

Análisis morfológico y de rendimiento de

cacao

Theobroma cacao L.
en Fortul, Arauca

Análisis morfológico y de rendimiento de

cacAO

Theobroma cacao L.

en Fortul, Arauca

Análisis morfológico y de rendimiento de cacao (Theobroma cacao L.) en Fortul, Arauca / Enrique Quevedo García, Giovanni Orlando Cancino Escalante, Oscar Olimpo Blanco Blanco — Pamplona: Universidad de Pamplona. 2026.

146 p. 17 cm x 24 cm

ISBN (Digital): 978-628-7656-89-5

© Universidad de Pamplona
© Sello Editorial Unipamplona
Sede Principal Pamplona, Km 1 Vía Bucaramanga-
Ciudad Universitaria. Norte de Santander, Colombia.
www.unipamplona.edu.co
Teléfono: 6075685303

Análisis morfológico y de rendimiento de cacao (Theobroma cacao L.) en Fortul, Arauca

Enrique Quevedo García
Giovanni Orlando Cancino Escalante
Oscar Olimpo Blanco Blanco

ISBN (Digital): 978-628-7656-89-5
DOI: <https://doi.org/10.24054/Oh1m1h48>
Primera edición marzo de 2026
Colección Ciencias Pecuarias y Agronomía
© Sello Editorial Unipamplona

Rector: Ivaldo Torres Chávez Ph.D
Vicerrector de Investigaciones: Aldo Pardo García Ph.D

Jefe Sello Editorial Unipamplona: Catherine Mojica Acevedo
Diseño y diagramación: Laura Angelica Buitrago Quintero
Corrección de estilo: Andrea del Pilar Duran Jaimes

*Imagen de cubierta y divisores de páginas están
creados con apoyo de Inteligencia Artificial*

Hecho el depósito que establece la ley. Todos los derechos reservados.
Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio, sin permiso del editor.



Análisis morfológico y de rendimiento de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Fortul, Arauca

Enrique Quevedo García
Giovanni Orlando Cancino Escalante
Oscar Olimpo Blanco Blanco



“Formando nuevas generaciones con
sello de excelencia comprometidos
con la transformación social de las
regiones y un país en paz”





Resumen

El estudio tuvo como objetivo caracterizar el comportamiento morfoagronómico de tres grupos genéticos de *Theobroma cacao* L. —trinitario, forastero y criollo— establecidos en el municipio de Fortul, Arauca (Colombia), con el fin de identificar materiales con mayor potencial productivo. Se evaluaron variables como peso y número de granos por fruto, índice de mazorca, área foliar, y rendimiento por árbol. Los resultados evidenciaron diferencias significativas. El grupo trinitario presentó el mayor índice de semilla (15,3 g por grano) y el mayor número promedio de granos por mazorca (37,84), superando a los grupos forastero y criollo. Además, mostró el mayor rendimiento agronómico con 541,90 g de grano seco por árbol y una mayor eficiencia en el índice de mazorca, requiriendo solo 18 mazorcas por kilogramo de cacao seco. No se encontraron diferencias significativas en el área foliar, aunque el criollo presentó valores ligeramente inferiores. Tampoco se observaron diferencias claras en la silueta de hojas entre trinitario y forastero. Se concluye que el grupo trinitario posee ventajas agronómicas significativas que lo posicionan como el más prometedor en términos de productividad y eficiencia, lo cual es relevante tanto desde una perspectiva industrial como para estrategias de mejoramiento genético en sistemas cacaoteros del piedemonte araucano.

Palabras clave: Cacao, rendimiento agronómico, componentes morfológicas, grupos genéticos





Abstract

The objective of this study was to characterize the morpho-agronomic performance of three genetic groups of *Theobroma cacao* L.—Trinitario, Forastero, and Criollo—established in the municipality of Fortul, Arauca (Colombia), to identify materials with higher productive potential. Variables such as fruit weight and number of beans per pod, pod index, leaf area, and yield per tree were evaluated. The results revealed significant differences. The Trinitario group showed the highest seed index (15.3 g per bean) and the highest average number of beans per pod (37.84), outperforming both the Forastero and Criollo groups. It also recorded the highest agronomic yield with 541.90 g of dry beans per tree and greater efficiency in the pod index, requiring only 18 pods per kilogram of dry cacao beans. No significant differences were found in leaf area, although the Criollo group showed slightly lower values. Similarly, no clear differences in leaf shape were observed between the Trinitario and Forastero groups. It is concluded that the Trinitario group presents significant agronomic advantages, positioning it as the most promising in terms of productivity and efficiency, an aspect that is relevant from both an industrial perspective and for genetic improvement strategies in cacao-growing systems of the Arauca piedmont.

Keywords: Cocoa, agronomic yield, morphological components, genetic groups

ÍNDICE

5	RESUMEN
7	ABSTRACT
17	INTRODUCCIÓN

21 CAPÍTULO I ORIGEN Y ASPECTOS BIOLÓGICOS DEL CACAO

23	Origen del cacao	30	Tronco y ramas
24	Producción de cacao a nivel mundial y en Colombia	31	Raíz
27	Aspectos biológicos del cacao	33	Variedades de cacao
27	Morfología y descripción botánica del cacao	33	Criollo
27	Hojas	34	Forastero
28	Flores	35	Trinitario
29	Fruto	35	Ciclo fenológico del cacao
29	Semillas	37	Composición nutricional del cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.)



39 CAPÍTULO II ASPECTOS AGRONÓMICOS DEL CACAO

- 41 Aspectos agronómicos
- 41 Condiciones agroecológicas para la producción de cacao
- 43 Regiones aptas para el cultivo de cacao en Colombia
- 45 Enfermedades y plagas asociadas al cultivo de cacao
- 48 Manejo agronómico del cultivo de cacao
- 49 Control de malezas
- 49 Control mecánico
- 49 Control químico
- 49 Control biológico
- 50 Fertilización
- 50 Nutrientes esenciales
- 50 Poda
- 51 Regulación de sombra
- 51 Estrategias de manejo integrado de plagas y enfermedades
- 51 Control biológico
- 52 Control químico
- 52 Propagación del cacao
- 53 Propagación sexual
- 54 Propagación asexual
- 55 Injerto de púa central
- 56 Injerto en leño grueso o lateral (Método Malayo)
- 58 Injerto de parche
- 58 El injerto de aproximación



61 CAPÍTULO III FUNDAMENTOS EN LA INJERTACIÓN DE CACAO

- 63 Interacción patrón-variedad en cacao injertado
- 65 La injertación: Un mecanismo de transferencia horizontal de genes durante la evolución
- 65 Algunos ejemplos de mecanismos de comunicación en la planta
- 65 El fotoperiodo
- 67 Estrés hídrico
- 69 El papel del potasio en la apertura y cierre del estoma durante el estrés
- 70 El crecimiento y la luz
- 72 Tema de interés actual
- 72 Compatibilidad
- 73 Conclusiones

75 CAPÍTULO IV DETERMINANTES MORFOFISIOLÓGICOS Y ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CACAO

- 77 Introducción
- 78 Factores morfofisiológicos que determinan la producción del cacao
- 79 La eficiencia del cultivo de cacao para producir materia seca
- 79 Estructura del dosel
- 80 Desarrollo foliar y longevidad
- 80 Orientación del follaje
- 82 Disponibilidad de radiación
- 83 Interceptación de luz
- 83 Modelos de interceptación de luz
- 84 Modelo de Monsi y Saeki (1993)
- 85 Modelo de Jackson y Palmer
- 89 Estudios sobre las características morfológicas y componente de rendimiento en cacao



93 CAPÍTULO V EVALUACIÓN MORFOLÓGICA Y COMPONENTES DE RENDIMIENTO EN TRES GRUPOS GENÉTICOS DE CACAO

95	Introducción	108	Resultados y discusión
96	Contexto general del área de estudio	108	Componentes morfológicos
97	Extensión y ecosistemas	108	Ancho de la hoja
98	Demografía	109	Largo de la hoja
98	Área rural y producción agropecuaria	111	Área foliar
98	Distribución de la tierra y vocación del suelo	112	Peso seco del área foliar
99	Desarrollo del estudio	112	Largo por ancho de la hoja
99	Localización del estudio	113	Silueta de la hoja
99	Material vegetal	114	Componentes de rendimiento
99	Diseño experimental	114	Índice de semilla
100	Muestreo	115	Número de granos por mazorca
100	Componentes evaluados	116	Diámetro polar y ecuatorial de la mazorca
102	Peso seco del área foliar	121	Comparación del rendimiento entre grupos genéticos de cacao
102	Silueta de la hoja	123	Conclusiones
106	Rendimiento agronómico del cultivo	124	Recomendaciones
107	Análisis estadístico y procesamiento de datos		



127	REFERENCIAS
139	GLOSARIO
145	AUTORES



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Área, producción y rendimiento de cacao de los municipios del departamento de Arauca (2022)	25
Tabla 2. Área, producción y rendimiento de cacao en el municipio de Fortul, Arauca (2017-2022)	26
Tabla 3. Etapas fenológicas durante el ciclo de crecimiento del cultivo de cacao	36
Tabla 4. Composición nutricional del cacao	37
Tabla 5. Regiones aptas para el cultivo de cacao en Colombia	44
Tabla 6. Enfermedades asociadas al cultivo de cacao	45
Tabla 7. Plagas asociadas al cultivo de cacao	47
Tabla 8. Coeficiente de extinción de la radiación K, medido en diferentes cultivos	88
Tabla 9. Estudios sobre las características morfológicas y componentes de rendimiento en cacao	92
Tabla 10. Variables utilizadas en el estudio	107
Tabla 11. Análisis de varianza del ancho de la hoja	108
Tabla 12. Prueba de Tukey para el del ancho de la hoja (cm)	109
Tabla 13. Análisis de varianza para el largo de la hoja (cm)	110
Tabla 14. Prueba de Tukey para el largo de la hoja (cm)	110
Tabla 15. Prueba de Tukey para el área foliar (cm ²)	111
Tabla 16. Prueba de Tukey para el peso seco del área foliar (g)	112
Tabla 17. Prueba de Tukey para el largo por ancho (cm ²)	113
Tabla 18. Prueba de Tukey para la silueta (cm ²)	114
Tabla 19. Prueba de Tukey para comparación de medias del número de grano por mazorca para cada grupo	116
Tabla 20. Análisis multivariante del diámetro polar (TDIAP) y ecuatorial (TDAE) de las mazorcas en relación con el tiempo	117
Tabla 21. Prueba de comparación de medias de Tukey para el diámetro polar de la mazorca (TDIAP)	118
Tabla 22. Prueba de comparación de medias de Tukey para el diámetro ecuatorial de la Mazorca (TDIAP)	118
Tabla 23. Resumen del ANOVA para variables productivas entre grupos genéticos de cacao	122
Tabla 24. Prueba de Tukey ($p < 0,05$) para la comparación de medias del rendimiento agronómico e índice de mazorca por grupo	123



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Hojas del cacao.....	27
Figura 2. Flores del cacao	28
Figura 3. Fruto del cacao.....	29
Figura 4. Semillas de cacao.....	30
Figura 5. Tronco y ramas del cacao.....	31
Figura 6. Raíz del cacao	32
Figura 7. Árbol variedad criollo	33
Figura 8. Árbol variedad forastero.	34
Figura 9. Árbol variedad forastero.	35
Figura 10. Suelo apto para el cultivo de cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.).	43
Figura 11. Enfermedad mazorca negra (<i>Phytophthora</i> sp.; <i>Phytophthora palmivora</i>).	46
Figura 12. Plaga mosca blanca (<i>Bemisia tabaci</i>)	48
Figura 13. Injerto de púa.....	56
Figura 14. Micro injertación en una planta perenne.	64
Figura 15. Ensayo de injerto para determinación floral en <i>Nicotiana tabacum</i>	67
Figura 16. Planta bajo estrés hídrico.	68
Figura 17. El nitrógeno disponible en el agua, suelo y planta.	70
Figura 18. Tipos de dosel basados en la inclinación de las hojas.....	81
Figura 19. Localización del municipio de Fortul, Arauca, Colombia.....	97
Figura 20. Ancho de la hoja de cacao.	101
Figura 21. Longitud de la hoja de cacao.	102
Figura 22. Granos en la mazorca de cacao.	104
Figura 23. Diámetro polar de la mazorca.....	105
Figura 24. Diámetro ecuatorial de la mazorca.....	106
Figura 25. Comparación de los índices de granos promedio por grupo genético	115
Figura 26. Medias marginales estimadas del diámetro polar de la Mazorca (TDIAP).....	120
Figura 27. Medias marginales estimadas del diámetro ecuatorial de la mazorca (TDAE).....	121



Introducción

La producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) es un sector agrícola de gran relevancia a nivel global, especialmente en países en desarrollo donde representa una fuente de ingresos y empleo. Es así como los conocimientos sobre las características morfológicas y los componentes de rendimiento del cacao ofrecen información valiosa para optimizar las prácticas agronómicas. Identificar variedades que se adapten a las condiciones locales y que proporcionen mayores rendimientos contribuye significativamente a mejorar la producción.

En esta orden de ideas la justificación de este estudio radica en el contexto específico del municipio de Fortul, localizado en el departamento de Arauca, Colombia, donde la producción de cacao no solo contribuye a la economía local, sino que también juega un papel en el fortalecimiento y en la calidad de vida de los agricultores.

En los últimos cinco años el municipio ha visto un crecimiento significativo en la producción de cacao reflejando la adopción de mejores prácticas agrícolas y el uso de variedades más productivas. Este crecimiento es especialmente relevante en un municipio que ha enfrentado desafíos socioeconómicos debido a su ubicación geográfica y a los efectos del conflicto armado.

Este libro está dirigido a investigadores, agrónomos, productores de cacao y estudiantes de agronomía, con el objetivo de analizar las características morfológicas y de rendimiento de diferentes grupos genéticos de cacao (*Theobroma cacao* L.), específicamente las variedades criollo, forastero y trinitario, en el municipio de Fortul, Arauca, Colombia.

Los temas generales abordados incluyen el origen del cacao, la producción de cacao a nivel mundial y en Colombia, los aspectos biológicos y agronómicos, tales como su morfología, ciclo fenológico y propagación, entre otros.

Capítulo I. Origen y aspectos biológicos del cacao

Este capítulo se inicia con una visión histórica del origen del cacao, su producción a nivel mundial y en Colombia, destacando las principales regiones productoras. En la segunda parte se aborda la biología del cacao, detallando su morfología, ciclo de vida y las variedades más relevantes. Se describen las características botánicas de las hojas, flores, frutos y semillas, así como el ciclo fenológico de la planta.

Capítulo II. Aspectos agronómicos del cacao

Se inicia con una descripción de las condiciones agroecológicas esenciales para el crecimiento y desarrollo del cacao, subrayando la importancia de factores climáticos como la temperatura y la humedad. Igualmente, aborda las prácticas agronómicas necesarias para maximizar la producción y calidad del cacao, destacando la importancia de un manejo adecuado del suelo, control de plagas y enfermedades y prácticas de poda. Además, se exploran las diferentes técnicas de propagación y el manejo agrícola, esenciales para mantener la calidad del cacao desde la planta hasta el mercado.

Capítulo III. Fundamentos en la injertación de cacao

Se exploran los factores que influyen en la compatibilidad entre el patrón y la variedad en el proceso de injertación. Igualmente se discute la relevancia del injerto en la producción de cacao, destacando cómo esta técnica es capaz de incrementar tanto la calidad como la cantidad de la producción, al combinar características deseables de diferentes variedades y se analizan los procesos fisiológicos que ocurren durante el injerto. Finalmente,

se evalúa cómo la técnica de injertación influye en la productividad del cultivo de cacao, considerando factores como la adaptación a condiciones específicas del entorno y la mejora en la resistencia a enfermedades.

Capítulo IV. Determinantes morfofisiológicos y estrategias de optimización en la producción de cacao

Se centra en cómo la estructura de la planta y la disposición de las hojas influyen en la captación de luz y la eficiencia fotosintética, fundamentales para la acumulación de materia seca. Además, se destacan las condiciones ambientales, como la disponibilidad de agua y nutrientes; elementos para el crecimiento.

Capítulo V. Evaluación morfológica y componentes de rendimiento en tres grupos genéticos de cacao

Proporciona un análisis de las características morfológicas y el rendimiento de los tres grupos genéticos de cacao en las condiciones específicas de la finca La Plaga ubicada en el municipio de Fortul, Arauca, buscando identificar las variedades más adaptadas y productivas para el entorno local.

A detailed photograph of a cacao plant. On the left, a large, green, ribbed cacao fruit is partially visible. In the center, a white cacao flower with five petals and prominent stamens is in bloom. Below the flower, a small green bud and a developing brown cacao pod are visible. The background is a lush, green forest with trees and foliage, slightly out of focus.

CAPÍTULO I

Origen y aspectos biológicos del cacao



Origen y aspectos biológicos del cacao

Origen del cacao

El cacao (*Theobroma cacao* L.) tiene una larga historia de cultivo y uso por las civilizaciones precolombinas. Los olmecas (1500-400 a.C.) fueron probablemente los primeros en cultivar el cacao y en usar sus granos para preparar una bebida ritual. Más tarde, los mayas (250-900 d.C.) y los aztecas (1300-1521 d.C.) adoptaron el cacao no solo como bebida sino también como moneda y símbolo de estatus social. Los mayas lo llamaban “kakaw” y lo creían un regalo de los dioses (Coe & Coe, 2013).

El uso del cacao se expandió a través de Mesoamérica, y los aztecas lo incorporaron en su cultura, denominándose “xocoatl”. La bebida de cacao, frecuentemente mezclada con especias, maíz y chiles, era consumida por la élite y usada en ceremonias religiosas. Además, los granos eran tan preciados que servían como moneda en transacciones comerciales (Smith, 2012).

Con la llegada de los europeos a América, el cacao fue llevado a Europa en el siglo XVI. Hernán Cortés es frecuentemente acreditado con la introducción del cacao en la corte española alrededor de 1528, donde la bebida de chocolate rápidamente se convirtió en un símbolo de lujo y sofisticación entre la nobleza europea. La adición de azúcar y vainilla, ingredientes no disponibles en América, transformó el sabor amargo original en la dulce bebida que conocemos hoy (Presilla, 2009).

La comprensión acerca del origen y la historia temprana del cacao ha aumentado significativamente gracias a recientes estudios arqueológicos y genéticos. Por ejemplo, un estudio de Zarrillo et al. (2018) descubrió residuos de almidón de cacao en fragmentos de cerámica en el sitio arqueológico de Santa Ana-La Florida en Ecuador, proporcionando evidencia directa de su uso hace aproximadamente 5.300 años.

Producción de cacao a nivel mundial y en Colombia

La producción de cacao a nivel mundial se concentra principalmente en África Occidental, América Latina y el Sudeste Asiático alcanzando una producción global de 5.874.582 toneladas. África es la principal región productora, contribuyendo con el 69,6 % donde Costa de Marfil y Ghana son los líderes, con producciones de 2.230.000 toneladas (37,9 %) y 1.108.663 toneladas (18,8 %), respectivamente (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2024).

América Latina, la cuna del cacao, produce el 17,3 % del cacao mundial. Ecuador es el mayor productor en esta región, ocupando el cuarto lugar a nivel mundial con 327.903 toneladas. Brasil y Perú le siguen con producciones de 273.873 toneladas y 171.177 toneladas, respectivamente. Asia y Oceanía aportan el 13,1 % restante, con Indonesia siendo el principal productor en esta región (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2024).

Colombia, aunque no figura entre los principales productores de cacao, posee una participación importante y creciente en el mercado global. En 2022 produjo 136.317 toneladas de cacao, cultivadas en una superficie de 229.974 hectáreas, con un rendimiento de 17,57 toneladas por hectárea (Agronet, 2024). El departamento de Santander es el mayor productor, representando el 25,66 % de la producción nacional, seguido por Antioquia con el 10,82 % y Arauca con el 8,07 % (Agronet, 2024). La mayoría de

las fincas cacaoteras son pequeñas, con menos de tres hectáreas y están manejadas por pequeños agricultores.

De hecho, el cacao colombiano es conocido por su alta calidad y ha ganado reconocimiento en el mercado internacional, por sus características organolépticas únicas. El país ha estado trabajando en mejorar las prácticas agrícolas y en promover la producción sostenible de cacao. Programas de certificación como Rainforest Alliance y Fairtrade, han sido implementados para mejorar la sostenibilidad y las condiciones y calidad de vida de los agricultores (Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao], 2023).

En cuanto al caso específico del departamento de Arauca, ubicado en la región oriental de Colombia, en los últimos cinco años la producción ha mostrado un crecimiento significativo del 20%, consolidándose como una actividad económica importante (Agronet, 2024). En 2022, produjo aproximadamente 11.900 toneladas, un área cosechada de 18.554 hectáreas con un rendimiento promedio de 0,30 toneladas por hectárea. Se concentra en gran parte en los municipios de Arauquita, Saravena y Fortul, (Agronet, 2024) los cuales cuentan con condiciones agroecológicas favorables, como suelos fértiles, alta pluviosidad y temperaturas adecuadas (Tabla 1).

Tabla 1

Área, producción y rendimiento de cacao de los municipios del departamento de Arauca (2022)

Municipio	Área cosechada(ha)	Producción (ton)	Rendimiento (ha/ton)
Arauca	258	154,8	0,60
Arauquita	7.285	4.735,25	0,65
Cravo Norte	12	7,20	0,60
Fortul	2.102	2.120	1,00
Puerto Rondón	90	72	0,80
Saravena	4.410	3.528	0,80
Tame	4.397,5	1.319	0,30
Total	18.554,50	11.918,50	0,30

Fuente: Elaboración propia con datos de Agronet (2024)

Con relación al municipio de Fortul, uno de los principales productores en el departamento de Arauca, se ha mostrado un desarrollo significativo (Tabla 2). Desde el año 2017, el área sembrada ha registrado una tendencia creciente, aumentando de 2.254,50 a 3.352,00 hectáreas en 2022. En cuanto a la producción, se observa un incremento del 59% alcanzando 2.102,00 toneladas (Agronet, 2024). El rendimiento, medido en toneladas por hectárea, igualmente ha mostrado una tendencia positiva, reflejando una mejora en la eficiencia de la producción, lo que se atribuye a la adopción de mejores prácticas agrícolas, la utilización de variedades de cultivos más productivas y mejoras en las condiciones de cultivo.

En efecto, el municipio de Fortul ha sido beneficiado por diversos proyectos y programas de apoyo, los cuales se centran en la capacitación de los agricultores, la mejora de la infraestructura agrícola y el acceso a mercados de alto valor. Esta estrategia ha sido parte de los intentos por fomentar la paz y el desarrollo rural en regiones afectadas por el conflicto armado y cultivos ilícitos (Oficina de las Naciones Unidas Contra la Droga y el Delito [UNODC], 2020).

Tabla 2

Área, producción y rendimiento de cacao en el municipio de Fortul, Arauca (2017-2022)

Año	Área cosechada (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (ha/ton)
2017	2.194,00	1.316,40	0,60
2018	2.204,00	1.322,40	0,60
2019	2.260,00	1.808,00	0,80
2020	2.320,00	1.624,00	0,70
2021	2.370,00	1.777,50	0,75
2022	2.102,00	2.102,00	1,00

Fuente: Elaboración propia con datos de Agronet (2024)

Aspectos biológicos del cacao

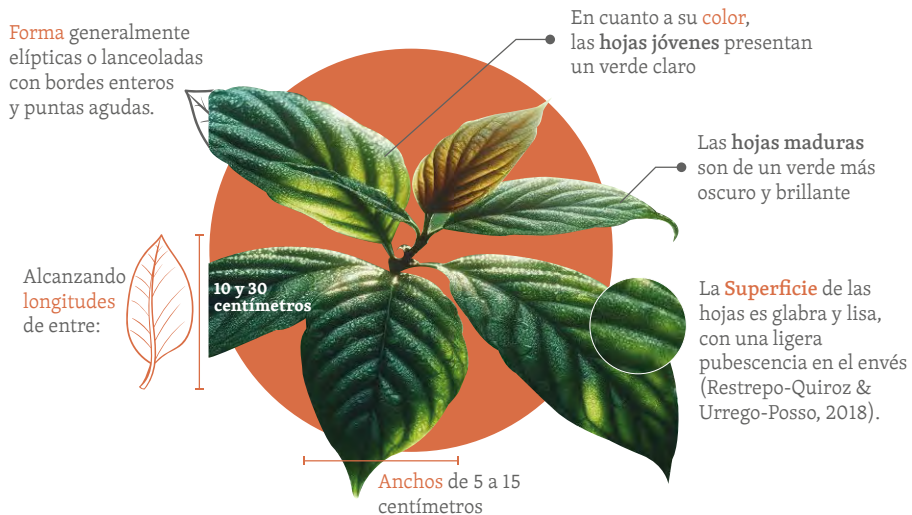
Morfología y descripción botánica del cacao

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es una especie arbórea perenne que se clasifica dentro de la clase *Magnoliopsida*, la división *Magnoliophyta* y el reino *Plantae*. En condiciones óptimas, alcanza alturas que varían entre 4 y 8 metros, aunque en su entorno natural, el árbol crece hasta 20 metros (Ballesteros, Lagos et al., 2015; Jaimes-Suárez et al., 2022).

