

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



**CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO Y CRECIMIENTO DE *Guazuma crinita*
(BOLAINA BLANCA) BAJO SISTEMAS AGROFORESTALES EN EL DISTRITO
DE LUYANDO**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO FORESTAL

PRESENTADO POR:

COTRINA DORIA, JHONNY JESUS

Tingo María – Perú

2025



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°043-2026-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 16 de abril de 2025, a horas 10:00 a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería en Forestal de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

**“CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO Y CRECIMIENTO DE *Guazuma crinita*
(BOLAINA BLANCA) BAJO SISTEMAS AGROFORESTALES EN EL DISTRITO DE
LUYANDO”**

Presentado por el Bachiller: **COTRINA DORIA, JHONNY JESUS** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO FORESTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 29 de Abril de 2026


Ing. M. Sc. **RAÚL ARAUJO TORRES**
PRESIDENTE


Ing. MSc. **JOSÉ ANTONIO DIONISIO ARMAS**
MIEMBRO


Ing. MSc. **GUNTER DAZA PANDURO**
MIEMBRO


Dr. **DAVID PRUDENCIO QUISPE JANAMPA**
ASESOR





"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 140 - 2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

Ingeniería Forestal

Tipo de documento:

Tesis	<input checked="" type="checkbox"/>	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	-------------------------------------	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO Y CRECIMIENTO DE <i>Guazuma crinita</i> (BOLAINA BLANCA) BAJO SISTEMAS AGROFORESTALES EN EL DISTRITO DE LUYANDO	COTRINA DORIA, JHONNY JESUS	07 % Siete	0 % Cero

Tingo María, 04 de mayo de 2026.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO
ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO Y CRECIMIENTO DE *Guazuma crinita* (BOLAINA BLANCA) BAJO SISTEMAS AGROFORESTALES EN EL DISTRITO DE LUYANDO

Autor	: COTRINA DORIA, Jhonny Jesus
Asesor	: Dr. QUISPE JANAMPA, David Prudencio
Programa de Investigación	: Gestión de bosques y plantaciones forestales
Línea de investigación	: Biomasa y ecología forestal
Eje temático	: Coberturas vegetales
Lugar de Ejecución	: Centro Poblado Supte San Jorge, distrito de Luyando, provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco, Perú.
Duración	: 6 meses
Financiamiento	: S/. 3,400,10
Propio	: Si
Otros	: No

Tingo María - Perú, 2026

DEDICATORIA

*A Dios, por concederme la sabiduría, la paciencia y la fortaleza para culminar esta etapa.
A mi padre, Marcelo Cotrina Herrera, por su inmenso amor, su ejemplo y la dedicación
brindada a lo largo del tiempo, que me inspiran cada día a ser mejor.*

*A mi madre, Adelaida Doria Faustino, que desde el cielo guía mis pasos y me acompaña en
cada logro. Su amor, sus enseñanzas y su ejemplo de fortaleza han sido la inspiración que me
impulsó a alcanzar este sueño. Este título es para ti, mamá: todo lo que soy y lo que he logrado
te lo debo a ti.*

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva y a los docentes de la Facultad de Recursos Naturales Renovables por su valiosa contribución científica, cultural y social. Al Ing. M.Sc. Cleide Santos Flores, por su asesoría en el trabajo de investigación; gracias por su paciencia y confianza.

Al Dr. David Prudencio Quispe Janampa, por su apoyo durante la sustentación. Finalmente, a mi familia por su apoyo constante, y a mis compañeros por su amistad y por acompañarme en cada etapa de mi formación profesional.

INDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Marco teórico	3
2.1.1. Sistemas agroforestales.....	3
2.1.2. Propiedades químicas del suelo	3
2.1.3. Carbono orgánico del suelo y calidad del suelo en sistemas agroforestales ..	4
2.1.4. Distribución vertical del COS y profundidad de referencia (0–30 cm).....	5
2.1.5. Agroforestería, aporte de biomasa y dinámica del carbono del suelo	5
2.1.6. Métodos de determinación del COS y consideraciones del método Walkley– Black	6
2.1.7. Crecimiento, productividad e IMA en plantaciones y sistemas agroforestales	6
2.2. Estado del arte.....	7
2.1.1. Internacional	7
2.1.2. Nacional.....	8
2.1.3. Regional.....	9
III. MATERIALES Y METODOS	11
3.1. Lugar de ejecución.....	11
3.1.1. Ubicación política.....	11
3.1.2. Ubicación geográfica	11
3.1.3. Condiciones climáticas	11
Figura 1. Climograma del área de estudio durante el año 2025 (temperatura media mensual y precipitación mensual).....	12
3.1.4. Área de estudio	12
3.1.5. Instalación de transectos y mediciones dendrométricas	12
Figura 2. Distribución de los 12 transectos y subparcelas de muestreo para carbono del suelo.	13
3.2. Materiales.....	14
3.2.1. Materiales y equipos	14
3.3. Metodología	14
3.3.1. Carbono orgánico del suelo	14
3.3.2. Crecimiento de <i>Guazuma crinita</i>	16

3.3.3. Relación del carbono orgánico del suelo y crecimiento	17
3.4. Enfoques de la investigación	18
3.4.1. Población, muestra y tipo de muestreo	18
3.4.2. Tipo de investigación	18
3.4.3. Nivel de investigación	18
3.4.4. Diseño de investigación.....	18
3.4.5. Variables	19
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
V. CONCLUSIONES.....	32
VI. PROPUESTA A FUTURO	33
VII. REFERENCIAS	34
ANEXO	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Coordenadas UTM y altitud del área de estudio.	11
2. Características del muestreo y esfuerzo de medición en <i>Guazuma crinita</i> (bolaina blanca)	13
3. Carbono orgánico del suelo (COS) por transecto y profundidad (0-10, 10-20 y 20-30 cm) y COS total (0-30 cm) en el sistema agroforestal.	21
4. Estadística descriptiva del COS (t/ha) según profundidad orgánico del suelo (COS) según transecto y profundidad	22
5. Estadística descriptiva general de las variables dasométricas.....	24
6. Resumen de muestreo e indicadores dasométricos de <i>Guazuma crinita</i> (bolaina blanca) en los 12 transectos evaluados.....	25
7. Incremento Medio Anual (IMA) por transecto	25
8. Estadística descriptiva sobre el incremento Medio Anual (IMA) por transecto	26
9. Matriz de correlación de Pearson entre las variables IMA y COS de <i>Guazuma crinita</i> (n = 12)	29
10. Registro dendrométrico de <i>Guazuma crinita</i> (bolaina blanca) por transecto: diámetro, DAP, área basal (AB) y altura comercial (HC).	40
11. Resultados de la prueba de Shapiro-Wilk para las variables IMA y COS (n = 12)	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Climograma del área de estudio durante el año 2025 (temperatura media mensual y precipitación mensual).....	12
2. Distribución de los 12 transectos y subparcelas de muestreo para carbono del suelo.....	13
3. Carbono orgánico del suelo (COS) según transecto y profundidad	20
4. Variación del carbono orgánico del suelo total (0-30 cm) por transecto. Los valores representan la suma de COS en 0-10, 10-20 y 20-30 cm	21
5. Promedio del COS (t/ha) según profundidad orgánico del suelo.....	22
6. Diagramas de caja del Incremento Medio Anual (IMA) en diámetro (DAP) y altura total (HT) de <i>Guazuma crinita</i> por transecto.	27
7. Diagramas de caja del Incremento Medio Anual (IMA) del área basal (AB) y del volumen comercial (VC) de <i>Guazuma crinita</i> por transecto.	28
8. Corplot de la matriz de correlación de Pearson IMA de <i>Guazuma crinita</i> y carbono orgánico del suelo	30
9. Gráficos Q-Q de normalidad para las variables IMA y COS de <i>Guazuma crinita</i> . La línea roja indica la distribución normal teórica esperada. Se muestran los estadísticos W y p-valor de la prueba de Shapiro-Wilk para cada variable.....	43
10. Medición del diámetro a la altura del pecho (DAP) de <i>Guazuma crinita</i> (bolaina blanca) en el sistema agroforestal cacao–bolaina (trabajo de campo).....	43
11. Muestreo de suelo por estratos de profundidad (0–10, 10–20 y 20–30 cm) mediante cilindro de volumen conocido en el sistema agroforestal cacao–bolaina (trabajo de campo).....	44
12. Delimitación y registro del punto de muestreo de suelo en campo para la colecta de muestras por profundidad en el sistema agroforestal cacao–bolaina.....	44
13. Medición de variables dendrométricas en <i>Guazuma crinita</i> (bolaina blanca): altura total con telémetro y DAP con cinta diamétrica en el sistema agroforestal cacao–bolaina.....	45
14. Medición de altura total de <i>Guazuma crinita</i> (bolaina blanca) mediante telémetro digital durante el trabajo de campo en el sistema agroforestal cacao–bolaina.....	45
15. Rotulado y embolsado de muestras de suelo recolectadas para el análisis de carbono orgánico en el sistema agroforestal cacao–bolaina.....	46
16. Preparación y registro de muestras de suelo en el Laboratorio de Análisis de Suelos de la UNAS para la determinación de carbono orgánico (método Walkley–Black).	46
17. Pesaje de muestras de suelo en balanza analítica para la determinación de densidad aparente y carbono orgánico en el laboratorio.....	47

