada parcela
 ✕ Punto aproximado donde se toman los datos de cobertura y submuestra de suelo

- b) Ubicarse en cada punto, y utilizar la aplicación HabitAPP para tomar una foto de la cobertura de sombra (Figura 3). Evitar tomar foto de ramas y hojas de los árboles de cacao y tener en cuenta siempre tomar la foto en sentido de dirección del bloque. Puede ayudarse con un palo de selfie a superar la altura de la ramas de los árboles de cacao.

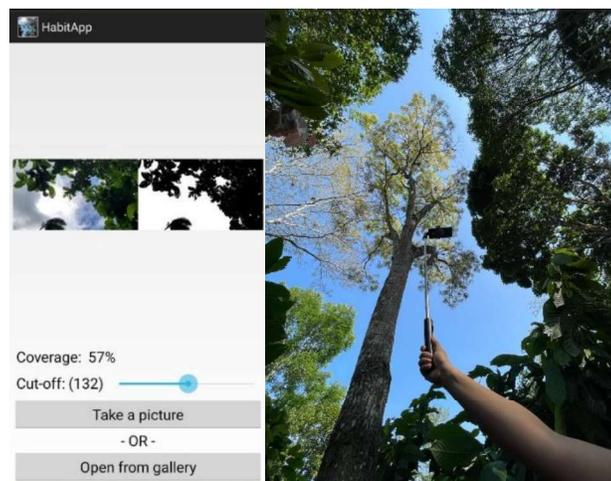


Figura 29. Toma de foto de cobertura de sombra mediante HabitAPP y uso de palo de selfie para superar la altura de los árboles de cacao

- c) Anotar los porcentajes de cobertura de sombra obtenidos en cada punto de medición en el formulario de registro de datos.

En tres puntos de medición de cobertura de sombra (extremos y centro), tomar las submuestras de suelo.

- Con ayuda de un barreno o pala, tomar la muestra a 20 cm de profundidad, total de 3 submuestras por bloque.
- Mezclar cada submuestra por bloque en un balde plástico formando una muestra compuesta.
- Colocar de 0,5 a 1 kg de muestra compuesta en una bolsa etiquetada adecuadamente con la información del bloque correspondiente.



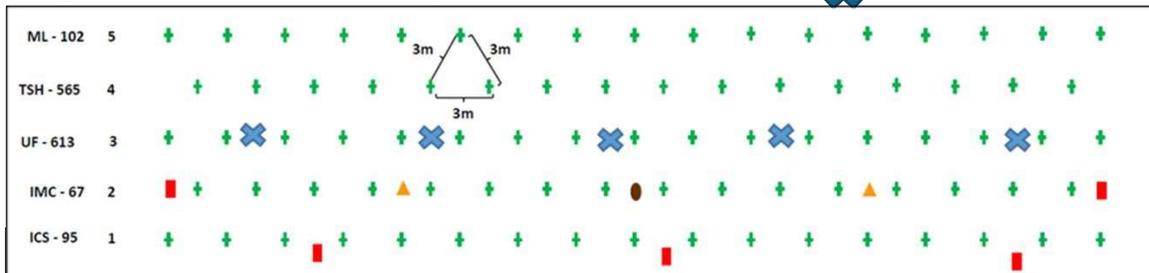
Figura 30 Proceso de toma de muestra de suelo con barreno

Para el correcto etiquetado de estas muestras, etiquetar de la siguiente manera **“Muestra completa, bloque X”**

País: _____ Ubicación: _____

Fecha de medición: _____ Responsable: _____

Los puntos donde se toma la foto y la submuestra de suelo son: ✕



Registro de los datos de cobertura

BLOQUES	% Cobertura Punto 1	% Cobertura Punto 2	% Cobertura Punto 3	% Cobertura Punto 4	% Cobertura Punto 5
Bloque 1					
Bloque 2					
Bloque 3					
Bloque 4					
Bloque 5					

Nota: En los mismos puntos de toma de datos de cobertura realizar la toma de submuestra de suelo para conformar una muestra de suelo por bloque. Cada bolsa de muestra de suelo identificarla con el número de bloque, ejemplo: Muestra compuesta-Bloque 1

Observaciones: _____