Hojas

El peciolo, que conecta la hoja al tallo, mide entre 1 y 3 centímetros de longitud y las hojas están dispuestas de manera alterna a lo largo del tallo, lo que maximiza la captación de luz solar, esencial para la fotosíntesis. Las nervaduras son prominentes, con una central bien definida y una lateral más sutil (Dostert et al., 2011).

Figura 1
Hojas del cacao

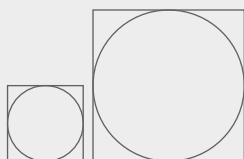


Fuente: Infografía de elaboración propia; imagen de planta generada con Microsoft Copilot (2025)

Figura 2
Flores del cacao



5 sépalos y 5 pétalos
(blanco o rosado)



Tamaño oscila
entre 1 y 2 cm
de diámetro

Fuente: Infografía de elaboración propia;
imagen de planta generada con Microsoft
Copilot (2025)

Flores

Son pequeñas y delicadas, con un tamaño que oscila entre 1 y 2 centímetros de diámetro. Se caracterizan por tener cinco sépalos y cinco pétalos de color blanco o rosado (Figura 2). Estas flores son hermafroditas, lo que significa que contienen tanto órganos reproductores masculinos como femeninos. Se desarrollan en el tronco y las ramas leñosas del árbol, agrupándolos en cojines florales. Cada flor presenta cinco estambres verdaderos de color blanco y cinco estaminodios morados, lo que contribuye a su estructura floral distintiva (Pinzón-Useche et al., 2011).

Se desarrollan a partir de botones axilares en el tronco y las ramas principales del árbol, un fenómeno conocido como caulifloria, que es característico de algunas especies tropicales. Este tipo de floración permite que las flores crezcan directamente en el tronco, facilitando la polinización por insectos que se posan en la corteza del árbol (Dostert et al., 2011).

Fruto

El fruto del cacao, conocido como mazorca, es una baya grande y polimorfa protegida por una cáscara o pericarpio (Figura 3). En su interior, se encuentran las semillas dispuestas en hileras alrededor de una placenta. Cada mazorca contiene entre 20 a 50 semillas cubiertas por un mucílago azucarado que juega un rol importante durante la fermentación. La mazorca madura entre 150 a 180 días después de la polinización. El color del fruto varía, siendo verde en algunos casos y tonalidades de morado o rojo en otros, cambiando a amarillo o anaranjado al madurar (Restrepo-Quiroz & Urrego-Posso, 2018; Dostert et al., 2011).

Figura 3
Fruto del cacao



Fuente: Infografía de elaboración propia; imagen de planta generada con Microsoft Copilot (2025)

Semillas

Se encuentran dentro de las mazorcas del cacao, son grandes, con un tamaño que oscila entre 2 y 3 centímetros de longitud y un color

que varía desde el marrón claro hasta el púrpura oscuro (Figura 4). La forma de las semillas es ovada y ligeramente aplanada y su superficie es lisa (Restrepo-Quiroz & Urrego-Posso, 2018).

Figura 4
Semillas de cacao

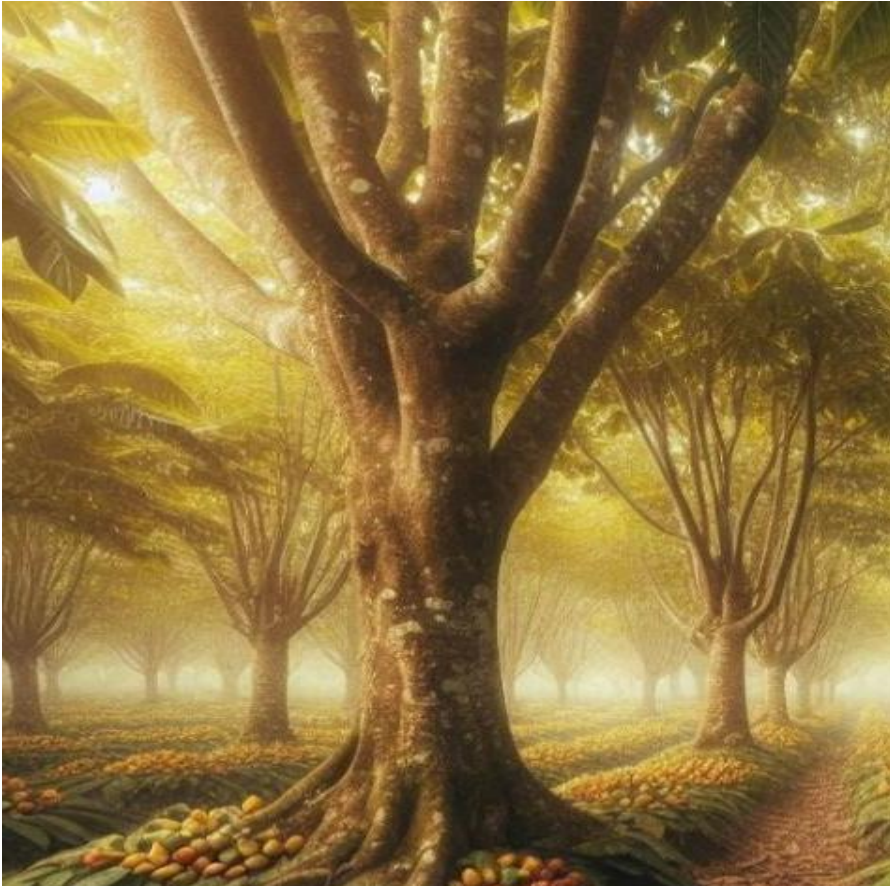


Fuente: Infografía de elaboración propia; imagen de planta generada con Microsoft Copilot (2025)

Tronco y ramas

El tronco del cacao, cuando proviene de semilla sexual, crece verticalmente hasta alcanzar una altura de 0,80 a 1,50 metros antes de ramificarse en 3 a 5 ramas principales, formando una estructura conocida como mesa o verticilo (Figura 5). Las ramas primarias se derivan en secundarias y terciarias, conformando la copa del árbol. En plantas clonadas o reproducidas asexualmente, el tronco principal no desarrolla una mesa u horqueta, asemejándose a una rama primaria. Estas plantas tienden a ser más manejables, con menor crecimiento y follaje menos denso, lo cual facilita el control de plagas y enfermedades (Restrepo-Quiroz & Urrego-Posso, 2018; Dostert et al., 2011).

Figura 5
Tronco y ramas del cacao



Fuente: Microsoft Copilot (2025)

Raíz

El cacao presenta dos tipos de raíces; una principal que es pivotante y varias secundarias. La raíz principal penetra profundamente en el suelo, proporcionando anclaje y soporte a la planta, pudiendo alcanzar hasta 2 metros en suelos profundos (Figura 6). En suelos poco profundos, se desarrolla de manera superficial, lo que ocasiona problemas de estabilidad y desarrollo. Las raíces secundarias, localizadas en los primeros 30 cm del suelo, son

responsables de la absorción de agua y nutrientes mediante pelos absorbentes.

Las plantas que nacen de semillas desarrollan una raíz pivotante, mientras que las que provienen de estacas enraizadas presentan un sistema de raíces en forma de abanico. La longitud y forma de la raíz pivotante varían según la estructura del suelo, creciendo recta en suelos granulares y uniformes, y de forma tortuosa en suelos pedregosos (Restrepo-Quiroz & Urrego-Posso, 2018).

Figura 6

Raíz del cacao



Fuente: Microsoft Copilot (2025)

Variedades de cacao

La clasificación del cacao se basa en una combinación de características genéticas, morfológicas y organolépticas. Existen tres variedades principales cada una con sus propias particularidades que se detallan a continuación.

Criollo

El criollo se caracteriza por su tronco erguido, con escasa ramificación lateral, así como un crecimiento vertical predominante (Figura 7). Sus frutos son rugosos con surcos profundos y una cáscara delgada que se rompe fácilmente. Las semillas son grandes, casi redondeadas y de color blanco o rosado en su estado fresco. Aunque apreciado por su alta calidad, el cacao criollo es delicado, altamente susceptible a plagas y enfermedades y de baja productividad (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA], 2017).

Figura 7

Árbol variedad criollo



Fuente: Fotografía tomada por Blanco (2024)

Forastero

El cacao forastero también conocido como cacao amazónico, posee una calidad inferior en cuanto a sabor y aroma, pero presenta otras cualidades valiosas para la industria como un alto rendimiento en contenido de grasa (Figura 8). Este tipo de cacao es vigoroso, con una tendencia a la ramificación lateral y, en algunos casos, un follaje decumbente. Los frutos son lisos, con pocos surcos y una cáscara gruesa. Las semillas son más pequeñas que las del criollo, con granos de color violeta oscuro y mucílago ácido. El chocolate producido con cacao forastero es más amargo y de aroma menos agradable. Este tipo de cacao domina el mercado mundial y se cultiva ampliamente en regiones como Trinidad, Ecuador, África Occidental, Asia y Brasil (IICA, 2017).

Figura 8

Árbol variedad forastero.



Fuente: Fotografía tomada por Blanco (2024)

Trinitario

El cacao trinitario es un híbrido que resulta del cruce entre las variedades criollo y forastero, combinando las mejores características de ambas. El trinitario heredó del criollo su excelente sabor y aroma; y del forastero su vigor y resistencia a plagas y enfermedades (Figura 9). Sus frutos varían en apariencia, pero generalmente presentan una cáscara más gruesa que la del criollo y surcos menos profundos. Las semillas suelen tener una calidad intermedia entre las dos variedades parentales, ofreciendo un balance favorable para la producción de chocolate de alta calidad y se cultiva en diversas regiones, incluyendo América Central, el Caribe y partes de Asia (IICA, 2017).

Figura 9

Árbol variedad forastero.



Fuente: Fotografía tomada por Blanco (2024)

Ciclo fenológico del cacao

El ciclo fenológico del cacao se distingue por una serie de etapas que se desarrollan desde la germinación hasta la cosecha de los

frutos (Tabla 3). La fase inicial involucra la germinación de las semillas, proceso durante el cual las plántulas emergen del suelo y dependen de las reservas nutritivas contenidas en las semillas para iniciar su crecimiento y establecer una base sólida para su posterior desarrollo (Yzarra & López, 2017).

Una vez que las plántulas avanzan a la fase de desarrollo de hojas juveniles, la planta establece una estructura vegetativa inicial. Durante esta etapa, se desarrollan hojas juveniles con pecíolos cortos y estípulas, y se forma un sistema radicular robusto que facilita tanto la absorción de nutrientes como el agua del suelo. La gestión adecuada del dosel y la aplicación de fertilizantes son prácticas agronómicas fundamentales para promover un crecimiento vigoroso y una expansión efectiva del dosel.

En la siguiente fase se forman yemas axilares en las axilas de las hojas juveniles, que desarrollan brotes y ramas contribuyendo a la expansión de la planta. La floración inicia con la aparición de inflorescencias en los brotes axilares y tras la polinización, los frutos comienzan a desarrollarse, continuando su crecimiento en el cual se acumulan almidón y otros compuestos de reserva. Finalmente, los frutos alcanzan su madurez entre 5 y 7 años después de la siembra. En esta etapa, los frutos logran el tamaño y color característicos necesarios para la cosecha manual, marcando el final del ciclo fenológico del cacao (Yzarra & López, 2017).

Tabla 3

Etapas fenológicas durante el ciclo de crecimiento del cultivo de cacao

Etapa Fenológica		Descripción
I.	Germinación	Las semillas germinan y emergen las plántulas.
II.	Desarrollo de hojas juveniles	Las plántulas desarrollan hojas juveniles con pecíolos cortos y estípulas.
III.	Formación de yemas axilares	Se forman yemas axilares en las axilas de las hojas juveniles.
IV.	Crecimiento de brotes	Los brotes crecen a partir de las yemas axilares, formando nuevas hojas y ramas.
V.	Inicio de la floración	Aparecen las primeras inflorescencias en los brotes axilares.

VI.	Floración completa	Las flores se abren y son receptivas a la polinización.
VII.	Fructificación	Las flores polinizadas comienzan a desarrollar frutos.
VIII.	Desarrollo del fruto	Los frutos crecen y maduran.
IX.	Madurez del fruto	Los frutos alcanzan su madurez fisiológica y están listos para la cosecha.
X.	Cosecha	Las mazorcas maduras se cosechan manualmente.

Fuente: Elaboración propia basado en Yzarra & López (2017)

Composición nutricional del cacao (*Theobroma cacao* L.)

El cacao es una fuente rica de diversos nutrientes esenciales que contribuyen tanto a su valor económico como a sus beneficios para la salud. Las semillas de cacao, el componente de mayor importancia económica de la planta, contienen una variedad de nutrientes que no solo determinan las propiedades organolépticas del cacao y sus derivados, sino que también contribuyen a su perfil nutricional y beneficios para la salud (Negaresh & Marín, 2013). La composición nutricional del cacao incluye lípidos, proteínas, carbohidratos, alcaloides y compuestos fenólicos, que se detallan a continuación (Tabla 4).

Tabla 4
Composición nutricional del cacao

Componente	Porcentaje (%)	Descripción
Lípidos	50-57% peso seco	Principalmente ácidos grasos saturados (60%), monoinsaturados (35%) y poliinsaturados (5%).
Proteínas	17,5% peso seco	Segundo componente más abundante en el grano de cacao.
Carbohidratos	10-15% estado fresco	Contiene glucosa, fructosa y sacarosa en la pulpa; fermentación modifica el contenido de azúcares.
Teobromina	1,2% peso seco	Principal alcaloide presente, aporta propiedades estimulantes.
Cafeína	0,2% peso seco	Presente en menor cantidad, también con propiedades estimulantes.
Compuestos fenólicos	-	Incluyen catequinas, proantocianidinas y antocianos, conocidos por sus propiedades antioxidantes.

Fuente: Elaboración propia basado en Negaresh & Marín (2013)

A man wearing a straw hat and a dark apron over a light shirt is working in a cacao field. He is using a wooden tool to handle large, red, ribbed cacao pods that are piled up in a wooden tray. The field is filled with rows of cacao plants, and the background shows a lush, hilly landscape with palm trees and a large tree on the left. The scene is bathed in the warm, golden light of a sunrise or sunset.

CAPÍTULO II

Aspectos agronómicos del cacao



Aspectos agronómicos del cacao

Aspectos agronómicos

Condiciones agroecológicas para la producción de cacao

El crecimiento, desarrollo y rendimiento óptimos del cacao están intrínsecamente ligados a las condiciones ambientales del área de cultivo. Los factores climáticos poseen un papel significativo en la producción, siendo esenciales unas condiciones térmicas y de humedad adecuadas debido a que depende del clima para sus fases vegetativas tales como la floración, brotación y cosecha.

En este sentido, el cultivo se desarrolla óptimamente en climas tropicales, caracterizados por temperaturas constantes a lo largo del año. La temperatura ideal para el crecimiento del cacao se encuentra entre 20 °C y 30 °C. Las inferiores a 15 °C o superiores a 35 °C afectan negativamente el desarrollo del árbol y reducen la producción de frutos. El cacao es sensible a las heladas, causando daños severos a las hojas y flores. La humedad relativa es importante y los niveles ideales oscilan entre 70% y 90% el cual favorece la floración y el desarrollo de los frutos, además de reducir la ocurrencia de enfermedades bacterianas y fúngicas (Jaimes-Suárez et al., 2022).

En cuanto a la precipitación, el cacao demanda un régimen pluvial abundante, con lluvias anuales que varían entre 1.500 mm y 2.500

mm. Es importante que la distribución de las precipitaciones sea relativamente uniforme durante todo el año para evitar períodos prolongados de sequía o exceso de humedad, ambos perjudiciales para el cultivo (IICA, 2017).

Se cultiva generalmente en altitudes que varían entre 200 y 1.200 metros sobre el nivel del mar, sin embargo, la altitud óptima varía según la variedad y las condiciones climáticas locales. En regiones de baja altitud, es susceptible a enfermedades como la moniliasis y la pudrición de la vaina, mientras que, en altitudes más altas, las temperaturas más frescas limitan el crecimiento y la producción. En regiones montañosas es esencial considerar la exposición al viento y la erosión del suelo, ya que afectan la estabilidad y el rendimiento del cultivo. En zonas con altitudes superiores a 800 metros, las temperaturas más bajas y la reducción en la disponibilidad de oxígeno influyen en el crecimiento de las plantas, al igual que en la calidad de los frutos (IICA, 2017; Jaimes-Suárez et al., 2022).

Los suelos ideales deben tener un buen drenaje para evitar el encharcamiento, dado que provoca enfermedades radiculares y afectar la salud del árbol. Un nivel apropiado de materia orgánica es esencial para asegurar una buena fertilidad y disponibilidad de nutrientes (Figura 10). El pH debe estar en un rango ligeramente ácido a neutro, entre 5,0 y 7,0. Suelos con pH fuera de este rango afectan la disponibilidad de nutrientes esenciales y la salud de las plantas.

La textura del suelo también juega un papel importante; los suelos franco-arcillosos son preferidos por su capacidad para mantener humedad y nutrientes mientras permiten un buen drenaje. Asimismo, los suelos arenosos necesitan enmiendas para optimizar su capacidad de retener agua y nutrientes (IICA, 2017; Jaimes-Suárez et al., 2022).

Figura 10

*Suelo apto para el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.).*



Fuente: Fotografía capturada por los autores (2024)

Regiones aptas para el cultivo de cacao en Colombia

En Colombia, el cultivo de cacao se desarrolla en varias zonas con características específicas que favorecen su crecimiento. Estas regiones presentan condiciones climáticas y edáficas particulares que hacen posible la producción exitosa de cacao (Sacristán & Rojas, 2009) (Ver Tabla 5).

Las regiones de los valles interandinos secos se caracterizan por tener precipitaciones inferiores a 1.500 mm y una altitud inferior a 900 metros sobre el nivel del mar, con una topografía predominantemente plana. Los suelos en estas áreas son generalmente francos, profundos y planos, lo que facilita el cultivo de cacao con riego suplementario (Sacristán & Rojas, 2009).

Por otro lado, la región andina abarca las zonas montañosas de las cordilleras, con altitudes que oscilan entre los 900 y 1.200 metros sobre el nivel del mar. El clima en esta región es moderado, con precipitaciones anuales entre 1.800 y 2.200 mm y temperaturas medias que oscilan entre 23 y 27 grados Celsius. Los suelos son profundos y bien drenados, con una topografía inclinada (Sacristán & Rojas, 2009)

La montaña santandereana incluye los departamentos de Santander y Norte de Santander, con precipitaciones que varían entre 1.500 y 2.000 mm distribuidas a lo largo del año. Las altitudes en esta zona fluctúan entre los 500 y 1.000 metros sobre el nivel del mar. Los suelos son generalmente arcillosos, con una fertilidad que varía de media a baja y una topografía quebrada (Sacristán & Rojas, 2009)

Finalmente, las zonas de bosque húmedo tropical se caracterizan por una alta precipitación anual superior a 2.500 mm, temperaturas medias anuales entre 27 y 30 grados Celsius, y altitudes que no excedan los 500 metros sobre el nivel del mar. Los suelos en estas áreas son francos, profundos y planos (Sacristán & Rojas, 2009).

Tabla 5
Regiones aptas para el cultivo de cacao en Colombia

Región	Altitud (m.s.n.m.)	Precipitación Anual (mm)	Temperatura Media (°C)	Características del suelo	Topografía
Valles interandinos secos	< 900	< 1.500	-	Francos, profundos	Plana
Región Andina	900-1.200	1.800-2.200	23-27	Profundos, bien drenados	Inclinada
Montaña santandereana	500-1.000	1.500-2.000	-	Arcillosos, fertilidad media a baja	Quebrada
Bosque húmedo tropical	< 500	> 2.500	27-30	Francos, profundos	Plana

Fuente: Elaboración propia a partir de datos tomados de Sacristán & Rojas (2009)

Enfermedades y plagas asociadas al cultivo de cacao

El cultivo de cacao es susceptible a una variedad de enfermedades que impactan su salud y productividad, causadas por diversos patógenos, incluyendo hongos, bacterias y virus, los cuales afectan diferentes partes de la planta, desde los frutos hasta las raíces. (Figura 11). A continuación, se detallan algunas de las enfermedades más comunes que afectan al cacao (Tabla 6), incluyendo sus nombres comunes y científicos, así como los síntomas asociados a cada una de ellas (Aguilar et al., 2013; Jaimes-Suárez, et al., 2022).

Tabla 6
Enfermedades asociadas al cultivo de cacao

Nombre común	Nombre científico	Síntomas
Monilia	<i>Moniliophthora roreri</i>	Pudrición acuosa de los frutos, manchas necróticas, esporulación en frutos enfermos.
Escoba de bruja	<i>Crinipellis perniciosao</i>	Marchitamiento de las hojas, obstrucción de los vasos conductores, muerte súbita del árbol.
Mazorca negra	Phytophthora sp. Phytophthora palmivora	Manchas pardas en los frutos, micelio pulverulento.
Llaga estrellada	Rosellinia sp.	Afecta el sistema radical, causando marchitez y muerte del árbol.
Mal del machete	<i>Ceratocystis fimbriata</i>	Marchitamiento de las hojas, obstrucción de los vasos conductores, muerte súbita del árbol.
Mal rosado	Corticium sp. Verticillium sp.	Decoloración de hojas, marchitez y descomposición.

Fuente: Elaboración propia basado en Aguilar et al. (2013); Jaimes- Suárez, et al. (2022)

Figura 11

Enfermedad mazorca negra (Phytophthora sp.; Phytophthora palmivora).



Fuente: Microsoft Copilot (2025)

Además de las enfermedades, el cacao enfrenta amenazas significativas debido a diversas plagas (Tabla 7), que incluyen insectos, ácaros y nematodos, que atacan diferentes partes del cacao, desde hojas y brotes hasta vainas y raíces. Los daños se manifiestan en forma de deformaciones, agujeros y debilitamiento general de la planta (Figura 12). De igual manera que con las enfermedades, el control adecuado de las plagas es crucial para minimizar los daños y mantener la productividad del cultivo.

Tabla 7
Plagas asociadas al cultivo de cacao

Nombre común	Nombre científico	Síntomas asociados
Cochinilla del cacao	<i>Pseudococcus spp</i>	Presencia de secreciones cerosas blancas, hojas pegajosas, reducción en la producción y calidad de los frutos.
Mosca blanca	<i>Bemisia tabaci</i>	Amarillamiento de hojas, debilitamiento de la planta, secreción de mielada que lleva al crecimiento de hongos.
Trips	<i>Frankliniella spp.</i>	Manchas plateadas en hojas, distorsión de las hojas y crecimiento reducido.
Barrenador de vainas	<i>Conopomorpha cramerella</i>	Agujeros en las vainas, infestación interna de los frutos, disminución de la calidad del grano.
Ácaro rojo	<i>Tetranychus spp.</i>	Puntos pequeños y decoloración en hojas, debilitamiento de la planta y caída prematura de hojas.
Nematodo de la raíz	<i>Meloidogyne spp.</i>	Hinchazón y deformación de raíces, reducción en el crecimiento y desarrollo de la planta.
Barrenador de Tallos	<i>Sahlbergella singularis</i>	Muerte de plantitas jóvenes, galerías internas formadas por las larvas que se alimentan de la corteza.
Escarabajo Escolítido	<i>Hypomecis spp.</i>	Insectos perforadores que atacan el tronco del cacao, daño asociado con la enfermedad conocida como Mal de machete.
Áfidos (Chupadores)	<i>Toxoptera aurantii</i>	Colonias en brotes, hojas, flores y frutos jóvenes, causando deformaciones y debilitamiento de las plantas.