18. Área de estudio en el sistema agroforestal cacao–bolaina del centro poblado Supte San Jorge (Luyando), donde se realizó el muestreo de suelo y la evaluación dendrométrica de *Guazuma crinita*.
..... 47

RESUMEN

La investigación evaluó el carbono orgánico del suelo (COS) y el crecimiento de *Guazuma crinita* (bolaina blanca) en un sistema agroforestal cacao - bolaina del centro poblado Supte San Jorge, distrito de Luyando (Leoncio Prado, Huánuco). Se establecieron 12 transectos de 4 m × 25 m (0.12 ha) y se evaluaron 118 individuos de *G. crinita* (plantación de 5 años). El muestreo de suelo se realizó en un punto por transecto a tres profundidades (0–10, 10–20 y 20–30 cm); el COS se determinó mediante el método de Walkley–Black en el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) – Pucallpa, en un laboratorio de ensayos acreditado por INACAL-DA (registro N.º LE-200), y se estimó el stock por horizonte y total. El crecimiento se evaluó con variables dendrométricas (DAP y altura), a partir de las cuales se calcularon área basal, volumen comercial e incrementos medios anuales (IMA). Los resultados mostraron una disminución del COS con la profundidad, con predominio del almacenamiento en el estrato superficial y variabilidad espacial entre transectos. El crecimiento de *G. crinita* evidenció heterogeneidad entre individuos y transectos, siendo más variable en los indicadores derivados (área basal y volumen). La correlación de Pearson no evidenció una asociación estadísticamente significativa entre el COS total (0–30 cm) y los indicadores de crecimiento, sugiriendo la influencia de otros factores del sistema (competencia, manejo y condiciones locales de sitio) sobre la dinámica del crecimiento.

Palabras clave: carbono orgánico del suelo; sistemas agroforestales; *Guazuma crinita*; correlación de Pearson.

ABSTRACT

In the research, the organic carbon in the soil (COS – acronym in Spanish) and the growth of *Guazuma crinita* (bolaina blanca) were evaluated in agroforestry systems of cacao and bolaina, in the town of Supte San Jorge in the Luyando district of Leoncio Prado, Huánuco, [Peru]. Twelve 4 m × 25 m (0.12 ha) transects were established and 118 specimens of *G. crinita* were evaluated (five year old plantation). The soil sampling was done at one point per transect at three depths (0–10, 10–20 and 20–30 cm); the COS was determined using the Walkley-Black method at the Pucallpa Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA – acronym in Spanish), in a laboratory with trials [that were] accredited by the INACAL-DA (acronym in Spanish) (record number LE-200), and the stock was estimated by horizon and the total. The growth was evaluated with dendrometry variables (DBH (DAP in Spanish) and height), from which, the base area, commercial volume and annual average increases (IMA – acronym in Spanish) were calculated. The results revealed a decrease of the COS with the depth, where the superficial stratum predominated in the storage and spatial variability between transects. The growth of *G. crinita* evidenced heterogeneity between specimens and transects, with the most variability being for the derived indicators (base area and volume). There was no evidence from the Pearson correlation of a statistically significant association between the total COS (0-30 cm) and the indicators of growth, suggesting the influence of other factors from the system (competency, management and local site conditions) on the dynamic of the growth.

Keywords: organic carbon in the soil, agroforestry systems, *Guazuma crinita*; Pearson correlation.

I. INTRODUCCIÓN

En la provincia de Leoncio Prado, los sistemas agroforestales cacao–bolaina se han consolidado como una alternativa productiva para mejorar ingresos y mantener cobertura arbórea en paisajes intervenidos. Sin embargo, la intensificación del uso del suelo, la reducción de la cobertura orgánica superficial y prácticas de manejo que favorecen la degradación edáfica (remoción frecuente, baja incorporación de residuos, compactación) pueden disminuir el carbono orgánico del suelo (COS), afectando su estructura, fertilidad y capacidad de retención de agua y nutrientes. Esta situación repercute en la productividad del sistema y en el desempeño del componente forestal, ya que el crecimiento de la bolaina blanca (*Guazuma crinita*) depende, entre otros factores, de la calidad del suelo y del microambiente generado por el manejo del SAF. En el ámbito local, existe limitada evidencia cuantitativa sobre cómo se distribuye el COS en el perfil del suelo y cómo se relaciona con el crecimiento de la bolaina dentro de sistemas cacao–bolaina.

A pesar de la importancia del COS como indicador de calidad del suelo y como reserva clave para la mitigación del cambio climático, en el distrito de Luyando no se cuenta con información suficiente que describa su contenido por profundidad y su posible relación con el crecimiento de *G. crinita* en SAF cacao–bolaina. En consecuencia, el problema de investigación se expresa en la siguiente pregunta: ¿Cuál es el contenido de carbono orgánico del suelo (0–10, 10–20 y 20–30 cm) y cómo se relaciona con el crecimiento de bolaina blanca (*Guazuma crinita*) bajo sistemas agroforestales del centro poblado Supte San Jorge, distrito de Luyando?

El estudio es relevante porque genera información técnica que sustenta decisiones de manejo orientadas a conservar y mejorar la calidad del suelo en sistemas cacao–bolaina. La cuantificación del COS por profundidad aporta una línea base para evaluar el estado del recurso edáfico y su potencial de almacenamiento de carbono. Asimismo, relacionar el COS con indicadores de crecimiento de bolaina permite comprender mejor la productividad del componente forestal y orientar prácticas silvícolas y de manejo del suelo. Los resultados contribuyen a la gestión sostenible del SAF, fortalecen la planificación productiva y aportan evidencia local útil para iniciativas de conservación y mitigación climática.

La investigación cuantifica el carbono orgánico del suelo en tres profundidades (0–10, 10–20 y 20–30 cm), evalúa el crecimiento de bolaina blanca mediante variables dendrométricas e indicadores derivados (área basal y volumen), y analiza la correlación entre el COS total y el crecimiento en los transectos establecidos dentro del sistema cacao–bolaina. Los resultados permiten describir patrones y asociaciones bajo las condiciones locales evaluadas,

constituyendo una base para recomendaciones de manejo y para futuros estudios que incorporen mayor número de unidades y evaluaciones en el tiempo.

Objetivo general

- Evaluar el carbono orgánico del suelo y el crecimiento de *Guazuma crinita* (bolaina blanca) bajo sistemas agroforestales del distrito de Luyando

Objetivos específicos

- Cuantificar el contenido y el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) por horizonte (0–10, 10–20 y 20–30 cm) en sistemas agroforestales.
- Determinar el crecimiento de bolaina blanca (*Guazuma crinita*) mediante DAP y altura, y estimar los incrementos medios anuales (IMA) en DAP, altura, área basal y volumen en los sistemas agroforestales.
- Analizar la correlación (Pearson) entre el carbono orgánico del suelo (COS) y los incrementos medios anuales (IMA) de bolaina blanca (*Guazuma crinita*) en sistemas agroforestales.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales (SAF) constituyen formas de uso de la tierra que integran deliberadamente especies leñosas (árboles y/o arbustos) con cultivos agrícolas y, en algunos casos, con animales, dentro de una misma unidad de manejo, con arreglos espaciales y temporales definidos. Este tipo de sistema busca generar beneficios productivos y ambientales a partir de las interacciones entre sus componentes, tales como mejora de la cobertura del suelo, reciclaje de nutrientes y diversificación de productos (Becerra, 2018; EURAF, 2020). En el contexto de sistemas basados en cacao, los árboles asociados pueden cumplir funciones como sombra, provisión de biomasa y contribución a la conservación del suelo, lo cual puede influir en la dinámica de materia orgánica y carbono del suelo.

Desde una perspectiva de manejo, los SAF se orientan a optimizar la producción y, simultáneamente, mantener o mejorar la calidad del recurso edáfico mediante la incorporación de residuos vegetales, reducción de la erosión y regulación del microclima del suelo, aspectos vinculados con la sostenibilidad del sistema productivo (Becerra, 2018; De los Ángeles et al., 2016).

2.1.1.1. Clasificación de los sistemas agroforestales

La clasificación de los SAF facilita su análisis y comparación, considerando principalmente los componentes biológicos presentes y el arreglo espacio-temporal de dichos componentes (Mosquera-Losada et al., 2009). En este marco, es útil distinguir entre sistema, tecnología y práctica agroforestal: el sistema se define por el conjunto de componentes integrados; la tecnología describe la disposición específica en el espacio y el tiempo; y la práctica se refiere al manejo local y particular aplicado a un arreglo agroforestal (Elliot, 2015; Ospina, 2001). Esta diferenciación permite describir con mayor precisión los sistemas cacao-maderables, donde el cultivo principal se asocia a especies arbóreas con funciones productivas y ecológicas.

2.1.2. Propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas del suelo describen la disponibilidad de nutrientes y condiciones que regulan la nutrición vegetal y los procesos de transformación en el suelo. Entre los principales indicadores se incluyen el pH, la conductividad eléctrica (CE) y

los nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, así como bases intercambiables y capacidad de intercambio catiónico, según el análisis realizado (Tarazona et al., 2020).