Fuente: Elaboración propia basado en Aguilar et al. (2013); Jaimes-Suárez et al. (2022)

Figura 12

Plaga mosca blanca (*Bemisia tabaci*)



Fuente: Microsoft Copilot (2025)

Manejo agronómico del cultivo de cacao

El manejo agronómico de la plantación de cacao (*Theobroma cacao* L.) comprende una serie de prácticas técnicas y científicas que buscan optimizar el desarrollo, crecimiento, así como el rendimiento de las plantas; mientras aseguran la salud del ecosistema y la estabilidad económica de los productores. Este apartado aborda las principales estrategias de manejo, incluyendo

el control de malezas, la fertilización, la poda y la regulación de sombra, todas ellas fundamentales para un cultivo exitoso (IICA, 2017).

Control de malezas

Las malezas representan una competencia directa para las plantas de cacao en términos de nutrientes, agua, luz y espacio. Además, actúa como reservorios de plagas y enfermedades, incrementando la presión fitosanitaria sobre el cultivo. Un manejo adecuado de malezas es fundamental desde la fase de establecimiento de la plantación hasta su madurez, asegurando un ambiente óptimo para el desarrollo del cacao. Entre las diferentes técnicas se encuentran:

Control mecánico

El control mecánico incluye prácticas como el deshierbe manual y el uso de herramientas agrícolas (machetes, guadañas, etc.). Este método es particularmente efectivo en las etapas iniciales de crecimiento, minimizando el riesgo de daño a las plantas jóvenes. La periodicidad de estas labores debe ser alta para evitar la competencia por recursos vitales en los primeros meses de establecimiento del cultivo.

Control químico

El uso de herbicidas es un recurso complementario en el manejo de malezas, especialmente en plantaciones de mayor extensión. La aplicación debe ser cuidadosa, evitando el contacto directo con las plantas de cacao, especialmente en sus fases juveniles. Es recomendable el uso de herbicidas selectivos y la implementación de protectores plásticos para minimizar el riesgo de fitotoxicidad.

Control biológico

El control biológico consiste en emplear enemigos naturales, como depredadores, parasitoides y microorganismos benéficos. Esta estrategia sostenible y efectiva para el control de plagas

permite la reducción del uso de productos químicos y promueve un equilibrio ecológico dentro de la plantación.

Fertilización

La fertilización del cacao es una práctica clave para cubrir las demandas nutricionales de las plantas, lo que se traduce en un crecimiento saludable y una producción óptima. La estrategia de fertilización debe estar basada en análisis de suelo y foliar, que determinen las deficiencias específicas de nutrientes.

Nutrientes esenciales

Los principales nutrientes requeridos por el cacao incluyen nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Adicionalmente, los micronutrientes como magnesio (Mg), calcio (Ca), zinc (Zn), y boro (B) juegan roles críticos en el metabolismo de las plantas. La aplicación de fertilizantes debe ser fraccionada a lo largo del ciclo fenológico del cultivo para maximizar la eficiencia en la absorción de nutrientes.

Poda

Es una práctica esencial para la gestión del dosel del cacao, favoreciendo una estructura óptima que mejora la penetración de luz y aire, y reduce la incidencia de enfermedades. Entre los principales tipos de poda se encuentran:

Poda de formación. Se realiza durante los primeros años del cultivo para desarrollar una estructura fuerte y equilibrada. Esta poda establece la arquitectura básica del árbol, favoreciendo un tronco principal robusto y ramas secundarias bien distribuidas.

Poda de mantenimiento. Es una práctica continua que se lleva a cabo para eliminar ramas muertas, enfermas o improductivas. También incluye el desbrote y el aclarado de la copa para mejorar la aireación y la luz solar.

Poda de renovación. Aplicada en árboles envejecidos o menos productivos; esta poda busca rejuvenecer la planta, estimulando

el crecimiento de nuevas ramas productivas y prolongando la vida útil de la plantación.

Regulación de sombra

El cacao es una planta que prospera bajo sombra parcial, lo que reduce el estrés hídrico y térmico y mejora la eficiencia del uso de recursos. Un manejo adecuado de la sombra es esencial para crear un microclima favorable para el desarrollo del cultivo. Los diferentes sistemas de sombra se describen a continuación:

Sombra temporal. Durante los primeros años, se utilizan plantas de rápido crecimiento como plátano o banano para proporcionar sombra temporal. Estas plantas también aportan beneficios adicionales como la producción de biomasa y el control de malezas.

Sombra permanente. En la etapa de madurez, se establecen árboles de sombra permanente como especies maderables (*Erythrina* spp., *Gliricidia sepium*) que proporcionan un microclima estable. Estos árboles deben manejarse mediante podas regulares para evitar una sombra excesiva que podría perjudicar la productividad del cacao.

Estrategias de manejo integrado de plagas y enfermedades

El manejo de plagas y enfermedades es fundamental para mantener la salud del cultivo de cacao. Las estrategias de manejo integrado incluyen el monitoreo constante, el uso de controles biológicos y, cuando sea necesario, la aplicación de productos químicos de manera dirigida y responsable.

Control biológico

El uso de enemigos naturales como depredadores y parasitoides, es una estrategia sostenible que reduce la dependencia de productos químicos y promueve un equilibrio ecológico dentro de la plantación.

Control químico

Cuando el nivel de infestación supera los umbrales económicos, se justifica el uso de pesticidas. Se deben seleccionar productos específicos y aplicarlos de manera dirigida para minimizar el impacto ambiental y prevenir la resistencia.

Propagación del cacao

La propagación del cacao (*Theobroma cacao* L.) juega un papel importante en su producción, afectando tanto el ámbito económico como el agronómico. Más bien, la calidad, así como la cantidad de las cosechas, están estrechamente ligadas a las prácticas de propagación utilizadas, y la elección de métodos efectivos y eficientes mejoran significativamente los rendimientos.

La experiencia de países como Ghana y Costa de Marfil demuestra que la introducción de variedades mejoradas ha permitido a los agricultores incrementar su producción y fortalecer su seguridad económica, lo que resalta la importancia de destinar recursos a la investigación y el desarrollo en este ámbito. Al adoptar estas prácticas, se busca no solo optimizar la producción de cacao, sino también contribuir al bienestar de los productores y fomentar un sistema agrícola más resiliente y sostenible (Jagoret et al., 2020).

Desde el punto de vista agronómico, la selección de métodos de propagación adecuados permite que las plantas exhiban características deseadas, como resistencia a enfermedades, alta productividad y calidad del grano (Andrade-Sodré, & Sena-Gomes, 2019), así como optimiza la uniformidad en las plantaciones, lo que es fundamental para una producción constante y predecible. Tanto la propagación sexual como la asexual permiten la reproducción de plantas con atributos específicos, lo que resulta elemental para mantener la homogeneidad y maximizar el rendimiento.

Además, impactan directamente en la gestión de recursos, facilitando la adaptación de las plantas a diversas condiciones

ambientales. La capacidad de propagar variedades que se ajusten a distintos tipos de suelos y climas contribuye a la resiliencia de las plantaciones frente a cambios ambientales y fortalece la sostenibilidad del cultivo. Este enfoque es particularmente relevante en el contexto actual, donde la adaptación a condiciones adversas se ha vuelto fundamental para garantizar la viabilidad económica de los productores (Pretty, 2008).

Al promover la producción en áreas ya deforestadas y reducir la necesidad de nuevas tierras para el cultivo, se protege la biodiversidad y se preservan los ecosistemas vitales. En este sentido, una propagación eficiente se transforma en un elemento clave para avanzar hacia una agricultura más sostenible, que equilibre la rentabilidad económica con la responsabilidad ambiental. Es así como entre las diferentes técnicas de propagación del cacao se encuentran:

Propagación sexual

La propagación sexual del cacao es un proceso que implica el desarrollo de nuevas plantas a partir de embriones formados por la fecundación. Este método, aunque es tradicional y ampliamente utilizado, resulta en plantas con una considerable variabilidad genética debido a la polinización cruzada entre diferentes progenitores. (Gárate-Navarro et al., 2020).

El proceso comienza con la selección de la planta madre, que debe ser genéticamente superior, presentando características agronómicas deseables como resistencia a plagas y enfermedades, además de un buen rendimiento y calidad del fruto. Esta selección es crucial, dado que las características de la planta madre afectan la calidad de las semillas generadas.

A continuación, se procede a la selección del fruto, donde se escogen las mazorcas maduras- pero no excesivamente- ya que un exceso de madurez lleva al desarrollo de la radícula afectando la viabilidad de la semilla. Dentro de la mazorca, se seleccionan

las semillas del tercio medio, pues estas suelen ser más uniformes y vigorosas en comparación con las del tercio superior o inferior (Gárate et al., 2020).

Estas semillas deben plantarse lo más pronto posible para asegurar su viabilidad, ya que poseen una vida útil relativamente corta. Este proceso, aunque sencillo y de fácil implementación, tiene la desventaja de requerir más tiempo para que las plantas alcancen la madurez productiva. Además, la variabilidad genética resultante conlleva a diferencias significativas en las características de las plantas, lo cual representa un desafío en la gestión del cultivo.

Entre las ventajas de la propagación sexual se encuentra la facilidad de producción y el hecho de que las plantas resultantes suelen tener una arquitectura manejable, lo que facilita las labores agronómicas. Sin embargo, las desventajas incluyen el mayor tiempo necesario para que las plantas empiecen a producir y la variabilidad genética entre las plantas, lo que resulta en un cultivo menos uniforme y más difícil de gestionar a gran escala.

Propagación asexual

La propagación asexual, particularmente a través de técnicas como la injertación, permite la unión física de dos plantas diferentes para formar un organismo único, combinando características deseables en una sola planta. La parte inferior -el portainjerto- proporciona la raíz y el sistema de soporte, mientras que la parte superior -el injerto- proporciona el tallo, las hojas y las flores. Esta unión incrementa la resistencia a enfermedades y condiciones climáticas extremas, así como mejora la producción del cultivo (Mudge et al., 2009).

Es así como esta técnica es comúnmente utilizada en la producción de cacao para mantener la pureza genética de las plantas madre. Este proceso implica unir una yema de una planta madre, que posee características genéticas deseables, con un plantón. La selección del patrón -la planta sobre la cual se injertará la yema-

es importante, ya que debe ser compatible con la variedad a injertar y tener una tolerancia adecuada a condiciones adversas como sequía o enfermedades (Gárate et al., 2020).

La obtención de varas yemeras es otro paso esencial. Estas varas, que contienen las yemas a injertar, deben ser recolectadas en la mañana; de ramas con hojas adultas y sin yemas florales para asegurar que sean vigorosas y con alto potencial de crecimiento. Después de la recolección, deben ser preparadas y transportadas adecuadamente para mantener su frescura y viabilidad, incluyendo su desinfección para prevenir infecciones (Gárate et al., 2020).

Entre los métodos de injertación más utilizados en el cacao se destacan:

Injerto de púa central

Es una técnica de injertación recomendada por la Compañía Nacional de Chocolates para el cultivo de cacao en viveros. Este método requiere que el diámetro del patrón sea equivalente al del porta-yemas o varetas a utilizar. Para llevar a cabo este injerto, se debe realizar un corte en ángulo recto y de manera limpia en relación con el eje principal del patrón (Figura 13). A continuación, se hace una abertura vertical en el centro del patrón (Gárate et al., 2020).

En la base de la yema terminal, se deben realizar dos cortes lisos y del mismo tamaño en los laterales, formando una cuña alargada permitiendo que ésta encaje perfectamente en la abertura del patrón. Después de colocar la yema, es fundamental asegurarla firmemente para mantener el contacto entre las partes mientras se desarrolla el callo. Se recomienda cubrir el injerto con una bolsa plástica para mantener una humedad constante. Este tipo de injerto se lleva a cabo a partir de los dos meses de edad de la plántula, aunque el éxito del proceso también depende de la destreza del injertador.

El injerto de púa central permite obtener plántulas con un desarrollo óptimo, listas para ser trasladadas al campo en poco tiempo, y favorece una formación más adecuada de la copa en el lugar definitivo.

Figura 13
Injerto de púa



Fuente: Microsoft Copilot (2025)

Injerto en leño grueso o lateral (Método Malayo)

El injerto en leño grueso, también conocido como injerto lateral o método Malayo, es comúnmente utilizado para rehabilitar cultivos de cacao que resultan improductivos o no se han adaptado

adecuadamente a las condiciones agroclimáticas. Para llevar a cabo este injerto, es necesario seguir las recomendaciones y procedimientos indicados de acuerdo con Aldana-García (2001):

Selección de materiales. Utilizar ramas porta-yemas vigorosas y bien desarrolladas. Preparar los insumos necesarios como cordón para amarre, bolsas plásticas o vinipel y un machete modificado o una navaja afilada, así como productos para la desinfección de las herramientas.

Preparación del patrón. Seleccionar una parte del árbol que sea lisa y tenga pocas protuberancias. Realizar un corte horizontal a una altura de entre 40 y 60 centímetros del suelo. Posteriormente, a 7-10 cm por encima del corte horizontal se debe efectuar un corte inclinado en forma de “U” invertida, creando de esta forma una ventana superior al corte inicial.

Observar el cambium. La superficie expuesta debe ser visible y presentar un brillo característico, señal de una buena circulación de savia. Luego, realizar uno o dos cortes verticales descendentes desde el corte horizontal, procurando que lleguen hasta el cambium.

Preparación de la vareta. Seleccionar una vareta o rama porta-yemas con al menos dos o tres yemas viables. Realizar cortes biselados en ambos extremos de esta; en el lado más oscuro, los cortes deben ser más superficiales, mientras que, en el lado más claro, hacer un corte más profundo y recortar los peciolo a la mitad.

Realización del injerto. Usar la parte plana de la navaja o espátula para levantar la corteza en los cortes verticales del patrón. Introducir la vareta, asegurándose de que el corte profundo quede hacia adentro. Amarrar firmemente el injerto para asegurar su contacto con el patrón y cubrir completamente con una bolsa plástica o vinipel, que debe cubrir al menos 10 centímetros por debajo y por encima del injerto.

Post-injerto. Aproximadamente 20 días después, retirar la bolsa y verificar el anclaje del injerto. Una vez que éste muestra un buen desarrollo, se retira el cordón. Tres meses después se debe verificar un crecimiento apropiado de la copa y proceder con el despatronado. Para ello, realizar un corte en bisel en el lado opuesto al injerto y asegurar correctamente la impermeabilización, cortando al nivel del injerto.

Injerto de parche

Realizado en vivero; es una técnica especializada para asegurar la calidad y uniformidad genética de las plántulas de cacao. Este método implica colocar una sola yema de una vareta o rama seleccionada sobre el patrón. Para llevar a cabo el injerto, primero se realiza un corte horizontal en la corteza del patrón, creando una forma “U” invertida (Gárate et al., 2020).

Esta corteza se levanta para crear una cavidad adecuada. En la vareta o rama porta-yemas, se efectúan cortes alrededor de la yema con el mismo ancho y largo que el corte realizado en el patrón. La yema se desprende y se coloca en la herida del patrón, eliminando la corteza sobrante para garantizar un buen contacto. Tras la inserción, se fija la yema con cinta plástica. El injerto se coloca entre 10 a 15 centímetros del suelo, y es necesario llevar a cabo un despunte en el patrón, dejando entre 3 a 4 hojas funcionales para promover un buen desarrollo del injerto. Este método, conocido por su precisión, favorece una integración adecuada entre el injerto y el patrón; facilitando una rápida cicatrización y un crecimiento uniforme.

El injerto de aproximación

Igualmente, conocido como “pechito con pechito,” es una técnica utilizada para implantar una vareta o rama porta-yemas lateralmente sobre un patrón en el campo definitivo. Este método se realiza en patrones de cacao que tengan entre 6 y 12 meses del trasplante (Gárate et al., 2020).

Para iniciar el proceso, se selecciona una vareta con 2 a 3 yemas viables y se le realizan cortes biselados en ambos extremos por el lado más oscuro. En el patrón, se hace un corte horizontal y dos verticales que coinciden con el ancho y largo de la vareta. En la rama porta-yemas, se raspa el lado más claro para quitar la corteza y parte del cambium, acercándose al centro de la yema. Luego, se usa la parte plana de una navaja para levantar la corteza y colocar la vareta en el patrón. Se retira aproximadamente tres cuartos de la corteza levantada y se asegura el injerto envolviéndolo firmemente con vinipel.

Este método se deja en su lugar durante unos 20 días, después de los cuales se revisa el prendimiento del injerto. El despunte se realiza una vez que se ha verificado el éxito del injerto. Finalmente, cuando éste presenta hojas maduras funcionales, se procede a eliminar el patrón; realizando el corte en bisel lo más cerca posible del injerto.

Además de la injertación, otras técnicas de propagación asexual incluyen el enraizamiento de ramillas, donde se emplean ramas de la planta madre para generar nuevos individuos, y los acodos aéreos, que inducen la formación de raíces en una rama aún unida a la planta. Estas técnicas permiten obtener ejemplares con las mismas características genéticas del material original, garantizando la uniformidad del cultivo.

De igual forma, existen técnicas como el cultivo in vitro que utiliza métodos como la embriogénesis somática y el microinjerto para multiplicar clones de cacao en un ambiente controlado. De hecho, permite la producción masiva de plantas a partir de una cantidad mínima de material vegetal, siendo altamente eficiente para la conservación y mejoramiento de recursos genéticos, así como para la producción de plantas libres de enfermedades. Entre ellos existen varios procesos, tales como la micropropagación, la organogénesis y la embriogénesis somática, cada uno con aplicaciones específicas y ventajas para la agricultura moderna (Maximova et al., 2002).

En este contexto la micropropagación se basa en el cultivo de tejidos vegetales en un medio de cultivo estéril. Este método permite la multiplicación rápida y eficiente de plantas de cacao, asegurando la uniformidad genética y sanitaria de las plántulas producidas. Es particularmente útil para la clonación de genotipos élite y la producción de plantas en grandes cantidades.

La organogénesis es otro enfoque, donde se induce la formación de órganos específicos como brotes y raíces a partir de células o tejidos vegetales. En el cacao, este proceso se inicia a partir de diferentes tipos de explantes, incluidos los cotiledones, hipocotilos y hojas jóvenes. Según Li et al. (1998), la organogénesis en cacao se optimiza mediante la manipulación de la concentración y el tipo de reguladores de crecimiento en el medio de cultivo.

Por su parte, la embriogénesis somática es una técnica en la que las células no reproductivas se convierten en embriones somáticos que se desarrollan en plantas completas. Este proceso es altamente eficiente para la producción masiva de plantas de cacao y tiene un gran potencial para el mejoramiento genético (Calderón-Acuña & Montes, 2017).

En efecto, la propagación in vitro del cacao ofrece varias ventajas significativas sobre los métodos tradicionales de propagación. Una de las principales ventajas es la capacidad de producir plantas libres de enfermedades, lo cual es fundamental para la sostenibilidad de la producción de cacao. Además, permite la clonación de genotipos superiores, asegurando la uniformidad de las características deseables como la resistencia a enfermedades y la alta productividad (Lázaro et al., 2015).

La propagación in vitro es igualmente una herramienta valiosa para la conservación de germoplasma, permitiendo la preservación de variedades raras o en peligro de extinción. Sin embargo, presenta desafíos ya que requiere un conocimiento y práctica considerables para llevar a cabo las técnicas de manera efectiva y, el proceso en sí mismo, demanda un mayor cuidado.



CAPÍTULO III

Fundamentos en la injertación de cacao



Fundamentos en la injertación de cacao

Interacción patrón-variedad en cacao injertado

Los mecanismos de comunicación entre el patrón y la variedad en el injerto de cacao (*Theobroma cacao* L.), se fundamentan en una técnica agrícola tradicional que combina partes de dos plantas para generar un nuevo individuo con características beneficiosas de ambas. El éxito del injerto depende de factores como la compatibilidad genética y fisiológica, la presencia de patógenos o metabolitos nocivos, la edad de la planta, las condiciones ambientales y la técnica utilizada.

El análisis de los mecanismos moleculares involucrados en el éxito de la formación de un injerto, muestra que la herida en las partes en contacto puede provocar una respuesta hipersensible, llevando a la producción de sustancias como suberina, lignina, calosa y compuestos fenólicos. Estas sustancias pueden dificultar una unión efectiva y causar injertos disfuncionales. La conexión vascular es esencial para la supervivencia a largo plazo (Gallego, 2022).

Componentes de un micro injerto según Espíndola, 2021 (Figura 14):

Variedad o injerto. Ubicada más arriba del punto de unión, con el propósito de desarrollar la copa.

Soldadura/Callo. Zona de unión entre variedad y patrón, generada por el cambium y compuesta por haces vasculares para el intercambio de nutrientes.

Patrón, pie o portainjerto. Suministra el sistema radicular, proveniente de cepas madre resistentes a plagas y enfermedades radiculares.

Tipos de micro injertos utilizados para estudiar la comunicación entre variedad y patrón (Thomas & Frank, 2019):

Autoinjerto. Dos partes de la misma planta.

Hetero injerto. Partes de plantas de la misma especie.

Interespecífico. Partes de plantas de diferentes especies.

Genéticos. Partes de mutantes de la misma especie.

Transgénicos. Partes de plantas transgénicas de la misma especie.

Figura 14

Micro injertación en una planta perenne.



Fuente: Elaboración propia (2024)

La injertación: Un mecanismo de transferencia horizontal de genes durante la evolución

Generalmente se cree que, en el mecanismo de injertación, el donante y el receptor mantienen su integridad genética, es decir, que los tejidos injertados se unen, pero sus materiales genéticos no se mezclan. Stegemann y Bock (2019), describieron cómo injertaron plantas de tabaco de dos líneas transgénicas que llevaban diferentes genes marcadores y reporteros en diferentes compartimentos celulares, el núcleo y el plástido. El análisis de los sitios de injerto reveló la frecuente presencia de células con ambas resistencias a antibióticos y ambos reporteros fluorescentes.

Los resultados demostraron que el injerto de plantas puede resultar en el intercambio de información genética, a través de grandes fragmentos de ADN o genomas completos de plástidos. Esta observación de nuevas combinaciones de material genético tiene implicaciones para las técnicas de injerto y también proporciona una posible vía para la transferencia horizontal de genes.

Algunos ejemplos de mecanismos de comunicación en la planta

El fotoperiodo

Dentro del reino vegetal, uno de los ejemplos destacados de mecanismos de comunicación es el fotoperiodo. Este fenómeno se refiere a la forma en que la fisiología o desarrollo de una planta responde a la duración del día. El fotoperiodo controla el momento en el que ciertas especies de plantas florecen, permitiendo que lo hagan solo en momentos específicos del año, por ejemplo, el cultivo de café se clasifica como de fotoperiodo corto, la caña de azúcar como de fotoperiodo largo y la palma de aceite como una planta con un fotoperiodo neutral.

Uno de los descubrimientos relevantes en este campo es el florigen, una sustancia que desencadena la floración en las plantas, cuyo conocimiento data de 1930. La técnica de microinjerto ha revelado la función del florigeno Flowering Locus T (FT), una proteína crucial en el proceso de floración, y cómo las membranas lipídicas intracelulares regulan su transporte para influir en el momento de la floración (Thomas & Frank, 2019).