La conductividad eléctrica (CE) se relaciona con la concentración de sales solubles en la solución del suelo y permite evaluar la presencia de sales disueltas que pueden influir en el crecimiento vegetal, especialmente en condiciones de acumulación salina (Rázuri et al., 2005). El pH regula la disponibilidad de nutrientes y la solubilidad de elementos, influyendo en la nutrición y en la actividad biológica del suelo (Parra, 2003).

El nitrógeno es un elemento clave asociado al crecimiento vegetal y a la formación de tejidos, y su disponibilidad depende de la mineralización de la materia orgánica y de procesos microbianos del ciclo del nitrógeno (Perdomo & Barbazán, 2016). El fósforo participa en procesos energéticos y metabólicos, siendo frecuentemente limitante en suelos tropicales; su disponibilidad depende del material parental, el pH y la interacción con minerales del suelo (DICTA, 2016). El potasio contribuye al metabolismo, transporte de solutos y resistencia fisiológica, y su absorción depende de humedad, aireación y disponibilidad en la fracción intercambiable (Andrades & Martínez, 2014; Del Rey, 2019).

Finalmente, la materia orgánica (asociada al COS) influye en la disponibilidad de nutrientes y en la estabilidad del suelo. Su disminución suele reflejar degradación del suelo y necesidad de prácticas que restituyan aportes orgánicos (Andrades & Martínez, 2014).

2.1.3. Carbono orgánico del suelo y calidad del suelo en sistemas agroforestales

El carbono orgánico del suelo (COS) es la fracción de carbono contenida en la materia orgánica del suelo, derivada de residuos vegetales y animales en distintos estados de descomposición, biomasa microbiana y compuestos generados por la actividad biológica. Se considera un indicador clave de la calidad edáfica porque participa directamente en el funcionamiento del suelo, al mejorar propiedades físicas (estructura, agregación y porosidad), químicas (capacidad de intercambio catiónico asociada a la materia orgánica) y biológicas (actividad microbiana), influyendo en la fertilidad y productividad del sistema (Martínez et al., 2008; FAO, 2017).

En sistemas agroforestales, el COS está determinado por factores como el tipo de cobertura, el aporte de hojarasca y raíces, el manejo de residuos y el grado de disturbio del suelo, además de las condiciones del sitio. En general, tiende a concentrarse en los horizontes superficiales debido al mayor ingreso de materia orgánica y a una actividad biológica

más intensa, y disminuye con la profundidad por la menor incorporación de residuos y menor dinámica biológica (Gutiérrez-Castorena et al., 2016). Desde el enfoque ambiental, los suelos actúan como reservorios importantes de carbono; por ello, prácticas que conservan cobertura y reducen la perturbación pueden favorecer el secuestro de carbono, mientras que el incremento del disturbio y la pérdida de cobertura orgánica pueden acelerar su disminución (Blanco et al., 2018; IPCC, 2006). En este sentido, evaluar el COS por profundidad permite describir el estado del suelo y su potencial de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales.

La determinación del COS se realiza mediante métodos analíticos como la oxidación húmeda (por ejemplo, Walkley–Black) o la combustión seca, que permiten estimar el contenido de carbono orgánico y analizar variaciones asociadas al manejo y al uso del suelo (Echeverría et al., 2014).

2.1.4. Distribución vertical del COS y profundidad de referencia (0–30 cm)

La distribución del COS en el perfil del suelo suele presentar una estratificación vertical, con mayores contenidos en el horizonte superficial y disminución progresiva con la profundidad, dado que el ingreso directo de residuos orgánicos y la mayor actividad microbiana se concentran en la superficie (Gutiérrez-Castorena et al., 2016; Camargo, 2018). Por ello, la profundidad 0–30 cm es ampliamente utilizada en evaluaciones de carbono del suelo como referencia práctica para describir el “topsoil”, facilitar comparaciones y analizar el efecto del manejo sobre el carbono superficial (FAO, 2017; IPCC, 2006). En sistemas agroforestales, esta estratificación puede intensificarse dependiendo de la cobertura, la cantidad de biomasa retornada al suelo y el nivel de disturbio del horizonte superficial (Wang et al., 2022).

2.1.5. Agroforestería, aporte de biomasa y dinámica del carbono del suelo

La agroforestería se define como el manejo integrado de especies leñosas con cultivos agrícolas (y en algunos casos animales) dentro de una misma unidad de producción, con el propósito de beneficiarse de sus interacciones ecológicas y productivas (EURAF, 2020; Becerra, 2018). En arreglos como cacao–maderables, los árboles asociados pueden aportar biomasa al suelo mediante hojarasca y raíces, modular el microclima (sombra y humedad) y promover procesos que influyen sobre la acumulación o conservación del COS, lo cual es relevante para la sostenibilidad del sistema (Sánchez, 2016; CIFOR-ICRAF, 2021). Estudios en sistemas agroforestales con cacao han mostrado que el suelo puede representar una fracción importante del carbono total del sistema y que la estructura del dosel (densidad, área

basal y diversidad arbórea) se relaciona con diferencias en el almacenamiento (Poveda et al., 2013; Hernández et al., 2021).

2.1.6. Métodos de determinación del COS y consideraciones del método Walkley–Black

La cuantificación del COS se realiza mediante métodos analíticos que permiten estimar el contenido de carbono orgánico del suelo, siendo frecuentes la combustión seca y la oxidación húmeda (Echeverría et al., 2014). El método de Walkley–Black (oxidación húmeda) se utiliza ampliamente en laboratorios por su aplicabilidad en análisis rutinarios, aunque su recuperación puede depender del tipo de suelo y del procedimiento analítico empleado, por lo que su interpretación debe realizarse considerando el contexto metodológico del laboratorio (FAO, 2020). En estudios comparativos, el uso consistente del método facilita el análisis de patrones de COS por profundidad y entre unidades de muestreo bajo un mismo protocolo (Camargo, 2018).

2.1.7. Crecimiento, productividad e IMA en plantaciones y sistemas agroforestales

El crecimiento de los árboles es un proceso biológico que se manifiesta mediante incrementos en diámetro, altura y volumen, y responde a la interacción entre la genética de la especie, la edad, la competencia y las condiciones del sitio (Pretzsch, 2009; Picard et al., 2012). Para su evaluación se emplean variables dendrométricas como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total, el área basal y el volumen, las cuales permiten describir la estructura y la productividad del componente forestal (Salas et al., 2016).

En plantaciones jóvenes, el análisis del crecimiento se complementa con el incremento medio anual (IMA), indicador que resume el crecimiento promedio por año durante un periodo determinado y facilita la comparación entre unidades de muestreo o condiciones de sitio. La evidencia muestra que la edad y la competencia influyen significativamente en los incrementos, observándose con frecuencia mayores respuestas en etapas tempranas de desarrollo y variación asociada a la densidad y a la disponibilidad de recursos (Michela et al., 2015; Picard et al., 2012). En sistemas agroforestales, el crecimiento del componente forestal puede estar condicionado por el microclima generado por el dosel (sombra), la competencia intraespecífica, el manejo y la disponibilidad de nutrientes y propiedades del suelo, por lo que no siempre se espera una relación directa entre el COS total y los incrementos de crecimiento (Angulo, 2014; Calderón-Medina et al., 2018).

2.2. Estado del arte

2.1.1. Internacional

En Mesetas, Meta (Colombia), Hernández et al. (2021) compararon bosque y sistemas agroforestales (cacao, café y silvopastoriles), cuantificando carbono en biomasa, necromasa y suelo a partir de 44 parcelas. Reportaron diferencias altamente significativas entre usos del suelo, donde el bosque almacenó 216.6 t C/ha, superando a los SAF, lo que sustenta que la capacidad de almacenamiento depende del tipo de cobertura y estructura del sistema.

En Tibacuy, Cundinamarca (Colombia), Sánchez (2016) evaluó suelos en SAF cafeteros bajo tres niveles de sombra (alta, media y baja) y encontró que el sistema con sombra media registró el mayor almacenamiento de COS (182.1 t C/ha), seguido de sombra alta (121.0 t C/ha) y sombra baja (109.9 t C/ha); además, la respiración del suelo fue mayor en sombra media y se relacionó con la humedad, evidenciando que el dosel modifica el microclima y la dinámica del carbono.

En Chaco (Argentina), Michela et al. (2015) estudiaron plantaciones juveniles de *Prosopis alba* de 4, 5 y 7 años, con distintas distancias de siembra, midiendo diámetro y altura para estimar IMA. Encontraron que las plantaciones de 4 y 5 años presentaron incrementos mayores que las de 7 años, destacando la influencia de la edad y la competencia en el crecimiento.

En Líbano, Tolima (Colombia), Alvarado et al. (2013) compararon el COS en tres sistemas de café (monocultivo, SAF con nogal y SAF con plátano), midiendo densidad aparente y concentración de COS con cinco repeticiones por sistema. Reportaron que el almacenamiento de COS en los primeros 30 cm se mantuvo en un rango similar (50–54 t C/ha) entre sistemas, aunque la densidad aparente fue ligeramente menor en el SAF con plátano, indicando que no siempre se observan diferencias marcadas de COS por tipo de arreglo.

En el Himalaya Garhwal (India), Singh et al. (2018) compararon usos del suelo y reportaron densidades aparentes menores bajo arreglos agroforestales con árboles (aprox. 1.25–1.28 g/cm³) y mayores en suelos agrícolas (aprox. 1.41–1.45 g/cm³), mostrando que la cobertura arbórea suele asociarse a mejor condición física del suelo.