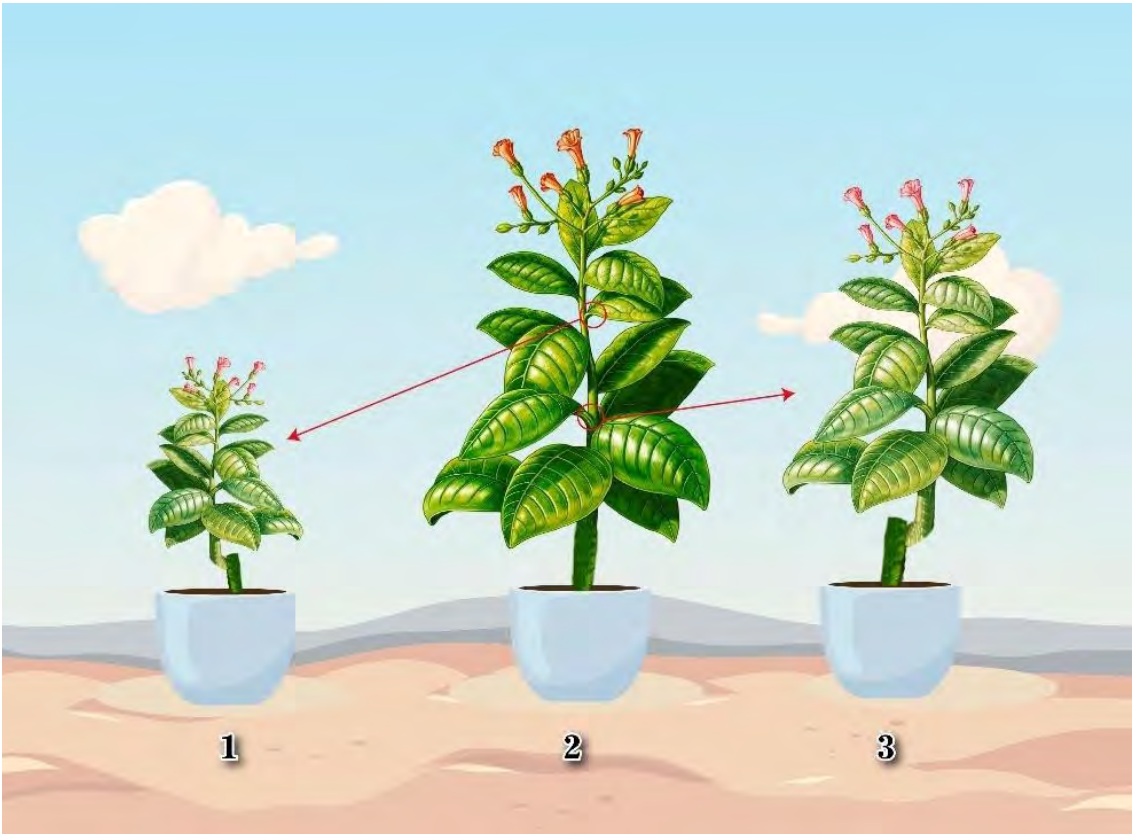
A través de estudios con la planta modelo *Arabidopsis thaliana*, se ha demostrado que el FT se liga al fosfolípido fosfatidilglicerol en las yemas apicales, donde se retiene en compartimentos membranosos dentro de las células del floema a bajas temperaturas. Esta interacción retrasa la floración en condiciones frías. La liberación del FT se facilita a temperaturas más elevadas, permitiendo así su liberación por activación genética para desencadenar la transición de tejido vegetativo a reproductivo y promover la floración. La producción del FT está influenciada por la luz (acumulación de horas de luz), se genera en hojas maduras en respuesta al fotoperiodo y es una proteína pequeña transportada a las yemas apicales.

La inducción de la floración resulta en la formación de las flores en el ápice del brote. En *Arabidopsis thaliana*, la especificación de las flores y el patrón de la inflorescencia son ampliamente regulados por la interacción entre los genes *flor terminal*, *frondosa* y *apetala1/coliflor*.

Un ejemplo adicional que destaca la importancia del entorno en la floración es el cultivo de tabaco (Figura 15). Bajo condiciones uniformes, produce cierto número de nudos antes de formar una flor terminal. Los brotes axilares debajo de la inflorescencia suelen estar inactivos, pero este comportamiento cambia rápidamente bajo ciertas circunstancias como el injerto, enraizamiento o decapitación de la planta. El injerto de brotes entre plantas puede provocar variaciones en la floración, reflejando la influencia de factores ambientales en este proceso.

Figura 15

Ensayo de injerto para determinación floral en Nicotiana tabacum.



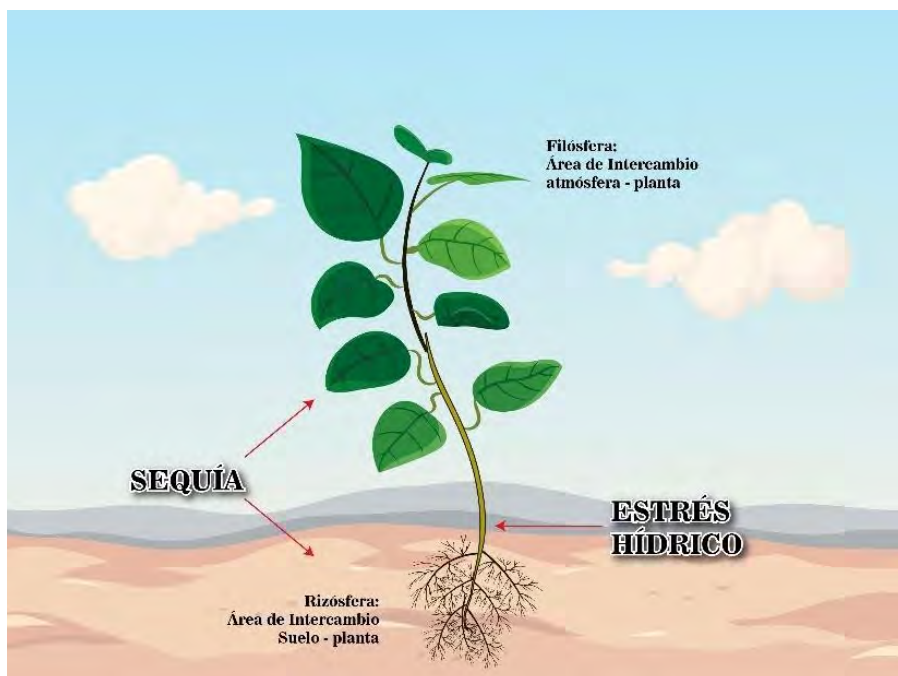
Fuente: Elaboración propia con elementos prediseñados, utilizando CorelDRAW (2024).

Estrés hídrico

El estrés hídrico es una de las principales causas de muerte en las plantas de cacao al ser una planta C3 y umbrofila, y se produce cuando la pérdida por transpiración es mayor que la tasa de absorción de agua (Figura 16). Esto provoca un desequilibrio entre la transpiración y la absorción de agua, lo que afecta el crecimiento y la producción de los cultivos. Las plantas no pueden transportar los nutrientes de la raíz a las hojas, lo que afecta su capacidad para resistir enfermedades y plagas.

Figura 16

Planta bajo estrés hídrico.



Fuente: Elaboración propia con elementos prediseñados, utilizando CorelDRAW (2024).

Una sustancia conocida como Cle (Clavata 3 / embryo-surrounding region-related) péptidos se produce en las raíces de *Arabidopsis thaliana*; específicamente se ha identificado el CLE25 en las raíces. El CLE25 se desplaza hacia las hojas a través del xilema, lo que desencadena en las hojas la síntesis de ABA (Ácido abscísico).

Estos péptidos CLE modulan la señalización de respuesta al estrés por deshidratación a larga distancia, estimulando la expresión de Ninecis-Epoxicarotenoid Dioxygenase 3 (NCED3), un gen que codifica una enzima crucial para la producción de ABA en las hojas, durante situaciones de sequía. El ABA, a su vez, provoca el cierre de los estomas (Takahashi et al., 2018). Se puede afirmar en términos generales que el ácido abscísico (ABA) regula el cierre estomático mediante la acumulación de potasio en las células de guarda, responsables del control de la apertura y cierre de los estomas.

La acumulación de potasio lleva a un aumento de presión osmótica y al consiguiente ingreso de agua en estas células, lo que eventualmente resulta en la apertura de los poros estomáticos. La regulación de estos movimientos de apertura y cierre de los estomas, los cuales están controlados por la presión osmótica de las células de guarda, se fundamenta en el constante transporte de potasio (K^+) en ambas direcciones a través de las membranas plasmáticas y vacuolares.

El papel del potasio en la apertura y cierre del estoma durante el estrés

El proceso que lleva a la apertura del estoma en la hoja de cacao, comienza con la detección de luz azul por fotorreceptores en las células de guarda (Inoue & Kinoshita, 2017), activando así la bomba de protones H^+ -ATPasa y desencadenando la salida de iones H^+ . Este movimiento iónico resulta en una disminución del potencial de la membrana, lo que a su vez estimula la entrada de iones K^+ a las células de guarda y la acumulación de agua, aumentando la presión de turgor y finalmente, provocando la apertura del estoma.

Para mantener la neutralidad eléctrica, la entrada de K^+ se equilibra con iones de carga opuesta, siendo el cloro (Cl^-) el principal contraión en plantas. Aunque también el malato (Mal^{2-}) y el nitrato (NO_3^-) pueden desempeñar este rol según las especies y las condiciones ambientales (Eisenach & De Angeli, 2017).

Los azúcares como la sacarosa son otros componentes que pueden regular la osmolaridad, aunque su contribución a la apertura estomática es significativa principalmente en situaciones de deficiencia de K^+ .

Por otro lado, el cierre estomático se activa en respuesta a la disminución de la intensidad lumínica y al estrés como la sequía, que estimula la síntesis de ácido abscísico (ABA). La presencia de ABA desencadena una cascada de señales que incluyen la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), facilitando el cierre del estoma.

Además, se ha descubierto que los flavonoles; antioxidantes inducidos por el etileno en las células de guarda, desempeñan un papel crucial en la regulación de los niveles de ROS para prevenir daño oxidativo (Watkins et al., 2017), permitiendo que los ROS actúen como moléculas señalizadoras en el proceso de cierre estomático.

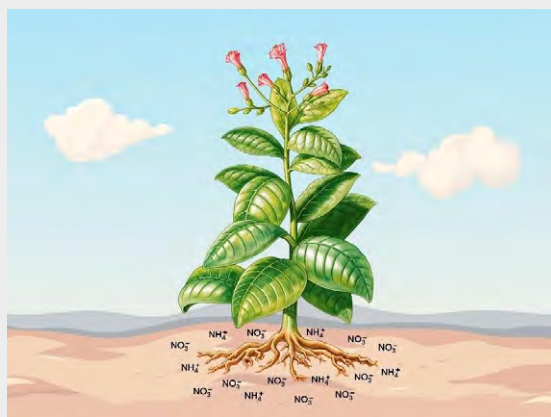
El crecimiento y la luz

Durante las etapas de vivero y establecimiento en campo, la planta de cacao requiere coordinar su crecimiento considerando la disponibilidad de luz y los niveles adecuados de nitrógeno para alcanzar un desarrollo óptimo.

Cuando carecen de suficiente nitrógeno, pueden mostrar signos como un crecimiento más lento, hojas de color amarillo pálido y una falta de vitalidad general. Mantener un equilibrio adecuado de nitrógeno en el suelo es fundamental para garantizar un crecimiento óptimo de las plantas, ya que su presencia en el suelo es crucial para la síntesis de proteínas, el desarrollo vigoroso y la producción equilibrada de clorofila necesaria para la fotosíntesis (Figura 17).

Figura 17

El nitrógeno disponible en el agua, suelo y planta.



Fuente: Elaboración propia con elementos prediseñados, utilizando CorelDRAW (2024).

En el proceso de comunicación entre el patrón y la variedad en el cacao, intervienen tres mensajeros primarios, entre ellos el **péptido CEP (C-terminally Encoded Peptide)**, una hormona móvil que se produce en las raíces en respuesta a la deficiencia de nitrógeno. Este péptido viaja desde las raíces hacia las hojas y el tallo, desencadenando

una **señalización sistémica de larga distancia** que permite equilibrar la absorción de nitrógeno entre las diferentes zonas de la raíz, especialmente cuando el nitrato está distribuido de forma desigual en el suelo.

Aunque el mecanismo descendente que conecta los brotes con las raíces aún no se comprende completamente, se ha observado que ciertos **péptidos del floema**, inducidos en las hojas tras la detección del CEP, actúan como señales móviles que retornan a las raíces. Estos péptidos, denominados **CEP Downstream 1 (CEPD1)** y **CEPD2**, regulan la expresión del **gen transportador de nitrato NRT**, optimizando la absorción de nitrógeno en presencia de nitrato en la rizosfera.

Según lo señalado por Ohkubo et al. (2017), las plantas de *Arabidopsis thaliana* con deficiencia de nitrógeno muestran una respuesta deteriorada en la absorción de este elemento, acompañada de síntomas visibles de deficiencia. En este proceso interviene el factor de transcripción HY5 (Elongated Hypocotyl 5), que actúa como un regulador principal para estimular la fotomorfogénesis.

Sin embargo, aún no se ha dilucidado si HY5 emplea otros mecanismos para inhibir la elongación del hipocótilo. Se ha evidenciado que HY5 incrementa la actividad de la quinasa GSK3-like Brassinosteroid-Insensitive 2 (BIN2), un represor clave de la señalización de brasinoesteroides, con el fin de reprimir dicho proceso, según lo reportado por Li et al. (2020).

En este sentido, la trans-Zeatin informa a las yemas sobre la mejora en la disponibilidad de nitrógeno en el suelo. Mediante la micro injertación de mutantes biosintéticos y el transporte de citoquinina, se descubrió que la translocación de trans-zeatina de la raíz al brote es importante para controlar el tamaño de la hoja, pero no para los rasgos relacionados con la actividad del meristemo.

Por otro lado, la trans-zeatina ribosómica es clave para regular ambos rasgos. La proporción de estas dos formas de citoquinina en el xilema y su suministro varían en respuesta a las condiciones ambientales, lo que permite a las plantas ajustar su crecimiento según sea necesario para adaptarse a entornos cambiantes, como los niveles de nitrógeno en el suelo, tal como lo explican Osugi et al. (2017).

Las plantas obtienen el nitrógeno que necesitan de la solución del suelo a través de sus raíces. En esta solución, el nitrógeno se encuentra principalmente en forma de nitratos (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) y las células de las raíces, específicamente los pelos absorbentes, logran incorporar a la planta mediante un proceso de transporte activo. Además, se ha observado la presencia de transportadores de aminoácidos y péptidos, los cuales también pueden servir como una fuente de nitrógeno para las plantas.

Tema de interés actual

Compatibilidad

Usando plantas parásitas para conocer el mecanismo cómo entra con sus haustorios a la planta huésped, teniendo en cuenta que son taxones diferentes. El parasitismo en las plantas aparece en 25 familias botánicas, pero las más relevantes son convolvuláceas, orobancáceas, lorantáceas y santalácea. Las plantas parásitas se dividen en dos tipos: Hemoparásitos y holoparásitas.

Los hemoparásitos son capaces de realizar la fotosíntesis por sí mismas, pero se adhieren a las plantas huéspedes para absorber parte de su savia y obtener elementos esenciales como el agua y los minerales. Las holoparásitas, por otro lado, no pueden realizar la fotosíntesis y dependen completamente de las plantas huéspedes (Nickrent, 2020; Queijeiro-Bolaños & Carrillo-Ángeles, 2022; Westwood et al., 2010).

Las plantas parásitas son empleadas como herramientas de estudio para investigar la unión de tejidos entre diferentes plantas y el transporte de moléculas entre ellas. Estos organismos son útiles como modelos para la investigación del injerto, ya que su haustorio, la estructura que se conecta con los vasos conductores de otra planta para adquirir nutrientes, requiere fusionarse y facilitar el transporte de moléculas entre ambas. Estudios con plantas parásitas han confirmado que el ARN mensajero, proteínas y virus pueden moverse a largas distancias entre plantas distintas a través de los haces vasculares en ambas direcciones (Shahid et al., 2018).

Conclusiones

- La injertación es un proceso fisiológico regido ontogénicamente por la acción hormonal de cada especie.
- La acción sinérgica entre las auxinas, giberelinas y citoquininas es necesaria para que se produzca un cambium y una xilema fisiológicamente normal.
- Los compuestos complementarios como los metabolitos secundarios, vitaminas, carbohidratos e inhibidores, son necesarios, junto con los ácidos nucleicos para que se inicie el proceso de regeneración de tejidos.
- Las mismas hormonas y genes que regulan la formación vascular en los órganos en desarrollo, también regulan la regeneración del tejido vascular en la unión del injerto.
- La injertación se ha convertido en una poderosa herramienta para dilucidar los mecanismos de comunicación a largas distancias en las plantas.
- Múltiples sustancias descubiertas (como mensajeros primarios), controlan el mecanismo de crecimiento, tolerancias a sequía, señalización del ataque de plagas y enfermedades.
- El injerto de plantas facilita el intercambio de información genética a través de grandes fragmentos de ADN o genomas

completos de plástidos, desafiando la creencia de que los materiales genéticos del donante y receptor permanecen separados. Esto sugiere una nueva vía para la transferencia horizontal de genes, con significativas implicaciones para las técnicas de injerto y la evolución genética.



CAPÍTULO IV

Determinantes morfofisiológicos y estrategias de optimización en la producción de cacao



Determinantes morfofisiológicos y estrategias de optimización en la producción de cacao

Introducción

Realizar investigaciones fisiológicas en el cultivo de cacao es esencial, dado que son decisivos para la productividad de las diversas variedades en esta área. La falta de comprensión de estos elementos puede conducir a prácticas agronómicas y fisiológicas inadecuadas, que limitan la optimización del rendimiento económico de las plantas al no adaptarlas adecuadamente a entornos específicos.

Es de gran importancia recopilar y analizar información precisa para comprender las relaciones clave entre el cultivo y su manejo, lo cual impulsa la tecnificación de la agricultura en la región. La escasez de estudios fisiológicos específicos, especialmente en torno al proceso de injerto y la absorción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), representa una limitación significativa en Norte de Santander.

El conocimiento detallado sobre estos aspectos proporciona una base sólida para entender mejor el crecimiento, desarrollo fenológico y la gestión adecuada del cultivo. Mejorar el manejo agronómico y la fisiología de las plantas, tiene como objetivo adaptar su funcionamiento a las prácticas específicas de cada municipio cacaotero, para garantizar altos rendimientos del grano.

Factores morfofisiológicos que determinan la producción del cacao

La combinación de factores genéticos y ambientales afecta la productividad potencial del cultivo de cacao. La disponibilidad de agua, energía y nutrientes desempeña un papel importante en el proceso fotosintético de las plantas de cacao. La efectividad de la fotosíntesis, la cual influye en la acumulación de materia seca, resulta fundamental para la producción agronómica del cultivo de cacao.

En los análisis de productividad, el primer paso consiste en determinar qué parte de la producción está relacionada con la radiación solar recibida y cuánta se debe a la eficiencia con la que el cultivo del cacao transforma esa radiación en materia seca.

Los niveles de crecimiento del follaje en plantaciones de cacao están relacionados con la pérdida de las hojas envejecidas. En este contexto, una plantación experimenta un ciclo completo de renovación de sus hojas aproximadamente cada 12 a 18 meses. Por lo general, el crecimiento de las partes vegetativas de la planta ocurre antes de que se produzca una caída significativa de hojas, lo que sugiere la presencia de un momento crítico en el movimiento de nutrientes desde la parte superior de la planta de cacao hacia órganos de almacenamiento como tallos y meristemas. Esta energía se utiliza posteriormente para la formación de flores y la producción de nuevas hojas (Sáenz & Cabezas, 2007).

La eficiencia del cultivo de cacao para producir materia seca

La eficiencia de la planta de cacao en términos de productividad se ve afectada por una variedad de factores relacionados con su fisiología, los cuales se pueden clasificar en dos categorías:

1. Los elementos que determinan la cantidad de energía que la planta de cacao intercepta y absorbe, como aquellos que influyen en la estructura del dosel, abarcando dimensiones, disposición y durabilidad de este.
2. Los factores que inciden en las tasas de fotosíntesis y respiración, ejerciendo un impacto en la producción de materia seca por unidad de follaje.

Además de estos aspectos fisiológicos previos, la distribución de asimilados como un factor crucial para el rendimiento agronómico (correspondiente a la relación entre la fuente, representada por la hoja en la planta de cacao y la demanda, siendo la mazorca), juega un papel fundamental en la regulación de la producción del cultivo de cacao. Este proceso se logra mediante la translocación de carbono para el crecimiento de la planta, y su almacenamiento en los órganos que se cosecharán como las mazorcas.

Estructura del dosel

La cantidad y disposición de la parte aérea de las plantas de cacao en una comunidad vegetal, en este caso, un cultivo establecido, se refiere a características como:

1. El tamaño.
2. La forma.
3. La distribución y ubicación de varios órganos de la planta como hojas, tallos, ramas y frutos.

El total de masa vegetal puede expresarse de forma general utilizando el Índice de Área Foliar, en tanto que la disposición puede ser caracterizada por la distribución de los ángulos de inclinación de las hojas.

Desarrollo foliar y longevidad

La longevidad y velocidad de desarrollo de las hojas en las plantas de cacao, juegan un papel crucial en la productividad de los cultivos, al influir en la densidad del follaje y determinar la duración efectiva de las hojas (Andrade et al., 2023). El crecimiento foliar en las plantas de cacao varía dependiendo de la distancia de siembra y la edad de los cultivos.

La cantidad de follaje es esencial para la fotosíntesis en estos cultivos, ya que la capacidad fotosintética es un factor determinante en el rendimiento agronómico, al establecer la cantidad de energía solar absorbida y convertida en materia orgánica. A pesar de que otros tejidos pueden contribuir a la fotosíntesis, el área foliar es considerada la medida estándar del tejido fotosintético.

Watson (1947) introdujo el Índice de Área Foliar (IAF), que representa la proporción entre la superficie foliar total y el área terrestre ocupada. El IAF óptimo en los cultivos de cacao maximiza las tasas de fotosíntesis neta o el crecimiento del cultivo para todo el follaje; superado este punto, las tasas pueden disminuir gradualmente. Cuando la fotosíntesis neta en los cultivos de cacao alcanza una meseta en respuesta al aumento del IAF, se menciona un IAF crítico; valor óptimo que maximiza la captación de radiación fotosintéticamente activa y, por lo tanto, aumenta la tasa fotosintética del cacao que es una planta C_3 .

Orientación del follaje

Otra característica importante del dosel que impacta la cantidad de radiación que es absorbida es la disposición espacial de las hojas, ya que la cantidad de luz que alcanza el dosel depende, en parte, de cómo están ubicadas las hojas. Por lo tanto, la orientación del dosel en una planta de cacao influye significativamente en la capacidad fotosintética de los cultivos (Castaño et al., 2013).

Norman y Campbell (1989) describen que la distribución de los ángulos de inclinación y azimut de las hojas, son elementos clave que determinan la orientación del dosel. Aunque, en general, las

hojas no tienen una orientación azimuthal preferida específica, sus posiciones se caracterizan principalmente por la distribución de los ángulos de inclinación acumulados.

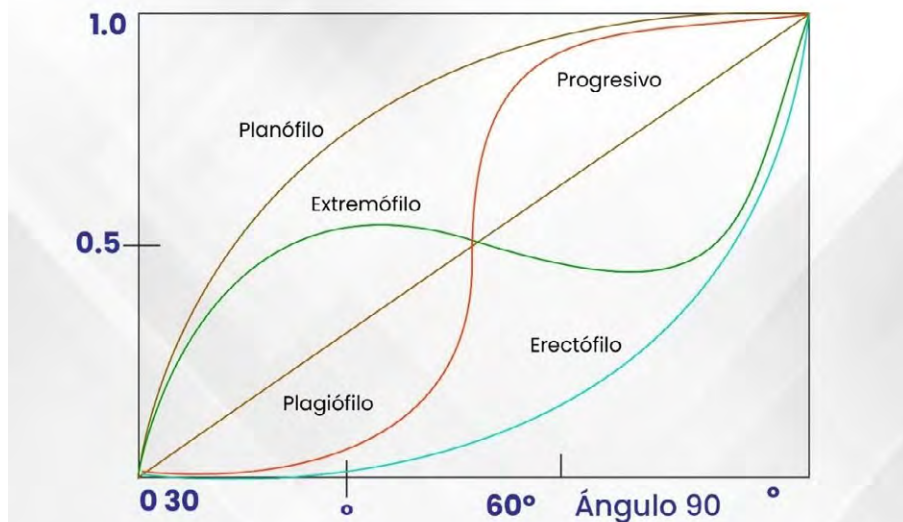
Según De Wit (1965), se identifican cinco tipos de orientación del dosel basados en la inclinación de las hojas (Figura 18):

Orientación planófila. Hojas mayormente horizontales, alrededor de 0 grados.

Orientación erectófila. Hojas predominantemente verticales, cerca de 90 grados.

- **Orientación plagiófila.** Orientación foliar predominante a 45 grados, como la que tienen las plantas de cacao.
- **Orientación extremófila.** Presenta un doble máximo en la inclinación foliar con picos en 0 y 90 grados.
- **Orientación ideal.** Hojas dispuestas progresivamente de abajo hacia arriba.