En Waslala, Nicaragua, Poveda et al. (2013) evaluaron 50 SAF con cacao y estimaron que el sistema almacenó alrededor de 91.45 t C/ha, con el suelo como el componente dominante (aprox. 52.61% del total). Identificaron grupos con distintos contenidos

de carbono asociados a variables del dosel (diversidad, densidad y área basal), reforzando que la estructura del componente arbóreo influye en el almacenamiento.

En Xinjiang (China), Wang et al. (2022) analizaron la conversión de tierras agrícolas a huertos y agroforestería, encontrando aumentos del carbono orgánico total en el suelo de 26.4 a 49.2 Mg C/ha y del carbono lábil de 5.2 a 11.3 Mg C/ha, concentrados principalmente en los primeros 30 cm, destacando que fracciones lábiles responden más rápido al manejo.

En una terraza alta del Meta (Colombia), Calderón-Medina et al. (2018) compararon bosque, SAF y pradera y mostraron que el SAF puede presentar mejoras químicas específicas, pero también limitantes físicas como densidad aparente elevada (1.34 g/cm³ en 0–10 cm y 1.46 g/cm³ en 10–20 cm), lo que sugiere que la compactación puede condicionar procesos del suelo y crecimiento.

En la zona del Pacífico de Nicaragua, Moreno y Navorio (2004) evaluaron suelos en cafetales bajo sombra y evidenciaron que la presencia de especies acompañantes y el manejo influyen en fertilidad: sistemas con leguminosas presentaron mayores contenidos de materia orgánica (18.46–22.9%) y mejores condiciones químicas que sistemas sin leguminosas, resaltando la importancia del manejo y cobertura.

En el Valle del Rift, Etiopía, Negash et al. (2015) evaluaron sistemas agroforestales autóctonos y reportaron que el COS representó una proporción mayoritaria del carbono total (aprox. 52–91%), con valores de COS entre 109 y 253 Mg C/ha, destacando que el manejo del productor influye más que el tipo de sistema.

2.1.2. Nacional

En el Bosque Alexander von Humboldt, Pucallpa (Ucayali), Angulo (2014) evaluó la productividad de *Cedrelinga cateniformis* bajo distintas condiciones de sitio (faja y fisiografía), reportando mejores resultados en fajas de 5 m y fisiografía ondulada, y señalando que variables edáficas como el pH pueden influir en el crecimiento, lo que apoya la discusión sobre factores distintos al COS que condicionan el desempeño forestal.

En el CIPTALD–Tulumayo, distrito Pueblo Nuevo (Huánuco), Estrada (2023) comparó cinco sistemas de uso (arroz, capirona, teca, cacao y pasto kikuyo) con edades desde meses hasta décadas, cuantificando carbono en suelo, hojarasca y raíces. Encontró que sistemas con especies forestales tendieron a acumular más carbono en suelo/hojarasca y que coberturas herbáceas acumulan más en raíces, aportando un marco regional comparativo para

interpretar el carbono en sistemas productivos.

En la Amazonía peruana, Vásquez-Miñope et al. (2023) evaluaron plantaciones de teca de 5 años, registrando altos incrementos en diámetro y altura y un incremento volumétrico medio de 16.109 m³/ha/año, útil para discutir el comportamiento de crecimiento en plantaciones jóvenes (aunque sea otra especie).

En el Bosque Reservado de la UNAS, Rupa Rupa (Leoncio Prado, Huánuco), Condor (2019) evaluó el COS por unidades fisiográficas y por profundidades 0–10, 10–20 y 20–30 cm, reportando variaciones entre unidades y resultados que permiten contrastar metodológicamente el muestreo por horizonte usado en tu investigación.

En Cullpa, Huancayo (Junín), Camargo (2018) evaluó carbono orgánico en plantaciones de *Alnus acuminata*, pastizal y suelos agrícolas, utilizando Walkley–Black y profundidades mayores (0–60 cm), encontrando el patrón típico de disminución del carbono con la profundidad, útil para sustentar la tendencia vertical observada en tu perfil 0–30 cm.

En Uchiza (San Martín), Santos (2023) comparó usos del suelo y reportó mayor carbono del suelo en el sistema agroforestal (26.09 t/ha) frente a pastura (20.11 t/ha) y otros usos, reforzando el rol del SAF en el almacenamiento de carbono edáfico.

En Madre de Dios, Schwartzmann (2019) comparó un SAF de 10 años con un pastizal degradado y reportó mejoras en estructura y fertilidad del suelo en el SAF, incluyendo menor densidad aparente (1.27 vs 1.43 g/cm³) y mayor materia orgánica (3.12% vs 1.04%), mostrando efectos positivos de la cobertura arbórea en suelos degradados.

2.1.3. Regional

En condiciones amazónicas regionales, Gaonoa (2014) evaluó supervivencia y crecimiento de varias especies forestales y mostró que sitios con mayor materia orgánica y nitrógeno favorecieron el desempeño de ciertas especies, resaltando el papel del suelo y el manejo en el crecimiento forestal.

En el distrito José Crespo y Castillo (Huánuco), Pocomucha et al. (2016) evaluaron sistemas agroforestales con cacao y reportaron que el carbono total se distribuyó entre biomasa aérea y suelo, evidenciando la importancia del componente edáfico como reservorio relevante en sistemas cacaoteros regionales.

En Hermilio Valdizán (Huánuco), Jara (2016) comparó SAF cacao y SAF café y reportó valores de carbono del suelo distintos entre arreglos, señalando que las

condiciones del sitio y el manejo pueden modificar el almacenamiento, útil para discutir variabilidad del COS entre unidades.

En Cora Cora, Luyando (Huánuco), Huamán (2021) evaluó la calidad del suelo en agroforestal, coca y bosque y reportó limitaciones químicas (materia orgánica y nutrientes en niveles bajos) y variaciones de pH, lo que permite discutir que el crecimiento puede estar condicionado por nutrientes y propiedades químicas específicas, además del COS.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Lugar de ejecución

3.1.1. Ubicación política

El estudio se desarrolló en un sistema agroforestal, ubicado en el distrito de Luyando, provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco (Perú). El muestreo de suelo se realizó en el centro poblado de Supte San Jorge, en los transectos previamente establecidos dentro del cultivo de cacao asociado con bolaina blanca (*Guazuma crinita*). Las muestras recolectadas se trasladaron al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) – Pucallpa, al laboratorio de ensayos acreditado por el Organismo Peruano de Acreditación (INACAL-DA), con registro N.º LE-200, donde se determinó el carbono orgánico del suelo, considerando tres profundidades del perfil (0-10, 10-20 y 20-30 cm), en concordancia con los objetivos específicos del estudio.

3.1.2. Ubicación geográfica

En la Tabla 2 se presenta la ubicación geográfica del área de estudio, expresada en coordenadas UTM (WGS84, zona 18S) y su altitud.

Tabla 1. Coordenadas UTM y altitud del área de estudio.

Descripción	Valor
Sistema de coordenadas	UTM (WGS84), zona 18S
Este (E)	0360626
Norte (N)	9029472
Altitud	668 m s.n.m.

3.1.3. Condiciones climáticas

Durante el año 2025, el área de estudio presentó un clima cálido y húmedo, caracterizado por una temperatura media anual de 24.2 °C y una precipitación anual acumulada de 2755.8 mm. La temperatura se mantuvo relativamente estable a lo largo del año, con valores mensuales cercanos a 23.9–24.7 °C, lo que evidencia baja estacionalidad térmica.

En contraste, la precipitación mostró una estacionalidad marcada. Los mayores registros se concentraron entre enero y marzo (\approx 323–406 mm) y se observó un nuevo incremento hacia octubre - diciembre (223–319 mm). El período relativamente menos lluvioso ocurrió entre junio y agosto, destacando agosto como el mes con menor precipitación (64.7 mm). En conjunto, el comportamiento pluviométrico durante 2025 confirma condiciones húmedas predominantes, con una disminución temporal de las lluvias en la mitad del año de acuerdo con SENAMHI (2020). Conforme a la clasificación bioclimática de Holdridge (1967),

SENAMHI (2017) caracteriza la zona como Bosque Muy Húmedo Premontano Tropical (bmh-PT).

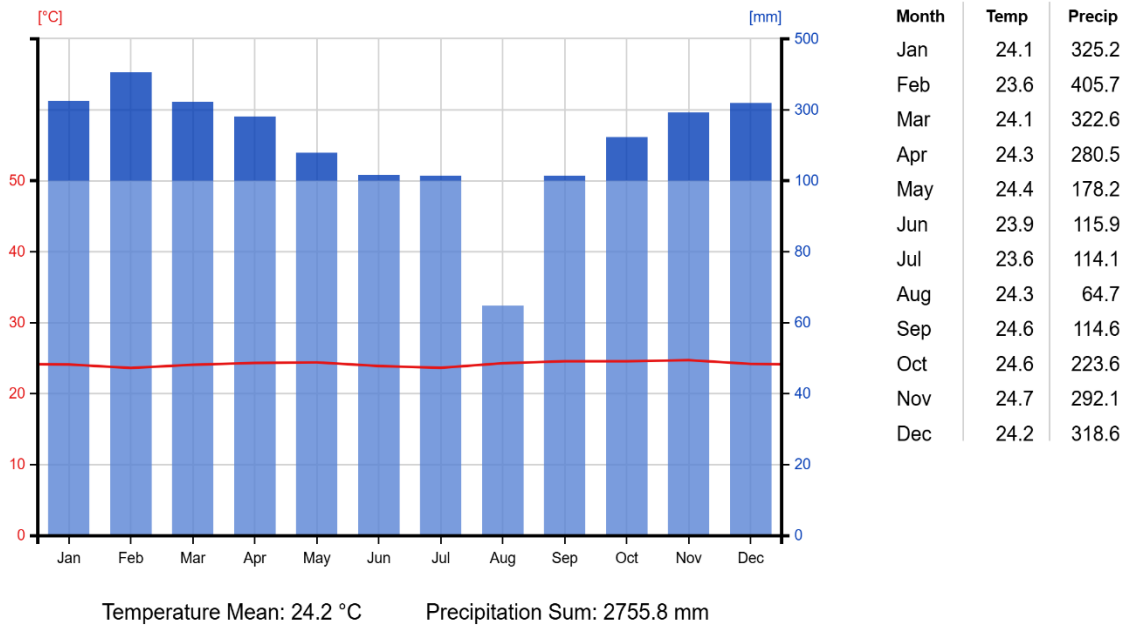


Figura 1. Climograma del área de estudio durante el año 2025 (temperatura media mensual y precipitación mensual)

3.1.4. Área de estudio

Las parcelas se ubicaron en una zona con presencia de sistemas agroforestales (SAF) de cacao con bolaina blanca (*Guazuma crinita*), donde el uso del suelo estuvo orientado principalmente a la producción. La cobertura boscosa remanente fue reducida y fragmentada, limitada a pequeñas superficies dispersas. En conjunto, el área reflejó una matriz productiva con alta intervención antrópica, con predominio del manejo agroforestal cacao – bolaina blanca.

3.1.5. Instalación de transectos y mediciones dendrométricas

Para la evaluación del componente forestal del sistema agroforestal cacao – bolaina blanca, se instalaron 12 transectos rectangulares de 4 m × 25 m (100 m²) dentro del área de estudio, distribuidos de manera estratégica para representar las condiciones predominantes del sitio (cobertura, manejo y variación local). En conjunto, el área efectivamente muestreada sumó 1200 m² (0.12 ha).

Dentro de cada transecto se realizó el registro y medición de todos los individuos de bolaina blanca (*Guazuma crinita*) presentes de 5 años de edad con un método de plantación de 3 x3 metros, obteniéndose un total de 118 árboles evaluados. Las mediciones

dendrométricas incluyeron el diámetro a la altura del pecho (DAP, 1.30 m), determinado con cinta diamétrica y expresado en centímetros, y la altura total, medida con telémetro digital y expresada en metros. Con base en estas variables, se calcularon indicadores dasométricos como área basal y volumen comercial, y posteriormente se estimaron los incrementos medios anuales (IMA) correspondientes, según las ecuaciones establecidas en la metodología. La Tabla 3 presenta el esfuerzo de muestreo (número de transectos, área total muestreada y número de individuos evaluados) y un resumen de los principales indicadores dasométricos obtenidos a partir de las mediciones de DAP y altura para bolaina blanca en los transectos instalados.

Tabla 2. Características del muestreo y esfuerzo de medición en *Guazuma crinita* (bolaina blanca)

Indicador	Valor
Número total de transectos	12
Área total muestreada	1200 m ² (0.12 ha)
Número total de árboles evaluados (<i>G. crinita</i>)	118
Promedio de árboles por transecto	9.83
Densidad estimada	983.33 árboles/ha
Área basal total en el muestreo	1.9077 m ²
Espaciamiento equivalente	3 x3 m

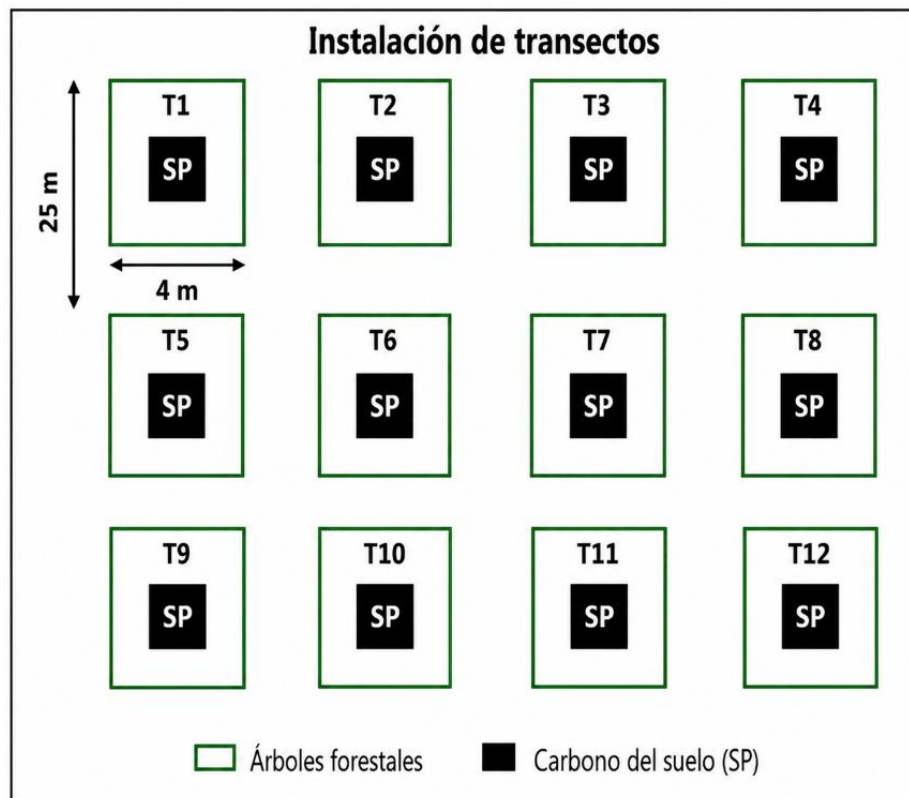


Figura 2. Distribución de los 12 transectos y subparcelas de muestreo para carbono del suelo.

3.2. Materiales

3.2.1. Materiales y equipos

Trabajo de campo: para la instalación y evaluación del componente forestal en el sistema agroforestal cacao - bolaina se emplearon estacas de madera, martillo, wincha/flexómetro y marcadores para la delimitación de los 12 transectos (4 m × 25 m). Para las mediciones dendrométricas se utilizó una cinta diamétrica para el registro del DAP (1.30 m) y un telémetro digital Forestry Pro II para la medición de la altura total. Asimismo, durante las actividades de campo se contó con equipos de protección personal (EPP).

Para el muestreo de suelo se utilizaron cilindros de volumen conocido (tubo muestreador), una tabla de apoyo y martillo para facilitar la extracción; además, se emplearon bolsas de papel, etiquetas y marcadores para el rotulado y transporte de las muestras.

Trabajo de laboratorio: en el laboratorio se emplearon tamices de 2 mm para la preparación de las muestras, espátulas y material básico de laboratorio. Para la determinación de densidad aparente y el secado de muestras se utilizó una estufa Memmert UF110 (105 °C) y una balanza digital Cavory EK5055. Los reactivos y materiales analíticos necesarios se utilizaron para la determinación de carbono orgánico del suelo mediante el método de Walkley-Black (y para los análisis químicos del suelo según el protocolo del laboratorio).

3.3. Metodología

3.3.1. Carbono orgánico del suelo

a) Muestreo de suelo para determinar el carbono orgánico del suelo

El estudio se realizó en sistemas agroforestales. Previamente se efectuó un reconocimiento del área para identificar y seleccionar las unidades experimentales, y posteriormente se establecieron los 12 transectos de 4 m × 25 m, distribuidos para representar las condiciones del sistema.

En cada transecto del sistema agroforestal se seleccionó al azar una subparcela (un punto de muestreo), como se muestra en la Figura. En dicha subparcela se tomaron muestras de suelo a tres profundidades: 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm. La extracción se realizó con un cilindro de volumen conocido, facilitándose el ingreso y retiro mediante un martillo y una pequeña tabla. Para cada profundidad se recolectaron tres submuestras, las cuales se homogenizaron para conformar una muestra compuesta. Posteriormente, se almacenaron

aproximadamente 500 g de la muestra compuesta en bolsas de papel y se transportaron al laboratorio para su análisis.