Figura 18
Tipos de dosel basados en la inclinación de las hojas.



Fuente: Adaptado de Photosynthesis of Leaf Canopies (de Wit, 1965). Figura elaborada por los autores, utilizando CorelDRAW (2024).

Según Shibles (1998) y López et al., (2011), modelos de productividad sugieren que, mejorar la orientación del dosel hacia una disposición erectófila en los cultivos podría resultar en un aumento significativo en la tasa de fotosíntesis neta y en la producción agronómica, al permitir una mayor penetración y una distribución más homogénea de la radiación fotosintéticamente activa (PAR).

De acuerdo con De Wit (1965), un dosel erectófilo tiene un mejor desempeño en días despejados y resulta más beneficioso que un dosel planófilo, solo en situaciones con altos coeficientes de área foliar. Por lo tanto, en cultivos con distribución erectófila y un bajo índice de área foliar, podrían haber pérdidas significativas de luz, por lo que es crucial manejar adecuadamente los índices críticos de área foliar en esos cultivos. Steward y Dwyer (1993), indican que el área foliar de una planta como el cacao y su distribución en el espacio determinan, en gran medida, la fotosíntesis del dosel de una planta y la acumulación de la materia seca de un cultivo.

Disponibilidad de radiación

La energía solar que alcanza la parte superior de la atmósfera, conocida como constante solar, tiene un valor aproximado de 1370 W/m^2 e incluye tanto radiación directa como difusa. Cuando se combina la radiación directa y difusa que llega a una superficie, se denomina radiación global (Jaramillo, 2018; Montero, 2022).

Colombia experimenta una incidencia de radiación solar bastante consistente a lo largo del año debido a su ubicación ecuatorial. En latitudes alrededor de 50 grados norte como en diciembre y marzo, la radiación recibida en la parte superior de la atmósfera varía entre 765 y 864 W/m^2 , respectivamente.

Las características geográficas de las montañas colombianas, que resultan en alta humedad relativa, nubosidad frecuente y diversas exposiciones en las laderas, permiten que alrededor del 50% de la radiación astronómicamente posible alcance la parte superior

de los cultivos, con valores que oscilan entre 290 y 440 W/m² (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2024; Jaramillo 2018).

En términos del balance de radiación, una parte significativa de la radiación total que alcanza un cultivo de cacao es absorbida por el follaje de la planta, otra porción es reflejada y el resto es absorbido por el suelo. La relación entre la radiación reflejada y la radiación total incidente se conoce como albedo; esta fracción no está involucrada en los procesos de transpiración y fotosíntesis (Jaramillo, 2018; Montero, 2022).

Interceptación de luz

En términos generales se puede observar un patrón de iluminación a lo largo del dosel de la planta de cacao, que está relacionado con la disposición de la misma y la forma en que se absorbe la radiación. En el dosel de un cultivo de cacao, la mayor parte de la luz es captada por las capas superiores del follaje, mientras que solo una pequeña porción alcanza las capas inferiores. Como resultado, la cantidad de biomasa generada se verá influenciada por la eficiencia con la que las hojas aprovechan la luz fotosintéticamente activa que tienen a su disposición (Somarriba, 2004). Dado que las hojas del cacao y de otras plantas perennes son la principal fuente de fotoasimilados mediante la fotosíntesis y la respiración, la eficacia del follaje en el aprovechamiento de la luz dependerá no solo de la cantidad y tamaño de las hojas, sino también de la forma en que la luz disponible se distribuye entre ellas (Jaramillo, 2018; Montero, 2022; Verhagen et al., 1963).

Modelos de interceptación de luz

Ross (1981) indica que factores como la cantidad de follaje, las dimensiones y orientación del dosel, la distribución del área foliar, los ángulos de las hojas y la radiación solar total (que incluye tanto la radiación directa como la difusa) son determinantes en la capacidad del follaje para interceptar la luz. Desarrollar un

modelo integral de interceptación de luz que tome en cuenta estos aspectos y los factores que los influyen puede ser bastante complicado. Por esta razón, los modelos que existen hasta ahora tienden a simplificar estas variables. Entre los modelos más comunes para la radiación, se encuentran el de Monsi y Saeki (1993), para plantas individuales o doseles continuos, y el de Jackson y Palmer (1979), que se aplica a doseles discontinuos.

Según el modelo de Monsi y Saeki (1993), la radiación solar que penetra en el dosel se rige por la ley de Lambert-Beer-Bouguer, donde se establece que la radiación de un solo color atravesado por un medio uniforme se reduce exponencialmente en función de la distancia recorrida a través de ese medio (Jones, 1992). Estas consideraciones sugieren que la radiación fotosintéticamente activa disminuye de manera exponencial con el Índice de Área Foliar (IAF) desde la parte superior del dosel y la interceptación total, por lo tanto, es una función exponencial del IAF.

Modelo de Monsi y Saeki (1993)

La relación mencionada se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$I = I_o * e^{(-K * IAF)}$$

Donde:

- I: Representa la radiación en un plano horizontal específico del dosel o la copa de la planta.
- I_o : Corresponde al balance de radiación incidente en la superficie del dosel, es decir, la radiación incidente menos la radiación reflejada.
- e: Es la base de los logaritmos naturales.
- K: Representa el coeficiente de extinción.
- IAF: Es el Índice de Área Foliar en el plano.

Comúnmente, esta ecuación se formula como una proporción:

$$\frac{I}{I_o} = e^{(-K * IAF)}$$

Esta relación implica que la fracción de irradiancia interceptada por el dosel (I/I_o) está determinada por su Índice de Área Foliar (IAF) y el coeficiente de extinción (k). Al representarla de manera logarítmica, la ecuación se convierte en una línea recta.

$$\ln \ln \frac{I}{I_o} = -K * IAF$$

$$\ln \ln (I_o) - \ln \ln (I) = K * IAF$$

Por lo tanto, al aplicar el logaritmo en ambos lados de la ecuación, se obtiene la fórmula siguiente para despejar K en dosel continuo:

$$K = \left(\frac{\ln \ln (I_o) - \ln \ln (I)}{IAF} \right)$$

En esta fórmula:

- I_o : Representa la radiación incidente en la parte superior de la fronda.
- I : Es la radiación a un nivel específico dentro de la fronda, dado un valor de IAF.
- K : Denota el coeficiente de extinción para la radiación.
- IAF : Se refiere al Índice de Área Foliar.

Modelo de Jackson y Palmer

El modelo desarrollado por Jackson y Palmer (1979) fue inicialmente concebido para huertos de árboles frutales, considerando que los doseles de los cultivos no son continuos perennes como el cacao, debido a los espacios dejados entre surcos y plantas para permitir prácticas culturales más accesibles.

Según los autores de esta ecuación, la transmisión de luz (T) a través de doseles discontinuos se compone de dos elementos separados y aditivos:

La luz que pasa directamente entre los árboles al suelo (T_f), depende exclusivamente de la disposición del huerto y la luz

transmitida a través del dosel del árbol (T_c) está relacionada con la densidad del área foliar. Por lo tanto,

$$T = T_f + T_c$$

La fracción de interceptación de luz se representa como $1-T$, donde T es la transmitancia, y el límite máximo de interceptación en el dosel es $1-T_f$, determinado por las características del dosel (altura, forma y disposición de los árboles) y por la distribución angular de la luz incidente y difusa. La cantidad con la que la interceptación alcanza este límite máximo estará definida por T_c , que a su vez está influenciada por el área foliar dentro del dosel (Jackson, 1980).

Este enfoque, al igual que la propuesta de Monsi y Saeki (1993), se basa en una relación establecida por la ley de Lambert-Beer-Bouguer entre la penetración de la luz y la densidad del follaje. Por lo tanto, la transferencia de luz a través de un dosel discontinuo en el cultivo de cacao y determinar K , se explica de la siguiente manera:

Se parte de la siguiente ecuación:

$$T = T_f + (1 - T_f) e^{(-K(IAF)')}$$

Se calcula:

$$(IAF)' = \frac{IAF}{(1 - T_f)}$$

Luego, se obtiene:

$$T - T_f = (1 - T_f) e^{(-K(IAF)')}$$

Simplificando:

$$\frac{(T - T_f)}{(1 - T_f)} = e^{(-K(IAF)')}$$

Se aplica el logaritmo natural:

$$\ln\left(\frac{T - T_f}{1 - T_f}\right) = \ln(e^{(-K(IAF)')})$$

Finalmente, se deduce que:

$$(T - Tf) - (1 - Tf) = -K(IAF)'$$

La fórmula para encontrar K resulta:

$$K = \frac{(T - Tf) - (1 - Tf)}{(IAF)'}$$

Donde:

- T: Representa la transmisividad total.
- Tf: Es el flujo de radiación fotosintéticamente activa transmitida directamente al suelo, entre los árboles.
- 1-Tf: Indica la radiación transmitida a través del dosel (Te).
- IAF: Es el Índice de Área Foliar (área de hojas sobre área de terreno).
- (IAF)': Se define como IAF dividido por 1-Tf.

Este modelo fue utilizado en huertos de manzanos por Jackson & Palmer (1980), con un coeficiente de extinción estimado de 0,6. Shibles (1998) destaca que, en la mayoría de los cultivos, el valor de K varía entre 0,7 y 1,0 y que un K más bajo puede resultar beneficioso para la fotosíntesis del dosel, siempre que esté relacionado con altos índices de área foliar y condiciones de alta radiación

El coeficiente K se expresa conforme a la ley de absorción de Lambert-Beer-Bouguer, donde se establece que cada capa de igual grosor absorbe proporciones iguales de la radiación que la atraviesa. K es un indicador de las características de la arquitectura de la planta, determinado por la inclinación de las hojas y la densidad foliar, que determinan la cantidad de radiación absorbida por unidad de área foliar (Monteith, 1965).

La inclinación de las hojas de la planta de cacao está vinculada con la interceptación de la radiación; hojas horizontales requieren menos área foliar que las verticales para interceptar la misma cantidad de radiación (ángulo de inserción foliar). Este factor, también conocido como tasa de absorción de energía, depende de

las características arquitectónicas de la planta como la inclinación de las hojas y sus propiedades reflectantes, absorbentes y la densidad del follaje, las cuales determinan la cantidad de radiación absorbida por unidad de área foliar (Leiva-Rojas et al., 2019).

El coeficiente de extinción se ve influenciado por varios factores, incluyendo la densidad vertical de las hojas, la transmisión y reflexión de la radiación, el ángulo foliar, la elevación solar, la altura de las plantas, la separación entre hileras, el ancho de las plantas, la densidad poblacional, la relación entre el azimut solar y el azimut de las hileras y el Índice de Área Foliar.

Aunque un valor bajo de K puede ser óptimo a nivel de cultivo (ver Tabla 8), varios factores pueden contrarrestar este efecto beneficioso. Entre ellos se encuentran las limitaciones en la demanda, la incidencia de enfermedades como la Moniliasis —que reducen la tasa fotosintética y la producción de materia seca—, la ineficiencia en la distribución de la demanda debido a una poda inadecuada que altera la polaridad, y la disponibilidad limitada de dióxido de carbono. Por ejemplo, el modelo YamSim (Rodríguez, 1997) ajusta el valor de K según la posición solar a lo largo del día y considera la contribución de la radiación difusa a la fotosíntesis del dosel vegetal.

Tabla 8

Coeficiente de extinción de la radiación K , medido en diferentes cultivos

Cultivo	K
Algodón	0,85–1,03
Alfalfa	0,61–0,77
Cereales	0,50–0,75
Girasol	0,90
Girasol	0,66–0,92
Gladiolo	0,16–0,30
Lino	0,37–0,42
Maíz	0,65
Mijo	0,55

Nabo	0,87
Rábano	0,30-0,42
Raigrás perenne, arroz y maíz	0,40-0,70
Sorgo	0,46
Trébol	0,90-1,00
Banano (cv. Williams)	0,68
Frijol	0,55
Palma aceitera	0,66
Papa (cv. Birrisito)	0,45

Fuente: Elaboración propia a partir de Rodríguez (1997)

Estudios sobre las características morfológicas y componente de rendimiento en cacao

Existen algunos estudios centrados en las características morfológicas y los componentes de rendimiento del cacao (*Theobroma cacao* L.), los cuales abarcan una variedad de enfoques; desde la caracterización detallada de los frutos y semillas hasta el análisis de las variables morfológicas de las plantas (Ver resumen Tabla 9). Entre ellos se encuentra el de Amador-Scoto et al. (2022) quienes efectuaron un estudio en diez fincas productoras de cacao en la región de Naranjal, Ecuador, con el objetivo principal de caracterizar morfológicamente el cacao mediante la observación y medición de diversas variables de los frutos, semillas y flores.

Los investigadores utilizaron una metodología que incluyó la evaluación del peso, largo y ancho del fruto, así como la rugosidad, grosor y coloración del pericarpio. Además, registraron el número de semillas por fruto utilizando 10 mazorcas de cada finca y describieron 5 semillas de cada mazorca. En cuanto a las semillas, midieron variables como peso, largo, ancho, espesor y el peso de la pulpa y la testa. Igualmente, tomaron 10 flores al azar de cada planta para evaluar sus estructuras.

Los resultados mostraron diferencias significativas en las características fenotípicas de las plantas. En particular, las características morfológicas de los frutos resultaron ser las más relevantes para la caracterización de las variedades de cacao. Asimismo, identificaron la predominancia del tipo forastero y una menor representación del tipo trinitario, concluyendo que las características morfológicas del fruto son fundamentales para la clasificación y el mejoramiento de los cultivos de cacao en Naranjal, Ecuador.

Por su parte, Mollericona y Calle (2021) llevaron a cabo un estudio para evaluar las características morfológicas de las plantas de cacao (*Theobroma cacao* L.) y palta (*Persea americana* Mill.) durante la fase de vivero en la Estación Experimental Sapecho, ciclo 2020-2021. El enfoque del estudio estuvo en portainjertos de cacao del cultivar IMC67 y plantines injertados de palta Hass, Lorena y Fuerte, utilizando portainjertos del tipo Topa topa.

Los autores realizaron un muestreo aleatorio de 100 plantines de cacao y 110 de palta, con una confiabilidad del 95%. Las variables evaluadas incluyeron altura, diámetro del cuello de la raíz y biomasa, tanto en húmedo como en seco. Además, calcularon índices como la relación biomasa seca aérea/biomasa seca raíz, el Índice de Robustez (relación altura/diámetro) y el Índice de Calidad de Dickson. Los resultados del estudio presentaron contrastes significativos entre las variedades evaluadas. Para el cacao, la altura promedio fue de 23,5 cm; el diámetro del cuello de la raíz fue de 3,8 mm y la biomasa seca aérea alcanzó 14,2 g.

En Panamá, Gutiérrez (2020) centró su estudio en la provincia de Bocas del Toro, con el objetivo de evaluar morfológicamente tres clones élites de cacao seleccionados en las fincas de la Cooperativa de Servicios Múltiples Cacao Bocatoreña R.L. (COCABO R.L.). En la caracterización, utilizó 12 descriptores para los árboles, 15 descriptores para los frutos y cinco descriptores cualitativos y cuantitativos para las semillas. Los clones estudiados fueron

AS-CP 26-59 Blanco, AS-CP 26-60 Morado y AS-CP 26-61 Mulato (morado y blanco). El diseño experimental se realizó de manera completamente aleatoria, con tres tratamientos y diez repeticiones para cada clon y la selección de los árboles se realizó de acuerdo con criterios específicos, como la ubicación dentro de la parcela y la ausencia de competencia.

Los resultados indicaron que la característica morfológica predominante en el grupo genético era la coloración verde de las hojas, atribuida a la ausencia de antocianina, así como la coloración blanca de los cotiledones y las flores. Igualmente, observó variaciones significativas en las características morfológicas de los clones con el clon AS-CP 26-59 Blanco, destacando por sus frutos de mayor peso y tamaño, mientras que el clon AS-CP 26-60 Morado, presentó una mayor cantidad de semillas por fruto.

Asimismo, Saavedra et al. (2017) propusieron caracterizar morfológica y organolépticamente una colección de árboles de cacao con potencial de fino y de aroma en las regiones de San Martín, Huánuco, Amazonas, Cusco y Piura en Perú, donde analizaron 80 árboles utilizando descriptores morfológicos de fruto y semilla.

Los resultados mostraron diferencias en la profundidad de los surcos primarios, siendo mayor en Amazonas. El peso del fruto, así como el de los granos, fue más alto en Amazonas y Piura. El número de granos por fruto también fue mayor en Amazonas. En cuanto a las semillas, el peso fresco y seco con testa fue superior en Amazonas, mientras que la longitud de la semilla fue mayor en Piura.

Los índices de mazorca y del grano variaron entre regiones, siendo el índice de mazorca mayor en Cusco y el índice del grano mayor en Amazonas. En el color del cotiledón, predominó el violeta oscuro en Amazonas, violeta y morado en Cusco y blanco en Piura. En la forma del cotiledón, las formas elíptica y ovada

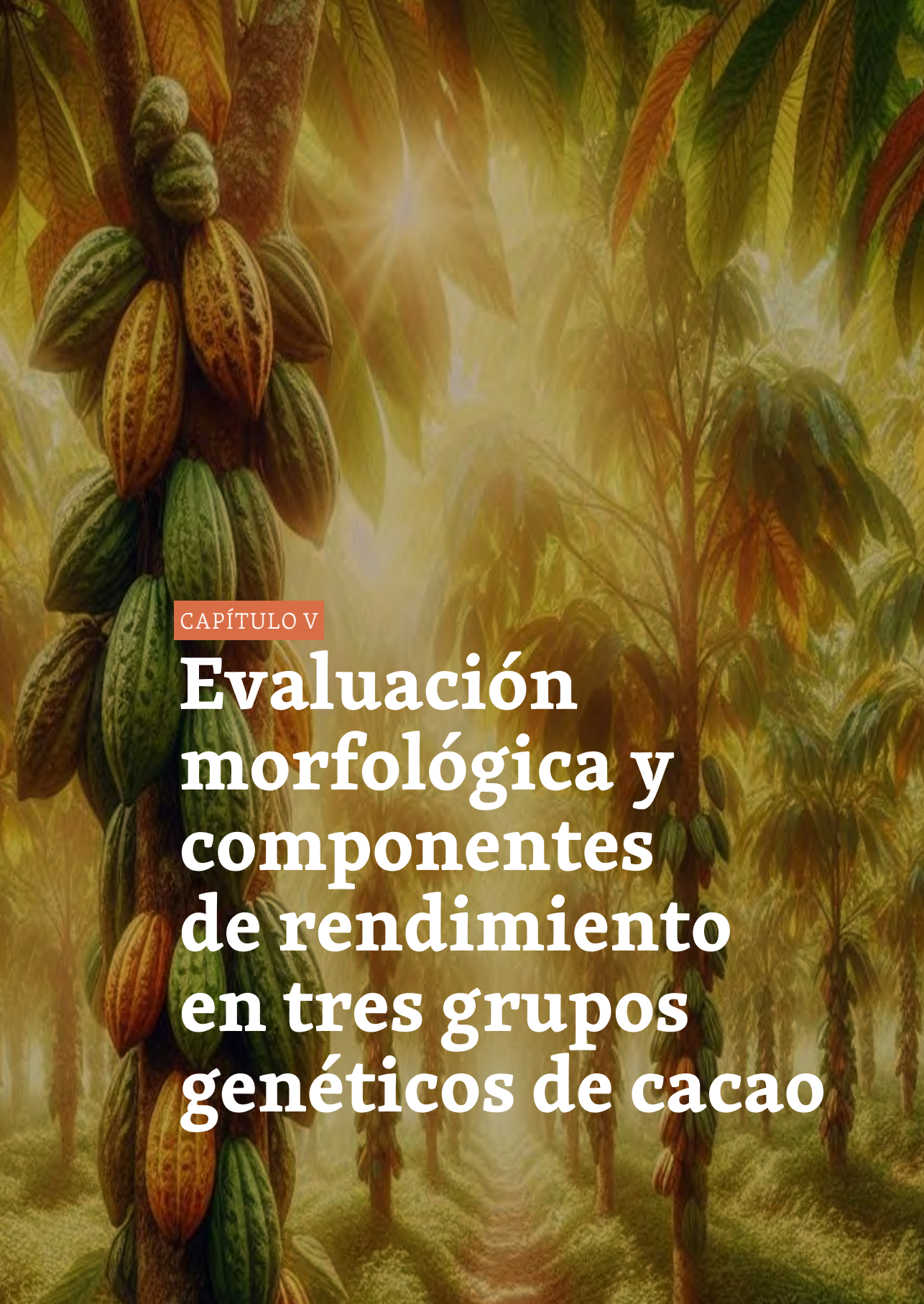
predominaban en Amazonas; oblonga, elíptica y ovada en Cusco y oblonga e irregular en Piura.

Tabla 9

Estudios sobre las características morfológicas y componentes de rendimiento en cacao

Autor/es	Ubicación	Método de estudio	Resultados destacados
Amador-Scoto et al. (2022)	Naranjal, Ecuador	Evaluación de peso, largo, ancho, rugosidad, grosor y coloración del fruto; número de semillas por fruto; evaluación de 10 flores por planta.	Diferencias significativas en características fenotípicas; predominancia del tipo forastero y menor representación del tipo trinitario.
Mollericona & Callee (2021)	Estación Experimental Sapecho, Bolivia	Evaluación de altura, diámetro del cuello de la raíz, biomasa, relación biomasa seca aérea/ biomasa seca raíz, índice de robustez, Índice de Calidad de Dickson.	Diferencias significativas entre las variedades evaluadas; altura promedio de cacao 23.5 cm, diámetro del cuello de la raíz 3.8 mm, biomasa seca aérea 14.2 g.
Gutiérrez (2020)	Bocas del Toro, Panamá	Utilización de 12 descriptores para árboles, 15 descriptores para frutos, 5 descriptores cualitativos y cuantitativos para semillas; diseño experimental al azar con 3 tratamientos y 10 repeticiones por clon.	Característica dominante: Coloración verde de la hoja; diferencias significativas entre clones; AS-CP 26-59 Blanco, con frutos de mayor peso y tamaño; AS-CP 26-60 Morado con más semillas por fruto.
Saavedra-Arbildo et al. (2017)	San Martín, Huánuco, Amazonas, Cusco y Piura, Perú	Evaluación de 80 árboles utilizando descriptores morfológicos de fruto y semilla; evaluación sensorial de fruta fresca y licor de cacao.	Diferencias significativas en la profundidad de los surcos primarios (mayor en Amazonas); peso del fruto y granos más altos en Amazonas y Piura; mayor número de granos por fruto en Amazonas; peso fresco y seco de semillas con testa mayor en Amazonas; longitud de semilla mayor en Piura.

Fuente: Elaboración propia (2025)



CAPÍTULO V

Evaluación morfológica y componentes de rendimiento en tres grupos genéticos de cacao



Evaluación morfológica y componentes de rendimiento en tres grupos genéticos de cacao

Introducción

El cacao (*Theobroma cacao* L) es un cultivo de gran importancia económica y social en diversas regiones tropicales del mundo y en Colombia, su relevancia se ha incrementado, especialmente en el departamento de Arauca. Esta región es conocida por la excelente calidad de sus granos de cacao, lo que ha impulsado la competitividad del sector cacaotero local y ha generado un interés creciente en la investigación y desarrollo de prácticas agrícolas sostenibles. En este contexto, el municipio de Fortul se destaca como área con potencial significativo para el cultivo, gracias a la ubicación estratégica y su diversidad de ecosistemas.

El estudio de las características morfológicas y de rendimiento de diversos grupos genéticos de cacao como criollo, forastero y trinitario, es importante para identificar variedades que se adapten mejor a las condiciones locales y ofrezcan un rendimiento óptimo. Dicha identificación no solo contribuirá a mejorar la

producción, sino que también permitirá a los agricultores de la región diversificar sus cultivos y aumentar su rentabilidad. Además, el cacao es una importante fuente de ingresos para muchos pequeños y medianos productores en el municipio de Fortul.

Este estudio contribuye, adicionalmente al conocimiento científico sobre las variedades de cacao y también las implicaciones prácticas para el desarrollo sostenible del sector cacaotero en Fortul. Al promover prácticas agronómicas adecuadas y el uso eficiente de los recursos, se espera que los resultados de esta investigación ayuden a fortalecer la economía local, mejorar la calidad de vida de los productores y garantizar la seguridad alimentaria en la región.