Para estimar el carbono orgánico del suelo, primero se determinó la densidad aparente por profundidad, secando las muestras a 105 °C hasta peso constante, siguiendo a Rüginitz et al. (2009). Posteriormente, el carbono orgánico se determinó mediante Walkley–Black.

b) Cálculo de la densidad del suelo, el peso y volumen

El carbono orgánico del suelo se determinó según Rüginitz et al. (2009): se calculó la densidad aparente, se secaron las muestras a 105 °C y se aplicó el método de Walkley-Black o la combustión seca.

$$DA \text{ (g/cc)} = PSN/VCH$$

Donde:

- DA = Densidad aparente (g/cc)
- PSN = Peso seco del suelo en el cilindro
- VCH = Volumen del cilindro (constante)

Para estimar la masa del volumen de suelo en cada horizonte de muestreo, se aplicó la ecuación:

$$PVs \text{ (t/ha)} = DA \text{ (g/cm}^3\text{)} \times Ps \text{ (cm)} \times 0.01$$

Donde:

- PV = Peso del volumen del suelo (t/ha)
- DA = Densidad aparente
- Ps = Espesor o profundidad del horizonte del suelo
- 0.01 = Constante

c) Cantidad de carbono orgánico almacenado en el suelo

Para determinar el carbono almacenado en el suelo, se empleó el método de Walkley y Black, mediante el cual se obtuvo en laboratorio el porcentaje de materia orgánica (%MO). Posteriormente, la cantidad de carbono almacenado en el suelo se calculó utilizando la ecuación correspondiente.

$$CS \text{ (t/ha)} = (PVs \times \%C)/100$$

Donde:

CS = Carbono en el suelo (t/ha)

PVs = Peso del volumen del suelo

%C = Factor de conversión

3.3.2. Crecimiento de *Guazuma crinita*

En cada transecto de 4 m × 25 m se midieron variables dendrométricas en los individuos de *G. crinita*, específicamente el DAP (1.30 m) y la altura total, utilizando cinta diamétrica y telémetro digital, respectivamente.

a. Diámetro (DAP)

El diámetro del fuste se midió a 1.30 m desde el nivel del suelo y se expresó en centímetros. El incremento medio anual en diámetro se estimó como:

$$IMA_{DAP} = \frac{\sum \Delta DAP}{t}$$

Donde ΔDAP corresponde al incremento en DAP y t al periodo evaluado (5 años).

b. Altura total (m).

La altura total se determinó con telémetro digital, desde la superficie del suelo hasta la parte superior de la copa. El incremento medio anual en altura (IMA_H) se estimó mediante:

$$IMA_H = \frac{\sum \Delta H}{t}$$

Donde ΔH corresponde al incremento en altura y t al periodo evaluado (5 años).

c. Área basal (m²)

Una vez obtenido los datos del diámetro de los árboles, se procedió a calcular el área basal de cada árbol, que es un indicador clave de su crecimiento y productividad. Este cálculo se realizó utilizando la fórmula estándar para el área basal (AB), la cual se expresa como:

$$AB = \frac{\pi * (D)^2}{4}$$

Donde AB es el área basal (m^2), $\pi=3.1416$ y D es el diámetro en metros. El incremento medio anual del área basal se estimó como:

$$IMA_{AB} = \frac{AB}{t}$$

d. Volumen (m^3)

Una vez recopilado la información sobre la altura total (en metros) y el área basal (en metros cuadrados) de los árboles, se procedió a calcular el volumen total de la plantación. Para ello, se empleó la fórmula específica que permitió obtener el volumen del árbol en función de sus dimensiones, fue expresado con a la siguiente fórmula:

$$V = AB * H * f$$

Donde V es el volumen (m^3), AB el área basal (m^2), H la altura (m) y f el factor de forma. El incremento medio anual en volumen se calculó como:

$$IMA_V = \frac{V}{t}$$

Donde t corresponde a la edad de la plantación (5 años).

3.3.3. Relación del carbono orgánico del suelo y crecimiento

Para analizar la relación entre el carbono orgánico del suelo (COS) y el crecimiento de bolaina blanca (*Guazuma crinita*) en los sistemas agroforestales evaluados, se aplicó un análisis de correlación entre el COS total (0–30 cm) y los indicadores de crecimiento (IMA DAP, IMA HT, IMA HC, IMA AB e IMA VC). Previamente, se verificó la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro–Wilk. Con base en este criterio, se estimó el grado de asociación utilizando el coeficiente de correlación de Pearson; cuando alguna variable no cumplió el supuesto de normalidad, se consideró el uso del coeficiente de Spearman.

La significancia estadística de las correlaciones se evaluó mediante valores de p, empleándose la siguiente notación: ns ($p > 0.05$), * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$) y *** ($p < 0.001$). Además, se construyeron correlogramas para representar visualmente la magnitud y el signo de las correlaciones, y se elaboró el Corplot a partir de matrices de similitud/correlación con el propósito de identificar agrupamientos y patrones de asociación entre el COS y las variables de crecimiento evaluadas.

3.4. Enfoques de la investigación

3.4.1. Población, muestra y tipo de muestreo

La población estuvo conformada por los sistemas agroforestales con presencia de bolaina blanca (*Guazuma crinita*) dentro de un área aproximada de 2 ha en el distrito de Luyando (C.P. Supte San Jorge). La muestra estuvo representada por 12 transectos de 4 m × 25 m (T1-T12), totalizando 1200 m² (0.12 ha). En cada transecto se estableció una subparcela (SP) para el muestreo de suelo, realizándose colectas a 0-10, 10-20 y 20-30 cm. El muestreo de transectos fue intencional por representatividad del sistema agroforestal; la selección del punto de suelo dentro de cada transecto fue aleatoria simple, y la evaluación de bolaina blanca se realizó mediante censo de los individuos presentes dentro de cada transecto (n = 118).

3.4.2. Tipo de investigación

La investigación fue de tipo aplicada con enfoque cuantitativo, debido a que generó información útil para el manejo sostenible de sistemas agroforestales mediante la cuantificación del carbono orgánico del suelo a diferentes profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm), la determinación del crecimiento de las especies forestales evaluadas y el análisis estadístico de la relación entre ambas variables. Según el tiempo de ocurrencia de los hechos, el estudio fue de diseño transversal, ya que las mediciones de carbono orgánico del suelo y el registro de variables de crecimiento se realizaron en un único momento, permitiendo evaluar su asociación en un punto específico del tiempo.

3.4.3. Nivel de investigación

La investigación fue de nivel descriptivo–correlacional. Fue descriptiva porque caracterizó el contenido de carbono orgánico del suelo en tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm) y describió los indicadores de crecimiento de bolaina blanca (*Guazuma crinita*) dentro del sistema agroforestal cacao–bolaina. Asimismo, fue correlacional debido a que evaluó el grado de asociación entre el carbono orgánico del suelo (COS) y los indicadores de crecimiento mediante el coeficiente de correlación de Pearson, sin manipulación de variables.

3.4.4. Diseño de investigación

El estudio presentó un diseño no experimental, debido a que no se manipuló ninguna variable; las mediciones se realizaron tal como ocurrieron en condiciones naturales dentro de los sistemas agroforestales evaluados. Asimismo, el diseño fue transversal,

porque la evaluación del carbono orgánico del suelo y de las propiedades químicas del suelo se efectuó en un único momento, y los indicadores de crecimiento de bolaina blanca (*Guazuma crinita*) se registraron en las unidades de muestreo establecidas. En consecuencia, el análisis se orientó a describir las variables y determinar su grado de asociación mediante pruebas de correlación.

3.4.5. Variables

- **Carbono orgánico del suelo (COS):** expresado en t C/ha, estimado por horizonte (0-10, 10-20 y 20-30 cm) y como COS total (0-30 cm).
- **Crecimiento de bolaina blanca (*Guazuma crinita*):** IMA DAP (cm/año), IMA HT (m/año), IMA HC (m/año), IMA AB (m²/año) e IMA VC (m³/año).
- **Caracterización del muestreo:** 12 transectos (4×25 m), área muestreada 0.12 ha y 118 individuos evaluados.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Contenido y el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) por horizonte (0–10, 10–20 y 20–30 cm) en sistemas agroforestales.

En la Figura 3 y Tabla 3 se puede observar que, la distribución vertical del carbono orgánico del suelo (COS) mostró un patrón consistente de disminución con la profundidad en los 12 transectos evaluados. La mayor proporción del COS se concentró en el estrato superficial (0-10 cm), evidenciando que el aporte de residuos orgánicos (hojarasca, raíces finas y exudados) y la mayor actividad biológica se localizan principalmente en la capa superior del suelo, mientras que en 10-20 cm y 20-30 cm los valores fueron menores.

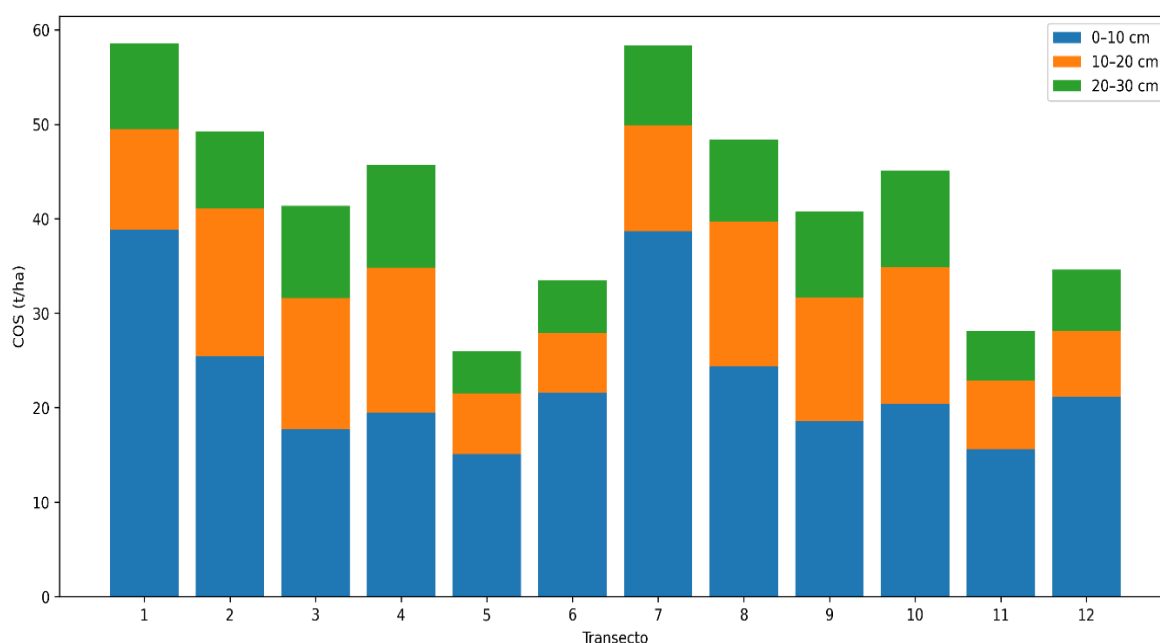


Figura 3. Carbono orgánico del suelo (COS) según transecto y profundidad

A nivel espacial, el COS total (0-30 cm) presentó variabilidad entre transectos, con valores altos en los transectos T1 (58.54 t/ha) y T7 (58.33 t/ha), asociados principalmente a un mayor COS en 0-10 cm.

En contraste, los transectos T5 (25.98 t/ha) y T11 (28.16 t/ha) registraron los menores valores, lo que sugiere diferencias locales en condiciones del sitio y/o manejo (cobertura, aporte de biomasa, disturbio del suelo), típicas de sistemas agroforestales. En conjunto, los resultados indican que el estrato 0-10 cm es el principal contribuyente al almacenamiento de COS en el perfil 0-30 cm y que existe heterogeneidad entre transectos dentro del área de estudio.

Tabla 3. Carbono orgánico del suelo (COS) por transecto y profundidad (0-10, 10-20 y 20-30 cm) y COS total (0-30 cm) en el sistema agroforestal.

Transecto	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	Total COS (t/ha)
1	38.85	10.64	9.05	58.54
2	25.41	15.72	8.12	49.25
3	17.74	13.87	9.76	41.37
4	19.47	15.35	10.84	45.66
5	15.09	6.43	4.46	25.98
6	21.55	6.35	5.62	33.52
7	38.67	11.21	8.45	58.33
8	24.4	15.31	8.69	48.4
9	18.56	13.09	9.1	40.75
10	20.42	14.45	10.24	45.11
11	15.64	7.22	5.3	28.16
12	21.16	7	6.46	34.62

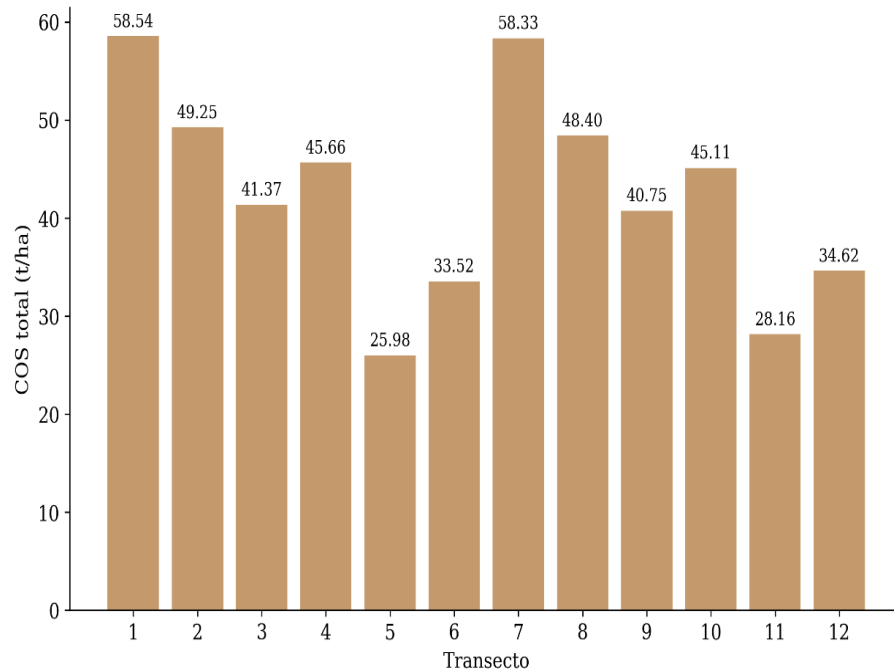


Figura 4. Variación del carbono orgánico del suelo total (0-30 cm) por transecto. Los valores representan la suma de COS en 0-10, 10-20 y 20-30 cm

La Tabla 4 presenta los estadísticos descriptivos del carbono orgánico del suelo (COS) por profundidad (n = 12 transectos). Se observó un patrón definido de disminución del COS con el incremento de la profundidad. En el estrato 0-10 cm se registró la mayor media (23.08 t/ha) y la mayor dispersión (DE = 7.94; CV = 34.39%), con valores entre 15.09 y 38.85 t/ha. Esta alta variabilidad superficial sugiere una influencia marcada de condiciones locales del sistema agroforestal, tales como la cobertura, el aporte de residuos orgánicos y el nivel de disturbio del suelo.

En el estrato 10-20 cm, la media disminuyó a 11.39 t/ha, manteniendo una variabilidad moderada (DE = 3.76; CV = 33.02%) y un rango de 6.35 a 15.72 t/ha, lo que refleja menor aporte directo de materia orgánica en comparación con la capa superior. Finalmente, en 20–30 cm se obtuvo la menor media (8.01 t/ha) y la menor variabilidad relativa (DE = 2.07; CV = 25.83%), con valores de 4.46 a 10.84 t/ha, evidenciando un comportamiento más homogéneo del COS a mayor profundidad.

En términos de acumulación, la suma de COS por profundidad fue mayor en 0–10 cm (276.96 t/ha), seguida por 10-20 cm (136.64 t/ha) y 20-30 cm (96.09 t/ha), confirmando que el principal almacenamiento de carbono del perfil 0–30 cm se concentra en el horizonte superficial.

Tabla 4. Estadística descriptiva del COS (t/ha) según profundidad orgánico del suelo (COS) según transecto y profundidad

Profundidad	n	Media	DE	Mínimo	Máximo	CV (%)	Suma
0-10 cm	12	23.08	7.94	15.09	38.85	34.39	276.96
10-20 cm	12	11.39	3.76	6.35	15.72	33.02	136.64
20-30 cm	12	8.01	2.07	4.46	10.84	25.83	96.09

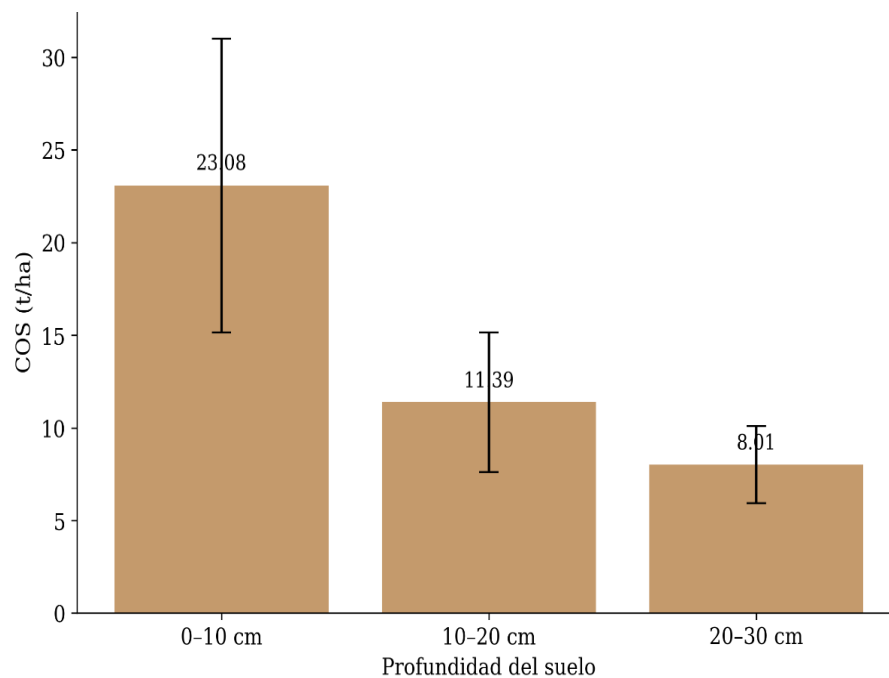


Figura 5. Promedio del COS (t/ha) según profundidad orgánico del suelo

La Figura 5 muestra el comportamiento del carbono orgánico del suelo (COS) según la profundidad evaluada (0-10, 10-20 y 20-30 cm). Se evidenció un patrón claro de disminución del COS con el incremento de la profundidad, registrándose el mayor valor

promedio en el estrato 0-10 cm (23.08 t/ha), seguido por 10-20 cm (11.39 t/ha) y 20-30 cm (8.01 t/ha). Esta tendencia indica que el almacenamiento de COS se concentra principalmente en la capa superficial del suelo, donde ocurre el mayor aporte de materia orgánica por hojarasca, residuos vegetales y raíces finas, además de una mayor actividad biológica.