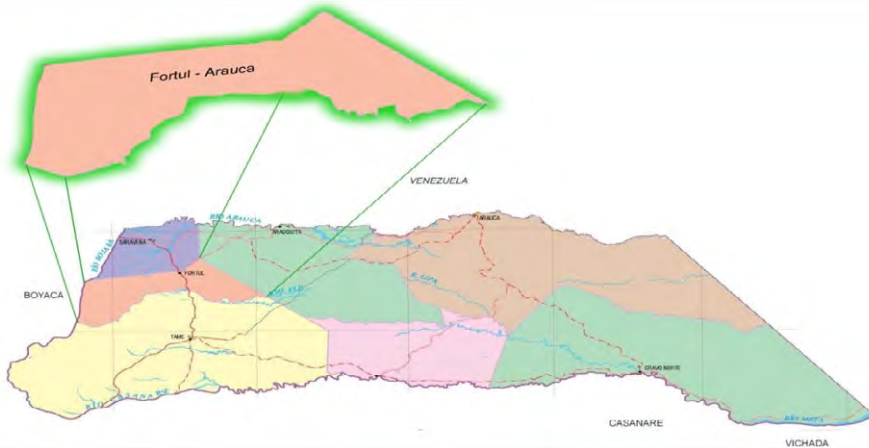
Contexto general del área de estudio

El municipio de Fortul se encuentra ubicado en el lado occidental del departamento de Arauca, limitando al sur con Tame, al norte con Saravena, al oeste con Güicán y al este con Arauquita (Figura 19). Su área urbana está ubicada estratégicamente en el centro del piedemonte araucano, lo que lo convierte en un punto de confluencia importante para los municipios vecinos (Universidad de los Llanos Unillanos] & Gobernación de Arauca, [Gobernación], 2019).

De hecho, cuenta con un sistema de conectividad vial eficiente que lo enlaza con los municipios vecinos mediante vías departamentales y nacionales pavimentadas. Las vías nacionales conectan a Fortul con el centro del país a través de la Marginal de la Selva por el departamento de Casanare o por la Ruta de los Libertadores, a través del departamento de Boyacá, además de ofrecer salida hacia los Santanderes por la vía de La Soberanía (Alcaldía de Fortul, 2024).

Figura 19

Localización del municipio de Fortul, Arauca, Colombia.



Fuente: Tomado de Plan de Desarrollo Municipal de Fortul 2024–2027, por Alcaldía de Fortul (2024), recuperado de https://fortularauca.micolombiadigital.gov.co/sites/fortularauca/content/files/001004/50190_acuerdo-n-002-pdt-municipio-de-fortul-20242027-definitivo.pdf

Extensión y ecosistemas

El municipio tiene una extensión total de 112,500 hectáreas, de las cuales el 45,02% es zona de reserva forestal, repartida entre el Parque Natural Nevado del Cocuy (21.332 ha) y la comunidad U’wa del resguardo indígena Cibariza (29.320 ha). Fortul es considerado uno de los municipios con mayor variabilidad de ecosistemas, con alturas que varían de 200 m.s.n.m. hasta los 3.500 m.s.n.m. en la Sierra Nevada del Cocuy, ubicada en el costado suroccidental del municipio (Alcaldía de Fortul, 2024).

La Sierra Nevada del Cocuy, que posee una extensión de 306.000 ha y una altura máxima de 5.775 m.s.n.m., es un Parque Nacional Natural distribuido en los departamentos de Arauca, Boyacá y Casanare. El 57% del área total del parque pertenece al departamento de Arauca, con el municipio de Tame ocupando el 44,94% y Fortul el 12,23% de esta área (Alcaldía de Fortul, 2024. Gestión y Trabajo Comunitario, Con Sentido de Pertenencia: Plan de Desarrollo Municipal 2024- 2027. Fortul, Colombia)

Demografía

Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), para el año 2024, se proyecta una población de 24.198 habitantes, con una densidad poblacional de 18,49 hab./km². De esta población, el 50,03% son hombres y el 49,7% mujeres; la mayoría de los habitantes (53%) reside en el área urbana. Igualmente existen dos resguardos indígenas habitados por 824 personas, que representan el 3,2% de la población (Universidad de los Llanos & Gobernación de Arauca, 2019).

Área rural y producción agropecuaria

El área rural está conformada por 54 veredas y dos resguardos indígenas, agrupados en cinco distritos. Aunque el 99,9% de su territorio es rural, solo el 48,8% está dedicado a la producción agropecuaria, el resto corresponde a resguardos indígenas y zonas de reserva especial como el Parque Nacional el Cocuy. Cerca del 80% de los productores en Fortul son pequeños y medianos. A pesar de las limitaciones en la transferencia de tecnología y el mercado, estos productores han logrado diversificar sus actividades agrícolas y pecuarias, generando una economía de subsistencia con algunos excedentes para el mercado local y nacional (Alcaldía de Fortul, 2024).

El cacao es uno de los cultivos clave para la economía local, con iniciativas para establecer nuevas plantaciones y dos asociaciones que se especializan en la transformación de esta materia prima, generando valor agregado con productos como chocolate de mesa, crema de whisky, sabajón y diversos dulces a base de cacao (Alcaldía de Fortul, 2024). En el año 2022, abarcó un área sembrada de 2.372 hectáreas, de las cuales 2.370 hectáreas fueron cosechadas. La producción total alcanzó las 1.777 toneladas (Agronet, 2024).

Distribución de la tierra y vocación del suelo

Según la Agenda Ambiental Municipal Corporinoquia 2021-2026, en Fortul la distribución de la tenencia de la tierra es desigual: El 21,15% de los predios contienen el 49,58% de la tierra (predios

grandes), mientras que el 78,85% de los predios accede al 50,2% de la tierra (predios pequeños y medianos) (Corporación Autónoma Regional de la Orinoquia, 2021, como se citó en Alcaldía de Fortul, 2024, p. 66).

De acuerdo con la clasificación del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en 2017, el 99,9% del área de Fortul es rural. De esta, el 52,8% tiene vocación agropecuaria, subdividida en vocación ganadera (47,9%), vocación forestal (33,3%), conservación de suelos (14,9%) y agroforestal (3,9%). El restante 47,2% corresponde a resguardos indígenas (Alcaldía de Fortul, 2024).

Desarrollo del estudio

Localización del estudio

El estudio se desarrolló en la finca La Plaga, ubicada en la vereda La Primavera del municipio de Fortul, Arauca, Colombia, con coordenadas geográficas de latitud 6°41'09.9" y longitud 71°33'29.4", a una altitud de 246 msnm. La finca, con una extensión total de 176 hectáreas, destinó tres específicas para la producción de cacao. Los árboles seleccionados, con una edad aproximada de 10 años, se encontraban sembrados a una distancia de 3x3 metros; proporcionando un entorno adecuado para el desarrollo del experimento y la evaluación de las variables estudiadas.

Material vegetal

Se evaluaron tres grupos genéticos de cacao (*Theobroma cacao* L.): Criollo, forastero y trinitario, para determinar sus características morfológicas y de rendimiento, con el objetivo de identificar posibles diferencias y potenciales ventajas entre ellos.

Diseño experimental

El estudio empleó un método cuantitativo con un diseño completamente aleatorio. La unidad experimental fue un árbol individual de cacao, ubicado en suelos planos y sin pendientes, asegurando condiciones homogéneas. Se implementaron prácticas agronómicas estándar como limpieza de arvenses, fertilizaciones y podas, para mantener el cultivo en condiciones óptimas. Los datos se recolectaron y registraron en fichas de información durante el experimento de campo, abarcando mediciones de componentes de rendimiento, morfológicos, así como observaciones sobre el estado de los árboles y las condiciones del campo. Las mediciones del largo y ancho de las hojas, el diámetro polar y ecuatorial de las mazorcas se realizaron cada nueve días con un pie de rey de precisión (Somet Inox, 1970).

Muestreo

Para la correcta identificación y diferenciación de los árboles seleccionados, se empleó un sistema de marcación con cintas de colores; asignando una cinta roja para el grupo criollo, una amarilla para el forastero y una negra para el trinitario. Cada árbol por grupo se enumeró del uno al cinco, garantizando así la consistencia y precisión en la toma de muestras a lo largo del estudio. Además, en cada árbol se marcaron cinco ramas estratégicas, de las cuales se extrajo una hoja del tercio medio de cada una para realizar las mediciones morfológicas. Para cada grupo genético, se seleccionaron cinco árboles, totalizando 15 árboles experimentales. Para evaluar la producción, se cosecharon 10 frutos por árbol de los diferentes grupos genéticos.

Componentes evaluados

Para evaluar los componentes morfológicos del cultivo de cacao se incluyeron la longitud y el ancho de las hojas, el área foliar total y el peso seco del área foliar, determinados mediante ecuaciones

modeladas para métodos no destructivos y la silueta de las hojas. En cuanto a los componentes de rendimientos, éstos se refieren a la cantidad de frutos y semillas que produce una planta o un grupo de plantas en un período determinado, entre los cuales incluyen variables como el índice de mazorcas, el índice de semilla, el número de granos por mazorca, así como los diámetros polar y ecuatorial (ver Tabla 10).

A continuación, se detallan las variables utilizadas en el análisis de los componentes morfológicos.

Ancho de la hoja (A). Se refiere a la dimensión horizontal de la lámina de la hoja de la planta (Figura 20).

Figura 20

Ancho de la hoja de cacao.



Fuente: Fotografía tomada por Blanco (2025)

Longitud de la hoja (L). Se refiere a la dimensión lineal que va desde la punta de la hoja, hasta el punto donde ésta se une al tallo (Figura 21).

Figura 21

Longitud de la hoja de cacao.



Fuente: Fotografía tomada por Blanco (2025)

Para el área foliar, el peso seco del área foliar y la silueta de la hoja, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Área foliar

$$Af = 10,165 + 0,13670L - 3,3153A + 0,0741L^2 + 0,9902A^2 + 0,1624(L \times A)$$

Peso seco del área foliar

$$Ps = 0,1694 + 0,00168L - 0,06672A + 0,00101L^2 + 0,01233A^2 + 0,00216 (L \times A)$$

Silueta de la hoja

$$\text{Área de la hoja} = \frac{2}{3} \times L \times A$$

Donde:

AF = Área foliar.

Ps = Peso seco.

A = Ancho.

L = Largo.

Respecto a las variables del componente de rendimiento, se utilizaron los siguientes indicadores:

Índice de semilla (Indsem). Se midió el peso promedio en gramos de 100 semillas fermentadas y secas, proporcionando una evaluación directa de la calidad y el rendimiento del cacao, producido por cada grupo genético determinado por Solís-Bonilla (2015):

La industria del cacao establece un valor mínimo de 1 para el índice de semillas, lo que implica que 100 semillas de cacao fermentadas y secas deben pesar al menos 100 gramos (Ballesteros et al., 2015).

Índice de Mazorca (IM). Se determinó el número de mazorcas necesarias para obtener un kilogramo de cacao fermentado y seco; una medida directa de la eficiencia productiva. Calculado de la siguiente forma de acuerdo con (Sánchez-Mora et al., 2014).

Un índice de mazorca igual o inferior a 17 se clasifica como muy bueno, mientras que un índice entre 18 y 20 se considera bueno. En contraste, un índice superior a 21 se evalúa como inadecuado (Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao], 2015).

Número de granos por mazorca. Se realizó un conteo directo de los granos presentes en las mazorcas, que influye en el rendimiento total del árbol (Figura 22). Un valor superior a 46 se considera excelente, entre 36 y 45 es intermedio y menos de 35 es inferior (Federación Nacional de Cacaoteros (FEDECACAO), 2015).

Figura 22

Granos en la mazorca de cacao.



Fuente: Fotografía tomada por Blanco (2025)

Diámetro polar de la mazorca (TDIAP). Medida del diámetro en la dirección longitudinal, relacionada con el tamaño y potencialmente el peso de la mazorca (Figura 23).

Figura 23

Diámetro polar de la mazorca.



Fuente: Fotografía tomada por Blanco (2025)

Diámetro ecuatorial de la mazorca (TDAE). Medida del diámetro en la dirección transversal, también relacionada con el tamaño y el peso de la mazorca (Figura 24).

Figura 24

Diámetro ecuatorial de la mazorca.



Fuente: Fotografía tomada por Blanco (2025)

Rendimiento agronómico del cultivo

El rendimiento agronómico del cultivo se define como una función compleja que integra múltiples variables, influenciadas principalmente por factores genéticos como las características morfológicas que incluyen el tamaño, la forma y la estructura del follaje. En este contexto se modeló una función de producción específica, diseñada para entender cómo estas variables interactúan y contribuyen al rendimiento final del cultivo de cacao detallada a continuación:

Tabla 10
Variables utilizadas en el estudio

Variables	Símbolo	Unidad
Ancho de la hoja	A	cm
Largo de la hoja	L	cm
Área foliar	Af	cm ²
Peso seco del área foliar	Ps	g
Silueta del área de la hoja	-	cm ²
Índice de semilla	Indsem	g/100 semillas
Índice de mazorca	IM	Número de mazorcas/kg
Número de granos por mazorca	-	Número de granos
Diámetro polar de la mazorca	TDIAP	cm
Diámetro ecuatorial de la mazorca	TDAE	cm
Rendimiento agronómico	-	g

Fuente: Elaboración propia (2025)

Análisis estadístico y procesamiento de datos

Para evaluar los componentes morfológicos y de rendimiento en los grupos genéticos de cacao criollo, trinitario y forastero, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) con el objetivo de determinar si existían diferencias significativas entre los tres grupos genéticos. Para garantizar la validez de los análisis estadísticos, se realizaron pruebas de homogeneidad de varianzas utilizando el estadístico de Levene.

Posteriormente, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey con un nivel de significancia de 0,05 ($\alpha = 0,05$) para identificar qué grupos presentaban diferencias estadísticas en cada componente de rendimiento evaluado. Además, se llevó a cabo un análisis multivariante (MANOVA) para evaluar el efecto del tiempo sobre el diámetro polar (TDIAP) y el diámetro ecuatorial (TDAE) de las mazorcas. El procesamiento de los datos recolectados se realizó utilizando el software SPSS Statistics, versión 23.

Resultados y discusión

Componentes morfológicos

Es importante analizar los componentes morfológicos de las variedades de cacao, una vez que ofrecen información sobre las adaptaciones genéticas o ambientales, que influyen significativamente en el rendimiento y la productividad del cultivo. Al comparar estas características entre grupos como el criollo, trinitario y forastero, podemos obtener claridad sobre las posibles ventajas morfológicas de cada grupo en términos de eficiencia fotosintética, adaptabilidad al ambiente local y otras variables agronómicas clave.

Ancho de la hoja

En el estudio del ancho de la hoja en grupos genéticos de cacao (Criollo, trinitario y forastero), se empleó el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar diferencias significativas entre estos grupos (Tabla 11). Los resultados revelaron una suma de cuadrados entre grupos de 5,03 y una media cuadrática de 2,59, con un valor F de 3,31 y un nivel de significancia de 0,03 ($p < 0,05$). Estos hallazgos indican que existe una variabilidad significativa en el ancho de la hoja, atribuible a diferencias genéticas entre los genotipos estudiados. Esto sugiere que las diferencias observadas en el ancho de la hoja no son aleatorias, sino que reflejan variaciones intrínsecas entre los genotipos.

Tabla 11
Análisis de varianza del ancho de la hoja

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significancia
Entre grupos	5,03	2	2,51	3,31	0,03*
Dentro de grupos	567,24	746	0,76		
Total	572,28	748			

* Estadísticamente significativo.

Fuente: Elaboración propia (2025)

Por su parte la prueba de Tukey se utilizó para comparar las medias de cada grupo y subconjunto, evaluando si las diferencias entre ellos son estadísticamente significativas (Tabla 12). En el subconjunto 1, se observó que el criollo exhibió el ancho máximo de hoja más bajo, con un promedio de 7,91 centímetros. Además, se encontró una diferencia significativa ($p < 0,05$) entre el criollo y el forastero, indicando que el forastero presentó un ancho máximo de hoja superior en este subconjunto. Mientras que en el subconjunto 2, tanto el forastero como el trinitario, mostraron los mayores valores de ancho máximo de hojas con medias de 8,11 centímetros y 8,02 centímetros, respectivamente. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre el trinitario y el forastero en este subconjunto, ya que ambos grupos no presentaron diferencias estadísticamente significativas según la prueba.

Tabla 12

Prueba de Tukey para el del ancho de la hoja (cm)

Grupos	Número de datos	Subconjunto resultado de aplicar la prueba	
		1	2
Criollo	250	7,91bc	
Trinitario	250	8,02b	8,02ab
Forastero	250		8, 11a
Significancia		0,30	0,52

Fuente: Elaboración propia (2025)

Largo de la hoja

El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre los grupos genéticos de cacao (criollo, forastero y trinitario) en relación con el largo de la hoja (Tabla 13). Con un valor F de 4,408 y una significancia de 0,012 ($p < 0,05$), se concluye que hay variaciones significativas en las características morfológicas del cacao entre los diferentes grupos genéticos, específicamente en el tamaño de las hojas.

Tabla 13

Análisis de varianza para el largo de la hoja (cm)

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significancia
Entre grupos	13,18	2	6,59	4,40	0,01*
Dentro de grupos	1117,44	747	1,49		
Total	1130,62	749			

* Estadísticamente significativo.

Fuente: Elaboración propia (2025)

En cuanto a la prueba de Tukey ($p < 0,05$) (Tabla 14), esta reveló que en el subconjunto 2, no se apreciaron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos criollo y trinitario en cuanto al largo de las hojas, con valores medios de 20,41 cm y 20,44 centímetros, respectivamente, destacándose como los grupos con los mayores largos de hojas. En contraste, en el subconjunto 1, el grupo forastero mostró el valor medio más bajo con 20,14 centímetros, diferenciándose significativamente de los otros grupos.

En efecto, el grupo trinitario fue identificado como el mejor, con el valor medio más alto para la longitud de hojas alcanzando los 20,44 centímetros. Estos resultados son coherentes con el estudio de Gamboa-Tabares et al. (2021), donde se establece que todas las variedades evaluadas se encuentran dentro del rango normal de 20 cm a 35 cm de longitud y 4 cm a 15 cm de ancho de hoja, sugiriendo que estas variaciones son atribuibles a la interacción genotipo-ambiente y la posición de las hojas en el árbol; factores que influyen las características morfológicas del cacao amazónico como el tamaño de las hojas.

Tabla 14

Prueba de Tukey para el largo de la hoja (cm)

Grupos	Número de datos	Subconjunto resultado de aplicar la prueba	
		1	2
Criollo	250	20,14b	
Trinitario	250		20,41a
Forastero	250		20,44a

Significancia	1,00	0,976
---------------	------	-------

Fuente: Elaboración propia (2025)

Área foliar

El área foliar es un factor importante en la producción del cultivo de cacao, según lo respaldado por Leiva-Rojas et al. (2019). Este parámetro afecta significativamente el crecimiento, desarrollo y potencial de rendimiento biológico y agronómico entre las diferentes especies, subrayando la importancia de analizar y comprender las variaciones en el área foliar observadas entre los grupos estudiados.

Es así como en la prueba de Tukey para el área foliar (Tabla 15), se encontró que el grupo forastero presentó el mayor promedio con 107,58 cm², seguido por el trinitario con 106,94 cm² y el criollo con 105,72 cm². Esto coincide con hallazgos anteriores de Tezara et al. (2016), quienes destacaron que el cacao tipo criollo muestra mayor sensibilidad a la luz, destacando la importancia de cultivar estas variedades bajo sombra. Por su parte, Escalona (2013) sugiere que con relación al forastero podría existir una relación dependiente entre las dimensiones del largo y ancho de las hojas, lo cual podría explicar las diferencias significativas observadas en el tamaño del área foliar entre los grupos de cacao estudiados.

Tabla 15
Prueba de Tukey para el área foliar (cm²)

Grupos	Número de datos	Subconjunto resultado de aplicar la prueba 1
Criollo	250	105, 7221a
Trinitario	250	106, 947a
Forastero	250	107, 587a
Significancia		0,462

Fuente: Elaboración propia (2025)

Peso seco del área foliar

Según los resultados de la prueba de Tukey (Tabla 16), que comparó las medias del peso seco del área foliar, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos forastero y trinitario, con valores promedio de 1,24g. En contraste, el grupo criollo exhibió el valor más bajo con 1,23g, el cual no difirió significativamente de los otros dos grupos, con un nivel de significancia establecido en $p < 0,05$. Esto indica que, a pesar de las variaciones observadas, no se puede afirmar que existan diferencias significativas en el peso seco del área foliar entre el grupo criollo y los grupos forastero y trinitario en este estudio.

Tabla 16
Prueba de Tukey para el peso seco del área foliar (g)

Grupos	Número de datos	Subconjunto resultado de aplicar la prueba
		1
Criollo	250	1, 23a
Trinitario	250	1, 24a
Forastero	250	1, 24a
Significancia		0,606

Fuente: Elaboración propia (2025)

Largo por ancho de la hoja

De acuerdo con la prueba de Tukey con un nivel de significancia de $p < 0,05$, no se encontraron diferencias significativas en el subconjunto 1 entre los grupos estudiados (Tabla 17). A pesar de esto, se observó que los valores más altos de área de longitud x ancho (LA) de las hojas, corresponden al grupo trinitario y al forastero con 163,58 y 163,50 cm², respectivamente, lo que sugiere que podrían presentar similitudes morfológicas. En contraste, el grupo criollo mostró el valor más bajo con un promedio de 161,05 cm² de LA.

Tabla 17
Prueba de Tukey para el largo por ancho (cm²)

Grupos	Numero de datos	Subconjunto resultado de aplicar la prueba 1
Criollo	250	161,05
Trinitario	250	163,50
Forastero	250	163,58
Significancia		0,347

Fuente: Elaboración propia (2025)

Silueta de la hoja

Según los resultados de las pruebas de Tukey presentados en la Tabla 18, no se encontraron diferencias significativas en la silueta de las hojas entre los grupos genéticos de cacao evaluados. Los valores más representativos fueron observados en el grupo trinitario y el forastero, con medidas de 0,42 cm² y 0,37 cm², respectivamente. En contraste, el grupo criollo mostró el valor más bajo con 0,38 cm².

La falta de diferencias significativas entre los grupos trinitario y forastero podría indicar una similitud morfológica en la forma de las hojas de estos dos grupos genéticos. Esta similitud podría estar relacionada con adaptaciones genéticas compartidas o influencias ambientales que afectan la morfología de las hojas, tal como lo sugieren estudios previos sobre la variabilidad morfológica del cacao en diferentes condiciones ambientales (Sánchez-Mora et al., 2014; Suárez-Salazar et al., 2018).

Por otro lado, el grupo criollo mostró un valor significativamente menor en la silueta foliar en comparación con los grupos trinitario y forastero. Esto podría indicar diferencias en la forma y arquitectura de las hojas de este grupo genético, posiblemente asociadas a adaptaciones específicas o a la expresión de características morfológicas distintivas, como se ha reportado

en estudios de caracterización de cultivares criollos de cacao (Ventura & González, 2013).

Tabla 18
Prueba de Tukey para la silueta (cm²)

Grupos	Número de datos	Subconjunto resultado de aplicar la prueba 1
Criollo	250	107,45
Trinitario	250	109,00
Forastero	250	109,06
Significancia		0,380

Fuente: Elaboración propia (2025)

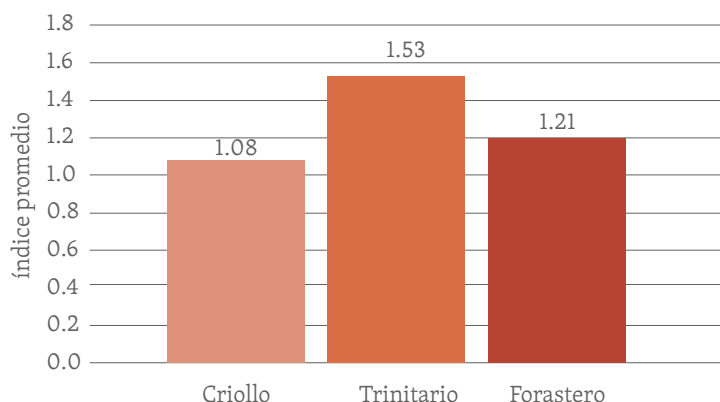
Componentes de rendimiento

Índice de semilla

La Figura 25 muestra que el grupo genético trinitario presentó el mayor índice de semilla promedio, con un valor de 1,53 g por grano. Según lo reportado por Sánchez-Mora et al. (2014), este resultado indica que los materiales de dicho grupo poseen un índice de grano superior o igual al rango considerado aceptable desde la perspectiva filogenética e industrial, que es de 1,0 g por grano. Por otro lado, el grupo forastero obtuvo un índice de semilla intermedio, mientras que el grupo criollo mostró el valor más bajo, de 1,08 g por grano. De acuerdo con Fedecacao (2015), la mayoría de los materiales trinitarios se caracterizan por tener un índice de grano superior o igual a 1,5 g, lo cual concuerda con los resultados observados para este grupo genético en el presente estudio.

Figura 25

Comparación de los índices de granos promedio por grupo genético



Fuente: Elaboración propia (2025)

Número de granos por mazorca

De acuerdo con los resultados de la prueba de Tukey ($p < 0,05$) presentados en la Tabla 19, se encontraron diferencias significativas en el número de granos por mazorca entre los grupos genéticos de cacao evaluados. El grupo trinitario presentó el mayor número, con un valor promedio de 37,84.

Por otro lado, los grupos forastero y criollo conformaron un subconjunto homogéneo, con valores más bajos de 31,8 y 32,44, respectivamente. Estos hallazgos concuerdan con lo reportado en la literatura, donde se indica que el número de semillas por mazorca es variable y está relacionado tanto con factores genéticos como ambientales (Vera-Chang et al., 2014).

Según Fedecacao (2015), un número de granos mayor a 46 por mazorca se considera superior, mientras que valores entre 36 y 45 son intermedios y menos de 35 granos por mazorca se clasifican como inferiores. En este sentido, el grupo trinitario se ubicaría en la categoría intermedia, mientras que los grupos forastero y criollo presentarían un número de granos por mazorca inferior.

Esto sugiere que el grupo trinitario podría tener un mayor potencial productivo en comparación con los otros grupos genéticos evaluados, al contar con mazorcas con mayor cantidad de semillas (Ramos-Ospino & Gómez-Álvarez, 2019).

Tabla 19
Prueba de Tukey para comparación de medias del número de grano por mazorca para cada grupo

Grupos	Número de datos	Subconjuntos obtenidos a la prueba	
		1	2
Criollo	50	32,44b	
Trinitario	50		37, 840a
Forastero	50	31,80b	
Significancia		0,946	1,00

Fuente: Elaboración propia (2025)

Diámetro polar y ecuatorial de la mazorca

El análisis estadístico realizado en el estudio se centró en evaluar el efecto de los grupos genéticos de cacao (criollo, trinitario y forastero) y los días después del marcaje sobre los componentes de rendimiento. El MANOVA mostró diferencias significativas entre los grupos genéticos y los días después del marcaje, así como en la interacción entre ambos factores, lo que indica que el comportamiento de los componentes de rendimiento a lo largo del tiempo varía entre los grupos genéticos evaluados. Asimismo, se encontraron efectos significativos del grupo genético y del tiempo en los diámetros polar y ecuatorial de la mazorca, confirmando la influencia de estos factores en la variabilidad de las dimensiones de las mazorcas de cacao (Tabla 20).

Tabla 20

Análisis multivariante del diámetro polar (TDIAP) y ecuatorial (TDAE) de las mazorcas en relación con el tiempo

Origen	Variable dependiente	Pruebas de efectos inter-sujetos						
		Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	Parámetro de no centralidad	Potencia observada
Modelo corregido	TDIAP	22,422	29	0,946	104,8	0,00	3040,39	1,00
	TDIAE	41,58	29	1,43	105,3	0,00	3053,66	1,00
Intersección	TDIAP	719,00	1	719,00	79718	0,00	79718,26	1,00
	TDIAE	223,82	1	223,82	16436	0,00	16436,09	1,00
Grupos	TDIAP	0,32	2	0,16	17,8	0,00	35,52	1,00
	TDIAE	0,04	2	0,02	1,5	0,21	3,06	0,32
Días después que marcó los árboles	TDIAP	27,03	9	3,00	333,1	0,00	2997,68	1,00
	TDIAE	41,42	9	4,60	338	0,00	3041,89	1,00
Grupos	TDIAP	0,06	18	0,004	0,399	0,98	7,18	0,28
Días después que marcó los árboles	TDIAE	0,11	18	0,007	0,484	0,96	8,70	0,35
Error	TDIAP	6,49	720	0,009				
	TDIAE	9,80	720	0,014				
Total	TDIAP	752,92	750					
	TDIAE	275,21	750					
Total corregido	TDIAP	33,916	749					
	TDIAE	51,38	749					

Fuente: Elaboración propia (2025). Nota. a. R al cuadrado = 0,809 para el diámetro polar de la mazorca, b. R al cuadrado = 0,809 para el diámetro ecuatorial de la mazorca, c. Se ha calculado el análisis utilizando un Alpha = 0,05.

Los resultados de la prueba de comparación de medias de Tukey para el diámetro polar de la mazorca (TDIAP), revelaron que el grupo genético forastero presenta un diámetro polar menor, en comparación con los grupos criollo y trinitario como lo indica su pertenencia a un subconjunto diferente, con un valor de significancia de 1,00. Por otro lado, no se encontraron diferencias significativas entre los diámetros polares de los grupos criollo y

trinitario, ya que ambos pertenecen al mismo subconjunto (Tabla 21). Estos hallazgos sugieren que, aunque el cacao forastero se diferencia en el diámetro polar de sus mazorcas, los grupos criollo y trinitario son similares en este aspecto.

Tabla 21
Prueba de comparación de medias de Tukey para el diámetro polar de la mazorca (TDIAP)

Grupos	Número de datos	Subconjunto obtenidos al prueba	
		1	2
Criollo	250		0, 9898a
Trinitario	250		0, 9973a
Forastero	250	0,9502b	
Significancia		1,00	0,654

Fuente: Elaboración propia (2025)

En cuanto al diámetro ecuatorial, los resultados de la prueba de comparación de medias de Tukey sugieren que los tres grupos genéticos de cacao no presentan diferencias significativas (Tabla 22). La similitud en las medias y el alto valor de significancia (0,191) respaldan la conclusión de que las variaciones observadas en los diámetros ecuatoriales entre estos grupos son estadísticamente insignificantes.

Tabla 22
Prueba de comparación de medias de Tukey para el diámetro ecuatorial de la Mazorca (TDIAP)

Grupos	Número de datos	Subconjunto resultado de aplicar la prueba	
		1	
Criollo	250	0, 5367a	
Trinitario	250	0, 5474a	
Forastero	250	0, 5548a	
Significancia		0,191	

Fuente: Elaboración propia (2025)

Es así como la significancia obtenida en el análisis multivariado, al evaluar el efecto del tratamiento (genotipo) y del tiempo (días

después del marcaje) sobre los diámetros del fruto, demuestra que ambos factores inciden en sus dimensiones a lo largo del desarrollo. Este resultado justifica el análisis del comportamiento de dichos diámetros desde el estadio 7 hasta la etapa de cosecha, correspondiente al estadio 8 de la escala de desarrollo BBCH.

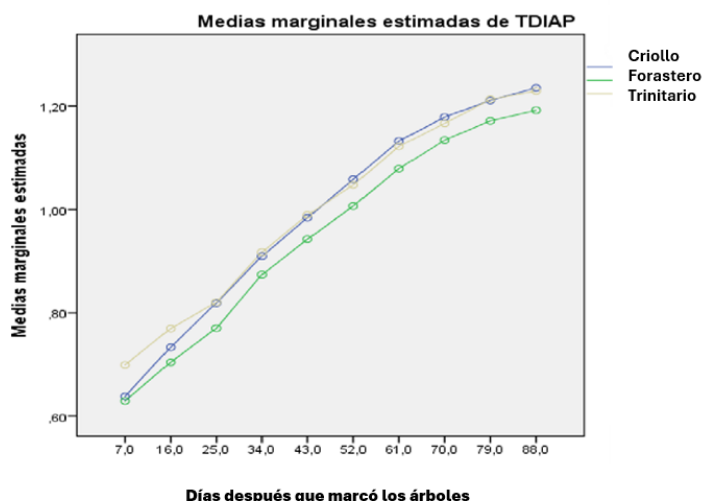
Es así como en relación con el diámetro polar, los grupos criollo y trinitario presentan valores marginales superiores con 1,23 y 1,22, respectivamente (Figura 26). Ambos grupos muestran un patrón de crecimiento de mazorca similar y constante a lo largo del tiempo, alcanzando hasta 21 cm en el día 88. Por su parte, el grupo forastero, aunque no difiere significativamente de los otros dos grupos, tiene el menor valor con diámetros que alcanzan los 18,6 cm.

López-Hernández et al. (2018) describen que el crecimiento de los frutos de cacao en longitud y diámetro ecuatorial se desarrolla en tres fases. La fase 2 es la más significativa, abarcando un período de crecimiento constante de frutos inmaduros que dura aproximadamente 75 días. Entre los días 50 y 90 después de la antesis, se observa el mayor crecimiento, caracterizado por un aumento exponencial en el tamaño del fruto. Durante esta etapa, el fruto alcanza el 80% de su tamaño final, mientras que el 20% restante se completa entre los días 100 y 130.

Adicionalmente, reportan que los frutos del grupo criollo presentan el mayor crecimiento longitudinal, alcanzando 27 cm en 150 días, sin embargo, en el presente estudio, se observó que el cacao trinitario obtuvo el mayor crecimiento en un menor tiempo, alcanzando una longitud de 23 cm en 120 días. En contraste, el cacao forastero mostró el menor crecimiento con 16 cm de longitud en 130 días, lo cual difiere de los resultados obtenidos en otros estudios.

Figura 26

Medias marginales estimadas del diámetro polar de la Mazorca (TDIAP).



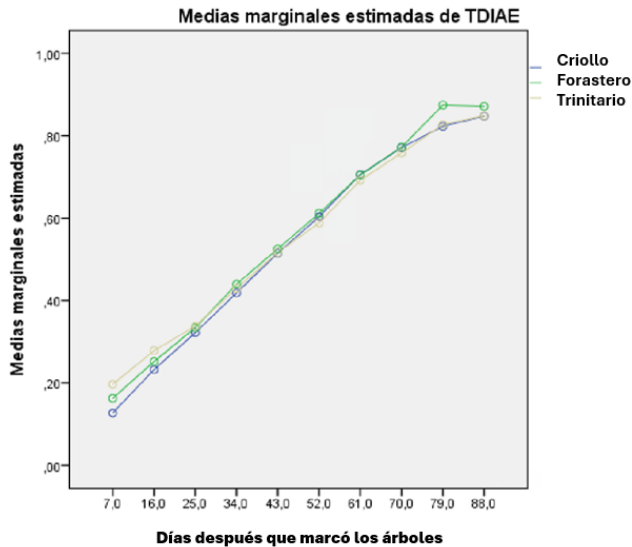
Fuente: Elaboración propia (2025)

Por su parte la Figura 27 muestra los diámetros ecuatoriales de las mazorcas, donde el grupo forastero obtuvo la mayor media marginal, con un valor de 0,871. Este grupo se destacó por presentar frutos con diámetros ecuatoriales de 9,6 cm (sin transformación), superando a los otros dos grupos. Se observa que los patrones son constantes y similares entre los tres grupos hasta el día 70, cuando el diámetro de las mazorcas del grupo forastero comienza a incrementarse significativamente.

Estos resultados coinciden con los de López-Hernández et al. (2018), donde el grupo forastero presentó el mayor diámetro ecuatorial, con un promedio de 8,6 cm, comparado con los grupos trinitario y criollo, que mostraron valores de 7,7 y 7,2 cm, respectivamente.

Figura 27

Medias marginales estimadas del diámetro ecuatorial de la mazorca (TDAE).



Fuente: Elaboración propia (2025)

Comparación del rendimiento entre grupos genéticos de cacao

El análisis de varianza (ANOVA) unidireccional comparó el rendimiento agrícola, el índice de mazorca y el número de granos por mazorca entre los grupos genéticos de cacao (criollo, trinitario y forastero), encontrando diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,01$) en todas las variables (Tabla 23).

De hecho, el grupo trinitario se destacó con el mejor rendimiento agrícola, un índice de mazorca más alto y un mayor número de granos por mazorca en comparación con los demás grupos. Es evidente que las características genéticas de dicho grupo son más favorables para la producción de cacao en las condiciones evaluadas.

Tabla 23*Resumen del ANOVA para variables productivas entre grupos genéticos de cacao*

Variables	Suma de cuadrado	gl	Media cuadrática	F calculado	Sig.
Rendimiento agrícola	122503,52	2	61251,76	36,95	0,00**
Índice de mazorca	377,17	2	188,58	14,20	0,00*
Número de granos por mazorca	1100,85	2	550,42	5,448	0,00**

Fuente: Elaboración propia (2025). Nota. $p < 0,01$

Por su parte, la prueba de Tukey ($p < 0.05$) (Tabla 24) reveló que el subconjunto 2, que incluye al grupo trinitario, mostró diferencias estadísticas significativas con respecto a los subconjuntos 1 (criollo) y 3 (forastero) en rendimiento e índice de mazorca. Esto indica que es más productivo, necesitando menos mazorcas por árbol para producir un kilogramo de cacao seco.

Igualmente, registró un rendimiento medio superior con 541.90 g de grano seco por árbol, mientras que los grupos criollo y forastero obtuvieron valores más bajos con 340.16 g y 362.12 g, respectivamente. Este hallazgo coincide con lo afirmado por Sánchez et al. (2019), quienes destacan un rendimiento superior en el grupo trinitario comparado con los grupos criollo y forastero. A pesar de estos resultados, el rendimiento agrícola del cacao en Colombia sigue siendo inferior al de otros productores como Costa de Marfil y Ghana, quienes superan en aproximadamente un 25% y 23%, respectivamente.

En relación con el índice de mazorca, el grupo trinitario también mostró el valor más bajo con 18 mazorcas por kilogramo de granos de cacao seco, lo que indica una eficiencia significativa en la producción. En contraste, los grupos forastero y criollo requirieron 27 y 29 mazorcas, respectivamente, para obtener un kilogramo de cacao seco. Es importante mencionar que el estándar

internacional para el índice de mazorca es de 25 mazorca por kilogramo de grano seco (Solís-Bonilla et al., 2015).

Tabla 24
Prueba de Tukey ($p < 0,05$) para la comparación de medias del rendimiento agronómico e índice de mazorca por grupo

Grupos	Número de datos	Rendimiento	
		Subconjunto obtenidos al prueba	
		1	2
Criollo	5	340,1600b	
Trinitario	5		541, 9000a
Forastero	5	362,1200b	
Significancia		0,679	1,00
		Índice de Mazorca	
		1	2
Criollo	5		29, 9632a
Trinitario	5	8,4789b	
Forastero	5		27, 9940a
Significancia		1,000	0,677

Fuente: Elaboración propia (2025)

Conclusiones

El grupo genético trinitario presentó el mayor índice de semilla promedio con 15,3 g por grano, seguido por el forastero con un valor intermedio y el criollo con el valor más bajo de 10,8 g por grano. Esto indica que el trinitario tiene un potencial productivo superior en términos de tamaño de grano, lo que es beneficioso tanto desde una perspectiva filogenética como industrial.

La prueba de Tukey mostró que el trinitario también destacó en el número de granos por mazorca con un promedio de 37,84, mientras que el forastero y el criollo tuvieron valores inferiores. Esto sugiere que el trinitario podría tener un mayor potencial productivo, alineándose con estándares internacionales que

consideran valores superiores a 46 granos por mazorca como altos.

No se encontraron diferencias significativas en la silueta de las hojas entre los grupos trinitario y forastero, aunque el criollo presentó el valor más bajo. En términos de área foliar, todos los grupos mostraron valores similares, con el trinitario y el forastero ligeramente superior al criollo.

El grupo trinitario mostró un rendimiento agronómico significativamente superior con 541,90 g de grano seco por árbol, en comparación con el criollo y el forastero. Este rendimiento superior también se reflejó en el índice de mazorca, donde el trinitario mostró la mayor eficiencia con 18 mazorcas por kilogramo de granos de cacao seco, frente a los índices más altos requeridos por los otros dos grupos.

El grupo forastero presentó un diámetro polar significativamente menor en comparación con criollo y trinitario, mientras que no se encontraron diferencias significativas en el diámetro ecuatorial entre los grupos.

Recomendaciones

Dado que los resultados del estudio indican que el grupo trinitario se destacó significativamente en términos de rendimiento, se recomienda enfocar la implementación en este grupo.

Implementar un método de fermentación controlado y estandarizado es esencial para asegurar la calidad de las semillas. La fermentación adecuada influye en el desarrollo de sabores y aromas deseables en el cacao.

Establecer un sistema de monitoreo continuo y manejo integrado de plagas y enfermedades. Esto incluye inspecciones periódicas para la detección temprana de plagas y enfermedades, así como el uso de prácticas culturales, biológicas y químicas para el control

efectivo de plagas y enfermedades, minimizando el impacto ambiental.

Proporcionar capacitación continua y asesoramiento técnico a los agricultores sobre las mejores prácticas de cultivo, recolección y procesamiento del cacao es esencial. Esto asegura que se sigan las recomendaciones adecuadas y se mantenga la calidad del producto final.



Referencias

Agronet, (2024). Estadísticas de producción de cacao en Colombia.

Aguilar, C., Guharay, F., Ávila, A., Campos, M., Camacho, A., & Pineda, C. (2013). *Aprendiendo e innovando sobre el manejo sostenible del cultivo de cacao en sistemas agroforestales*. Lutheran World Relief; SIMAS.

Alcaldía de Fortul (2024). Gestión y Trabajo Comunitario, Con Sentido de Pertenencia: Plan de Desarrollo Municipal 2024-2027. Fortul, Colombia.

Aldana García, M. (2001). El Injerto Lateral o Malayo: una práctica eficiente para la rehabilitación de árboles de cacao en Colombia.

Amador, C., Alvarado, A., Farah, S. & Martillo, J. (2022). Caracterización morfológica del cacao nacional “*Theobroma cacao* L.” del cantón Naranjal, Ecuador. *Revista Tecnológica-Espol*, 34(4), 80-97.

Andrade Sodré, G., & Sena Gomes, A. R. (2019). Cocoa propagation, technologies for production of seedlings. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 41(2), e-7821

Andrade, F, Andrade, J, Bonelli, L, Borrás, L, Caviglia, O, Cerrudo, A, Ciampitti, I, Cirilo, A, Correndo, A, D’Andrea, K, De la Vega, A, De Santa Eduvigis, J M, Di Matteo, J, Echarte, L, Ferreyra, J M, Galizia, L, Gambin, B, García, F, ... Hisse, I. (2023). *Ecofisiología y Manejo del cultivo de maíz*. INTA, CONICET, UBA, MAIZAR. 486 p.

Ballesteros, W., Lagos, T. C., & Ferney, H. (2015). Caracterización morfológica de árboles élite de cacao (*Theobroma cacao* L.) en

- Tumaco, Nariño, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 9(2), 313-328.
- Calderón Acuña, H. O., & Montes de Godoy, M. E. (2017). Micropropagación de variedades nativas de cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante embriogénesis somática. *Producción Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*, 6, 87-95.
- Carvajal-Campos, Paula, & Jiménez, Víctor M. (2021). Ingeniería genética contra estrés abiótico en cultivos neotropicales: osmolitos, factores de transcripción y CRISPR/Cas9. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 23(2), 47-66.
- Castaño M., A. M., Chica R., H. A., Obando B., D. & Riaño H. N. M. (2013) Arquitectura del dosel e interceptación de la radiación solar por tres especies forestales nativas en Colombia. *Cenicafé* 64 (1): 19-30. 2013
- Coe, S. D., & Coe, M. D. (2013). *The True History of Chocolate*. Thames & Hudson.
- De Wit, C. (1965). Photosynthesis of leave canopies. Center for Agricultural Publication and Documents, Wageningen, The Netherlands.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE (2024). Recuperado de anex-DCD-Proypoblacion-PertenenciaEtnicoRacialmun.xlsx (live.com)
- Dostert, N., Roque, J., Cano, A., La Torre, M. I., & Weigend, M. (2011). *Hoja botánica: Cacao*. Programa Desarrollo Rural Sostenible - GIZ
- Eisenach C & De Angeli A. (2017). Ion transport at the vacuole during stomatal movements. *Plant Physiology*, 174, 520-530.
- Esau, K. (1986). *Anatomía vegetal II*. Universidad de California, 727 pp.

- Escalona G., K. (2013). Evaluación del desarrollo y comportamiento de cuatro variedades de cacao (*Theobroma cacao* L.) con la aplicación de diferentes tipos de fertilizantes en un sistema agroforestal en la finca ULA, Estación Experimental Caparo, Barinas, Venezuela. Universidad de los Andes.
- Espíndola, R. S. (2021). *Formas de hacer injertos en vid*. AER Cauce - EEA San Juan INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). 13 p
- Fariborz, H., Liu, T., Folta, K. & Sarkhosh, A. (2022). Physiological, biochemical, and molecular aspects of grafting in fruit trees. *Horticulture Research*, 9.
- Federación Nacional de Cacaoteros - Fedecacao (2015). Guía Técnica para el cultivo del Cacao.
- Federación Nacional de Cacaoteros- Fedecacao. (2023). Informe anual de la Federación Nacional de Cacaoteros de Colombia.
- Fister, A. S., Landherr, L., Maximova, S. N., & Gultinan, M. J. (2018). Transient expression of CRISPR/Cas9 machinery targeting TcNPR3 enhances defense response in *Theobroma cacao*. *Frontiers in Plant Science*, 9, 268.
- Gallego A L. (2022). Mecanismos celulares y moleculares del injerto en plantas. Trabajo de grado en biotecnología. Facultad de Ciencias Biológicas y ambientales, Universidad de León, España.
- Gamboa-Tabares, J.-A., Rodríguez-Ortiz, J.-A., Gamboa-Tabares, A., Durán-Bautista, E.-H., & Rojas-Vargas, S. (2021). Evaluación agronómica de genotipos de *Theobroma cacao* L. en la Amazonia colombiana. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19 (1), 244-255.

- Gárate Navarro, M. A., Paz Urrelo, J. L., & Delgado Haya, H. (2020). Técnica de Propagación de Cacao (*Theobroma cacao* L.). Gobierno Regional de San Martín.
- Gutiérrez, A. (2020). Caracterización morfológica de tres genotipos criollos promisorios de *Theobroma cacao* L., en Panamá. *Ciencia Agropecuaria*, 30(1), 150-169.
- Inoue S & Kinoshita T. (2017). Blue light regulation of stomatal opening and the plasma membrane H⁺-ATPase. *Plant Physiology*, 174, 531-538.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2024). Características de la radiación solar (en línea). 1-16. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/caracteristicas-de-la-radiacion-solar->
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2017). *Manual técnico del cultivo de cacao: Prácticas latinoamericanas* M. A. Arvelo Sánchez, D. González León, S. Maroto Arce, T. Delgado López, & P. Montoya López. San José, C.R.: IICA.
- Jackson, J. & J. Palmer. (1979). A simple model of light transmission an interception by discontinuous canopies. *Annals of Botany* 44, 381-383.
- Jackson, W. (1980). *Nuevas raíces para la agricultura*. U of Nebraska Press.
- Jagoret, P., Saj, S. & Carimentrand, A. (2020). Cocoa agroforestry systems in Africa – the art of reconciling sustainable production and ecological services. Montpellier, CIRAD, Perspective 54.
- Jaimes Suárez, Y., Agudelo Castañeda, G., Báez Daza, E., Montealegre Bustos, F., Coronado, R., Rengifo Estrada, G. & Rojas Molina, J. (2022). *Modelo productivo para el cultivo de cacao*

- (*Theobroma cacao* L.) en el departamento de Boyacá. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosavia.
- Jaramillo, A R (2018). El clima de la caficultura en Colombia. Genicafe. 207 p.
- Jinek, M., Chylinski, K., Fonfara, I., Hauer, M., Doudna, J. A., & Charpentier, E. (2012). A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science*, 337(6096), 816-821.
- Jones, G. H. (1992). Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology. Cambridge, Great Britain: Cambridge university press: 428. Second Edition.
- Leiva-Rojas, E I, Gutiérrez-Brito, E E, Pardo-Macea, C J & Ramírez-Pisco, R. (2019) comportamiento vegetativo y reproductivo del cacao (*Theobroma cacao* L.) por efecto de la poda. *Rev. Fitotec. Mex.*, 42 (2), 137 – 146.
- Li, J, Terzaghi, W, Gong, Y, Li, C, Ling, J-J, Fan, Y, Qin, N, Gong, X, Danmeng Z, & Deng, X W. (2020). Modulation of BIN2 kinase activity by HY5 controls hypocotyl elongation in the light. *Nature Communications* ,11(1), 1592.
- Li, Z., Traore, A., Maximova, S., & Gultinan, M. J. (1998). Somatic embryogenesis and plant regeneration from floral explants of *Theobroma cacao* L. using thidiazuron. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 34(4), 293-299.
- Lázaro, A. Alejandro, Azpeitia-Morales, A., Sáenz-Carbonell, L., & Mirafuentes Hernández, F. (2015). Embriogénesis somática secundaria en el genotipo de cacao (*Theobroma cacao* L.) inifap 1 y su descripción histológica. *Nova Scientia*, 7(14), 398-417.
- López M., M.A., Chaves C., B. & Flórez R., V.J. (2011). Modelos de cultivos y modelos fenológicos. En: Flórez R., V.J. (Ed.). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en

- sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 153-177.
- López-Hernández, J. G., López-Hernández, L. E., Avendaño-Arrazate, C. H., Aguirre-Medina, J. F., Espinosa-Zagaroza, S., Moreno-Martínez, J. L., Mendoza-López, A., & Suárez-Venero, G. M. (2018). Biología floral de cacao (*Theobroma cacao* L.); Criollo, trinitario y forastero en México. *Agroproductividad*, 11(9), 129-135.
- Maximova, S. N., Alemanno, L., Young, A., Ferriere, N., Traore, A. y Guiltinan, M. J. (2002). Efficiency, genotypic variability, and cellular origin of primary and secondary somatic embryogenesis of *Theobroma cacao* L. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 38(3), 252-259.
- Microsoft Copilot. (2025). *Representación de un árbol, flor, hoja, semillas, tronco, ramas, raíz y plagas de cacao* [Imagen generada por IA]. Herramienta de IA de Microsoft. Imagen no recuperable.
- Mollericono Alfaro, M. D., & Calle Laime, E. E. (2021). Evaluación morfométrica de plantines de cacao (*Theobroma cacao* L.) y palta (*Persiana americana* Mill) en fase de vivero, Estación Experimental Sapecho. *Apthapi*, 7(3), 2229-2235.
- Monteith, J. L. (1965). Light Distribution and Photosynthesis in Field Crops. *Annals of Botany*, 29(113), 17-37.
- Montero M J (2022). Relación de la radiación solar con la producción de plantas: agroproductivas. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales, Bolivia*, 9(1), 52-66
- Mudge, K., Janick J., Scofield, S. & Goldschmidt, E. (2009). A history of grafting. *Horticultural Reviews*, 35, 437-93.

- Negaresh, S., & Marín, I. (2013). El cacao y la salud humana: propiedades antioxidantes del cacao nicaragüense y productos alimenticios comercializados. *Agroforestería en las Américas*, 49, 93-98.
- Nickrent, D. L. (2020) Parasitic angiosperms: How often and how many? *Taxon*, 69,5-7.
- Niklas KJ, Shi P, Gielis J, Schrader J & Niinemets Ü (2023) Editorial: Leaf functional traits: Ecological and evolutionary implications. *Frontiers in Plant Science*, 14,1169558.
- Norman, J.M. & Campell. G.S. (1989). Canopy structure. In: Pearcy, R. W. (ed). 391 Plant physiological ecology; field methods and instrumentation. Chapman and 392 Hall (U.K.). p. 302-325.
- Oficina de las Naciones Unidas Contra la Droga y el Delito (UNODC). (2020). Informe No. 23: Programa Nacional Integral de Sustitución de Cultivos Ilícitos (PNIS). Presidencia de la República de Colombia.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura- FAO (2024). Anuario estadístico sobre la producción de cacao.
- Osugi, A., Kojima, M., Takebayashi, Y., Ueda, N, Kiba, T, & Sakakibara, H. (2017). Systemic transport of trans-zeatin and its precursor have differing roles in Arabidopsis shoots. *Nature Plants* 3, 17112.
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., ... & Cornelissen, J. H. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61(3), 167-234
- Pinzón Useche, J. O., Rojas Ardila, J., Rojas, F., Ramírez, Ó. D., Moreno, F., & Antolinez Castro, G. (2011). *Guía técnica para el cultivo del cacao* (5ª ed.). Federación Nacional de Cacaoteros.

- Presilla, M. E. (2009). *The New Taste of Chocolate: A Cultural and Natural History of Cacao with Recipes*. Ten Speed Press.
- Pretty, J. (2008). Agricultural sustainability: concepts, principles, and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. B363447-465
- Queijeiro-Bolaños, M. E. & Carrillo-Ángeles, I. G. (2022) Las plantas parásitas y sus hospederos: una interacción compleja y menospreciada, Universidad Autónoma de Queretaro. *Boletín de la SCME*, 2 (7), 58- 67.
- Ramos-Ospino, A. D. C., & Gómez-Álvarez, M. S. (2019). *Caracterización fenotípica y genotípica de aislados de cacao (Theobroma cacao L.) de Dibulla, Guajira* (Tesis de Maestría en Biotecnología). Universidad Libre Seccional Barranquilla, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Rasool, A., Mansoor, S., Bhat, K, Hassan, G., Baba, T., Alyemeni, M., Alsahli, A., El-Serehy, H., Paray, B. & Ahmad, P. (2020). Mechanisms Underlying Graft Union Formation and Rootstock Scion Interaction in Horticultural Plants. *Frontiers in Plant Science*, 11, 590847.
- Restrepo Quiroz, T. I., & Urrego Posso, J. E. (2018.). Protocolo para la caracterización morfológica de árboles élite de cacao (*Theobroma cacao* L.). Compañía Nacional de Chocolates S.A.S.
- Rodríguez, M. W. (1997). Crop Physiology of the Greater Yam (*Dioscorea alata* L.). Stuttgart, Verlag Grauer, Universität Hohenheim, PhD Thesis. 151 p
- Ross, J. (1981) The radiation regime and architecture of plant stands. The Hague: Junk publishers. 391 p.
- Saavedra-Arbildo, R. P., Cárdenas-Salazar, H., Márquez-Dávila, K. J., Beraun-Cruz, Y., Carranza-Cruz, M. S., Hurtado-Gonzales, O. P., & Chia-Wong, J. A. (2017). Colecta y estudio de las

- características morfológicas y organolépticas en fruta fresca y licor de árboles de cacao (*Theobroma cacao* L.) con atributos de poseer características de fino y de aroma. En *Actas del Simposio Internacional de Investigación del Cacao* (pp. 1-11). Lima, Perú: ICCO.
- Sacristán, E. J. & Rojas, F. (2009). *Guía ambiental para el cultivo del cacao*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/11684>.
- Saeki, T. (1993). Light relations in plant communities. In: Evans L. (Editor). *Environmental control of plant growth*. New York, Academy Press. pp. 70-94.6
- Sáenz, B. & Cabezas, M. (2007). *Un acercamiento a la ecofisiología del cacao*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/772>.
- Sagar Kafle, CRISPR/CAS9: A new paradigm for crop improvement revolutionizing agriculture, (2023). *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 100484.
- Sánchez, V., Zambrano, J., Iglesias, C., Rodríguez, E., Villalobos, V., Díaz, F., & Camacho, A. (2019). La cadena de valor del cacao en América Latina y el Caribe (Informe FONTAGRO No. 57).
- Sánchez-Mora, F., Montufar, J. Z., Vera Chang, J., Ramos Remache, R., Gárces Fiallos, F., & Váscquez Montúfar, G. (2014). Productividad de clones de cacao tipo Nacional en una zona del bosque húmedo tropical de la provincia de Los Ríos, Ecuador. *Ciencia y Tecnología*, 34, 33-41.
- Shahid, S., Kim, G., Johnson, N. R., Wafula, E., Wang, F., Coruh, C., Bernal-Galeano, V., Phifer, T., DePamphilis, C. W., Westwood, J. H. & Axtell, M. J. (2018) "MicroRNAs from the parasitic plant *Cuscuta campestris* target host messenger RNAs", *Nature*, 553, 82-95.

- Shibles, R.M (1998). Crop Plant Physiology. Revised Edition. Department of Agronomy, Iowa State University. 244 p.
- Smith, M. E. (2012). *Aztec City-State Capitals*. University Press of Florida.
- Solís Bonilla, J. L., Zamarripa Colmenero, A., Pecina Quintero, V., Garrido Ramírez, E., & Hernández Gómez, E. (2015). Evaluación agronómica de híbridos de cacao (*Theobroma cacao* L.) para selección de alto rendimiento y resistencia en campo a moniliasis. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(1), 71-82.
- Somarrriba E J (2004). ¿Cómo hacerlo?, ¿Cómo evaluar y mejorar el dosel de sombra en cacaotales? *Agroforestería en las Américas* 41-42,122-130.
- Soto, E., Mendoza, P. & Aguilar, J. (2022). Manual de buenas prácticas agrícolas para el cultivo del cacao. Lima, Perú: IICA.
- Stegemann, S., & Bock, R. (2009). Exchange of genetic material between cells in plant tissue grafts. *Science*, 324 (5927), 649-651.
- Steward, D.W. y L.M. Dwyer. (1993). Mathematical characterization of maize canopies. *Agriculture Forest Meteo*. 66, 247-265.
- Suárez-Salazar, J. C., Melgarejo, L. M., Durán-Bautista, E. H., Di Rienzo, J. A., & Casanoves, F. (2018). Non-destructive estimation of the leaf weight and leaf area in cacao (*Theobroma cacao* L.). *Scientia Horticulturae*, 229, 19-24.
- Takahashi, F, Suzuki, T, Osakabe, Y, Betsuyaku, S, Kondo, Y, Dohmae, N., Fukuda, H., Yamaguchi-Shinozaki, K & Shinozaki, K. (2018). A small peptide modulates stomatal control via abscisic acid in long-distance signaling. *Nature*, 556, 235-238.
- Tezara, W., Urich, R., Jaimez, R., Coronel, I., Araque, O., Azócar, C., & Chacón, I. (2016). Does Criollo cocoa have the same

- exophysiological characteristics as Forastero? *Botanical Sciences*, 94(3), 563-574.
- Thomas, HR & Frank, MH (2019). Connecting the pieces: Uncovering the molecular basis for long-distance communication through plant grafting. *New Phytologist*, 223(2), 582-589.
- Universidad de los Llanos & Gobernación de Arauca. (2019). Formulación e Implementación del Plan de Ordenamiento Departamental de Arauca. Informe técnico final Análisis de diagnóstico del esquema de ordenamiento territorial (EOT) del municipio de Fortul” Convenio interadministrativo 532 de 2016. Villavicencio – Colombia.
- Ventura, M. & González, A. (2013). Selección de árboles de cacao (*Theobroma cacao* L.) por características de rendimiento e indicadores de calidad. *Revista Agropecuaria y Forestal APF*, 2(1), 65-68.
- Vera Chang, J., Vallejo Torres, C., Párraga Moran, D., Morales Rodríguez, W., Macías Véliz, J. & Ramos Remache, R. (2014). Atributos físicos-químicos y sensoriales de las almendras de quince clones de cacao nacional (*Theobroma cacao* L.) en el Ecuador. *Ciencia y Tecnología*, 7(2), 21-34.
- Verhagen, A M W, Wilson, J H, & Britten, E J (1963). Producción de plantas en relación con la iluminación del follaje. *Annals of Botany*, 27(4), 627-640.
- Watkins J M, Chapman J M, & Muday G K. (2017). Absciscic acid-induced reactive oxygen species are modulated by flavonols to control stomata aperture. *Plant Physiology*, 175, 1807-1825.
- Watson, D. J. (1947). Comparative physiological studies in the growth of field crops. 1: Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, 11, 41-76.

- Weiss, M., Baret, F., Smith, G. J., Jonckheere, I. & Coppin, P. (2004). Review of methods for *in situ* leaf area index (LAI) determination. Part II. Estimation of LAI, errors, and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 37–53.
- Westwood J, Yoder J, Timko M, & de Pamphilis C. (2010). The evolution of parasitism in plants. *Trends in Plant Science*, 15(4), 227-235.
- Yzarra Tito, W. J. & López Ríos, F. M. (2017). *Manual de observaciones fenológicas*. Ministerio del Ambiente, Servicio de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Ministerio de Agricultura, Dirección General de Competitividad Agraria, Dirección de Información Agraria.
- Zarrillo, S., Gaikwad, N., Lanaud, C., Powis, T., Viot, C., Lesur, I. & Blake, M. (2018). The use and domestication of *Theobroma cacao* during the mid-Holocene in the upper Amazon. *Nature Ecology & Evolution*, 2(12), 1879-1888.
- Zhao, H. & Wolt, J. D. (2017). Risk associated with off-target plant genome editing and methods for its limitation. *Emerging Topics in Life Sciences*, 1(2), 231–240.

Glosario

A

Afloramiento floral: Proceso en el que las yemas florales emergen y se desarrollan en estructuras reproductivas visibles.

Alometría: Relación proporcional entre el crecimiento de diferentes órganos de la planta (ej. tallo y fruto), usada para entender patrones de desarrollo.

Antocianina: Pigmento vegetal con propiedades antioxidantes, responsable de la coloración rojiza o púrpura en algunas partes del fruto.

ANOVA (Análisis de Varianza): Técnica estadística para determinar si hay diferencias significativas entre medias de distintos grupos o tratamientos.

B

Biomasa: Masa total de materia orgánica producida por una planta o parte de ella (raíces, tallo, hojas, frutos).

Botánica sistemática: Ciencia que clasifica las plantas de acuerdo con sus características morfológicas, genéticas y evolutivas.

C

Caracteres morfoagronómicos: Rasgos físicos y productivos de interés agronómico como forma del fruto, peso del grano o número de semillas.

Cámara estaminal: Estructura floral que rodea los estambres y protege las anteras en algunas especies como el cacao.

Clon: Individuo genéticamente idéntico a su planta madre, producido por reproducción vegetativa.

Coefficiente de Variación (CV): Medida estadística de dispersión que indica la variabilidad relativa respecto a la media.

Conductancia estomática: Medición del paso de gases (vapor de agua y CO₂) a través de los estomas.

Correlación fenotípica: Relación estadística entre dos o más características observables en una planta.

Criollo: Variedad genética de cacao considerada de alta calidad, pero de menor rendimiento y resistencia.

D **Densidad de siembra:** Número de plantas por unidad de superficie, que influye en la competencia por luz, agua y nutrientes.

E **Ecotipo:** Grupo dentro de una especie adaptado genéticamente a condiciones ecológicas específicas.

Embrión: Parte de la semilla que contiene el futuro individuo vegetal en estado latente.

Endospermo: Tejido que nutre al embrión durante su desarrollo; en el cacao, influye en la calidad del grano.

Estaminodio: Estructura estéril parecida a un estambre que puede estar presente en la flor del cacao.

F **Fenología:** Estudio del ciclo de vida de las plantas en relación con factores climáticos (ej. floración, fructificación).

Fermentación: Proceso bioquímico postcosecha que transforma la pulpa del cacao y desarrolla los precursores del sabor.

Fitotecnia: Conjunto de técnicas agronómicas aplicadas para mejorar el rendimiento y calidad de los cultivos.

Flor hermafrodita: Flor que posee órganos reproductivos masculinos (estambres) y femeninos (carpelo) al mismo tiempo.

G **Genotipo:** Composición genética de un organismo, que determina sus características heredables.

Germinación: Proceso por el cual una semilla se activa y da origen a una nueva planta.

Grano de cacao: Semilla que, tras la fermentación y el secado, se utiliza para elaborar productos derivados como el chocolate.

H **Heliófila:** Planta que requiere altos niveles de luz solar para su desarrollo óptimo.

Hibridación: Cruce genético entre dos plantas de diferente origen para combinar características deseadas.

I **Índice de masa foliar (IMF):** Relación entre el área foliar total y la biomasa aérea de la planta.

Inflorescencia: Conjunto de flores dispuestas sobre un mismo eje o estructura de soporte.

L **Lignificación:** Proceso de endurecimiento de tejidos vegetales por acumulación de lignina, característico de tallos leñosos.

Lípidos: Compuestos orgánicos grasos presentes en el grano de cacao que influyen en su calidad industrial.

M **Mucílago:** Sustancia viscosa y azucarada que rodea las semillas frescas de cacao; clave en la fermentación.

Mutagénesis: Proceso de alteración del material genético que puede inducir variaciones útiles en programas de mejoramiento.

P **Poda:** Técnica agrícola para eliminar partes de la planta con el fin de mejorar su arquitectura, productividad o sanidad.

Polinización cruzada: Transferencia de polen entre flores de plantas diferentes, necesaria para la fecundación en variedades autoincompatibles.

Pulpa: Parte carnosa y azucarada del fruto que envuelve los granos, fundamental en la fermentación.

R **Rendimiento agrícola:** Cantidad de producto obtenido por unidad de superficie (por ejemplo, kg/ha).

Resistencia genética: Capacidad heredada de una planta para defenderse contra enfermedades o plagas.

S **Semilla con testa:** Semilla que conserva su cubierta exterior protectora, comúnmente evaluada en estudios agronómicos.

Sombrío: Sistema de cultivo en el que se utilizan árboles para proporcionar sombra al cacao, simulando su hábitat natural.

Surcos primarios: Estrías visibles en la superficie del fruto del cacao, utilizadas como descriptor morfológico.

T **Testa:** Cubierta externa de la semilla, también llamada tegumento, que la protege del entorno.

Tolerancia abiótica: Capacidad de una planta para soportar condiciones no vivas adversas, como sequía o salinidad.

V

Variabilidad genética: Diferencias en la composición genética entre individuos de una población, esenciales para el mejoramiento.

Vigor vegetativo: Intensidad y velocidad de crecimiento de una planta, indicador clave en evaluaciones agronómicas.



Autores

Enrique Quevedo García, Ph.D.

Investigador en el área de fisiología de cultivos, manejo de arvenses y sistemas de producción agrícolas sostenibles. Ingeniero agrónomo con maestría en Ciencias Agrarias con énfasis en fisiología de cultivos y doctorado en Ciencias Naturales para el desarrollo, énfasis en sistemas de producción agrícola. Investigador asociado categorizado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) y director del Grupo de investigación en Ganadería y Agricultura Sostenible (GIAS) categorizado en A1 por la misma institución. Tiene experiencia en la evaluación de parámetros morfofisiológicos, de calidad, manejo de arvenses y de producción agronómica de cultivos de duraznero de bajo requerimiento de frío en la montaña santandereana. Vinculado a la Universidad de Pamplona como profesor titular en los programas de Ingeniería Agronómica y las maestrías en Ciencias Agrarias y Extensión y Desarrollo Rural.

 <https://orcid.org/0000-0001-9465-8126>

Giovanni Orlando Cancino Escalante, Ph.D.

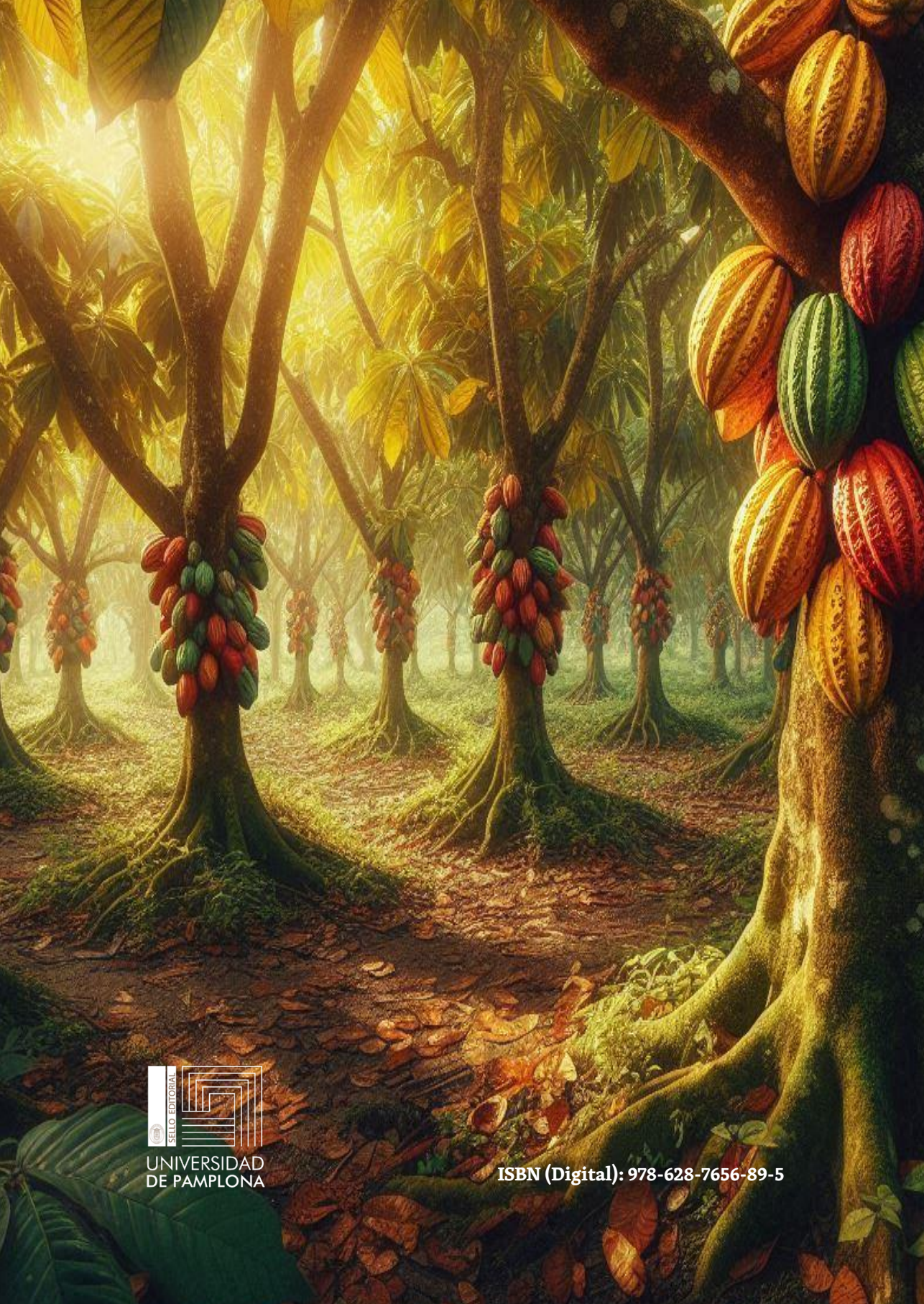
Docente del programa de Biología adscrito a la Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad de Pamplona. Cuenta con una sólida formación académica y una destacada trayectoria en el ámbito científico, que incluye el título de biólogo otorgado por la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá, Colombia) y un doctorado en Ciencias con énfasis en Biotecnología Vegetal, obtenido en la University of Nottingham (Reino Unido). Es investigador asociado reconocido por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) de Colombia y se desempeña como director del Grupo de Investigación en Biotecnología Vegetal de la Universidad de Pamplona, desde donde lidera proyectos orientados al avance del conocimiento en biotecnología aplicada a sistemas vegetales.

 <https://orcid.org/0000-0002-3812-1129>

Oscar Olimpo Blanco Blanco, I.A.

Ingeniero agrónomo egresado de la Universidad de Pamplona. Cuenta con más de cuatro años de experiencia en la planificación y gestión de procesos agrícolas, trabajando en diversos cultivos con enfoque en eficiencia productiva y sostenibilidad. Su formación y vocación están profundamente ligadas al campo ya que proviene de una familia de agricultores. A lo largo de su carrera, se ha especializado en la optimización de cultivos, toma de decisiones estratégicas y liderazgo de equipos técnicos, destacándose por su compromiso, responsabilidad y orientación a resultados. Su labor se centra en brindar asistencia técnica, mejorar procesos y generar soluciones innovadoras que aporten al desarrollo del sector agropecuario. Actualmente, se desempeña como asesor técnico en la región de Santander, acompañando a pequeños y medianos productores en la mejora continua de sus prácticas agrícolas.

 <https://orcid.org/0009-0001-2303-8103>



UNIVERSIDAD
DE PAMPLONA

ISBN (Digital): 978-628-7656-89-5