La Tabla 4 complementa estos resultados con estadísticos descriptivos por profundidad. En el estrato 0-10 cm se observó la mayor variabilidad (DE = 7.94; CV = 34.39%), con valores entre 15.09 y 38.85 t/ha, lo que sugiere una fuerte influencia de condiciones locales y del manejo del sistema agroforestal sobre la acumulación de carbono en la superficie. En 10–20 cm, aunque el promedio disminuyó, la variabilidad se mantuvo moderada (DE = 3.76; CV = 33.02%), con un rango de 6.35–15.72 t/ha, reflejando una transición hacia un almacenamiento menos dependiente del aporte superficial inmediato. Finalmente, en 20–30 cm se registró el menor promedio y la menor variabilidad relativa (DE = 2.07; CV = 25.83%), con valores entre 4.46 y 10.84 t/ha, evidenciando un comportamiento más homogéneo del COS a mayor profundidad.

En conjunto, la Figura 5 y la Tabla 4 confirman una estratificación vertical del carbono orgánico del suelo, con predominio en los primeros 10 cm, y muestran que la mayor heterogeneidad entre transectos se presenta en la capa superficial, lo cual es consistente con sistemas agroforestales donde la cobertura, el aporte de biomasa y el disturbio del suelo afectan principalmente los horizontes superiores.

El patrón observado de mayor COS en superficie y disminución con la profundidad es consistente con lo reportado en estudios que señalan que el carbono del suelo se concentra en los primeros horizontes debido al ingreso continuo de hojarasca, residuos vegetales y raíces finas, además de una mayor actividad microbiana en el estrato superior (Camargo, 2018; Wang et al., 2022). Asimismo, el uso de profundidades equivalentes (0-10, 10-20 y 20-30 cm) permite comparar metodológicamente con estudios regionales que también evidencian una estratificación vertical del COS (Condor, 2019).

La variabilidad del COS total entre transectos (Figura 4) sugiere que, aun dentro de un mismo sistema agroforestal, el almacenamiento puede diferir por condiciones locales como cobertura, aporte de residuos, microtopografía y disturbio del suelo. Este comportamiento ha sido descrito en sistemas agroforestales, donde la estructura del componente arbóreo y el manejo influyen en la dinámica del carbono edáfico (Poveda et al., 2013; Wang et al., 2022). En conjunto, los resultados confirman que el horizonte superficial constituye el principal

reservorio de COS del perfil 0-30 cm y que existe heterogeneidad espacial en el almacenamiento dentro del área evaluada.

4.2. Crecimiento de bolaina blanca (*Guazuma crinita*) mediante DAP y altura, y estimación de los incrementos medios anuales (IMA) en DAP, altura, área basal y volumen en los sistemas agroforestales.

Los estadísticos descriptivos muestran el comportamiento dasométrico de 118 individuos de bolaina blanca (*Guazuma crinita*) en el sistema evaluado. En promedio, los árboles presentaron un diámetro de 14.02 cm y una altura total de 10.42 m, mientras que la altura comercial alcanzó 8.10 m, lo que evidencia un fuste aprovechable importante dentro del rodal. La variabilidad fue moderada en diámetro (CV = 21.77%) y altura total (CV = 26.06%), y algo mayor en altura comercial (CV = 28.94%), reflejando diferencias entre individuos asociadas a competencia y manejo.

En las variables derivadas, el área basal promedio fue 0.0162 m² por árbol, con alta variabilidad (CV = 44.71%), lo que indica diferencias marcadas en el tamaño de los fustes. Esta heterogeneidad se intensificó en el volumen comercial, que promedió 0.0893 m³ por árbol y presentó la mayor dispersión (CV = 67.93%), con un rango amplio (0.015 a 0.401 m³). Esto es esperable porque el volumen integra simultáneamente el efecto del diámetro y la altura, amplificando las diferencias entre individuos.

En conjunto, los resultados sugieren una población arbórea con dimensiones promedio definidas, pero con alta heterogeneidad en productividad (AB y VC), lo que puede estar relacionado con variaciones locales del sitio, competencia entre árboles y diferencias en condiciones de establecimiento y manejo dentro de los transectos.

Tabla 5. Estadística descriptiva general de las variables dasométricas

Variable	n	Media	DE	Mínimo	Máximo	CV (%)
Diámetro (cm)	118	14.02	3.05	7.6	22.9	21.77
Altura total, HT (m)	118	10.42	2.72	5.5	21.2	26.06
Altura comercial, HC (m)	118	8.1	2.34	2.9	15.8	28.94
Área basal, AB (m ²)	118	0.0162	0.0072	0.0045	0.0412	44.71
Volumen comercial, VC (m ³)	118	0.0893	0.0607	0.015	0.401	67.93

La Tabla 6 presenta el muestreo y los principales indicadores dasométricos obtenidos para bolaina blanca (*Guazuma crinita*) en los 12 transectos establecidos, incluyendo densidad, área basal y volumen comercial, tanto en valores observados en el área muestreada como en su estimación por hectárea.

Tabla 6. Resumen de muestreo e indicadores dasométricos de *Guazuma crinita* (bolaina blanca) en los 12 transectos evaluados.

Indicador	Valor
Número total de transectos	12
Área total muestreada	1200 m ² (0.12 ha)
Número total de árboles evaluados (<i>Guazuma crinita</i>)	118
Promedio de árboles por transecto	9.83
Densidad estimada	983.33 árboles/ha
Área basal total en el muestreo	1.9077 m ²
Área basal estimada por hectárea	15.90 m ² /ha
Volumen comercial total en el muestreo	10.539 m ³
Volumen comercial estimado por hectárea	87.83 m ³ /ha

Nota: El área total muestreada fue de 1200 m² (0.12 ha). Los valores expresados “por hectárea” (árboles/ha, m²/ha y m³/ha) se estimaron por expansión a partir del área muestreada, con el fin de facilitar la comparación y la interpretación de los indicadores.

Los incrementos medios anuales (IMA) de bolaina blanca mostraron variación entre transectos. En promedio, el IMA en diámetro fue 2.81 cm/año, mientras que el IMA en altura total y altura comercial alcanzaron 2.09 y 1.62 m/año, respectivamente. El IMA en área basal y volumen comercial promediaron 0.00324 m²/año y 0.01798 m³/año. El transecto 6 presentó los mayores valores en todos los indicadores (DAP, altura, área basal y volumen), evidenciando mejores condiciones de crecimiento. En contraste, los valores mínimos se registraron en transectos distintos según el indicador, destacando T4 para DAP y AB, T2 para altura total y comercial, y T8 para volumen, lo que sugiere heterogeneidad de condiciones edáficas y/o de manejo dentro del sistema.

Tabla 7. Incremento Medio Anual (IMA) por transecto

Transecto	IMA DAP (cm/año)	IMA HT (m/año)	IMA HC (m/año)	IMA AB (m²/año)	IMA VC (m³/año)
1	2.6880	2.2000	1.4820	0.0031	0.0159
2	3.0489	1.6044	1.2289	0.0038	0.0152
3	3.0564	2.0982	1.7055	0.0039	0.0230
4	2.3460	2.0180	1.6020	0.0024	0.0159
5	2.5260	2.0020	1.5980	0.0025	0.0139
6	3.1200	2.4111	2.0444	0.0041	0.0250
7	2.7378	2.1578	1.6756	0.0031	0.0166
8	2.7109	1.8255	1.3927	0.0029	0.0135
9	2.8345	2.3145	1.7673	0.0033	0.0188
10	2.7680	2.1240	1.6040	0.0030	0.0167
11	2.9140	1.9440	1.5420	0.0033	0.0168
12	2.9600	2.3525	1.8475	0.0035	0.0244
Promedio	2.8092	2.0877	1.6242	0.0032	0.0180

La Tabla 8 resume los estadísticos descriptivos de los incrementos medios anuales (IMA) en bolaina blanca ($n = 118$). En promedio, el IMA en DAP fue 2.8041 cm/año ($DE = 0.6106$), con valores entre 1.52 y 4.58 cm/año y una variabilidad moderada ($CV = 21.77\%$). El IMA en altura total (HT) alcanzó 2.0837 m/año ($DE = 0.543$), con un rango de 1.10 a 4.24 m/año ($CV = 26.06\%$). Asimismo, el IMA en altura comercial (HC) promedió 1.6197 m/año ($DE = 0.4687$), con valores entre 0.58 y 3.16 m/año, mostrando una variabilidad ligeramente mayor ($CV = 28.94\%$).

En cuanto a variables de productividad, el IMA del área basal (AB) presentó una media de 0.0032 m²/año ($DE = 0.0015$), con un rango de 0.001 a 0.008 m²/año y una variabilidad alta ($CV = 45.53\%$). De manera similar, el IMA del volumen comercial (VC) registró una media de 0.0179 m³/año ($DE = 0.0121$), con valores entre 0.003 y 0.0802 m³/año, evidenciando la mayor heterogeneidad entre individuos ($CV = 67.88\%$).

En conjunto, los resultados indican que las variables estructurales básicas (DAP y altura) muestran variabilidad moderada, mientras que las variables derivadas de productividad (área basal y volumen) presentan mayor dispersión. Esto es esperable debido a que el volumen integra simultáneamente el efecto del diámetro y la altura, amplificando las diferencias entre individuos y reflejando variaciones locales de sitio, competencia y manejo dentro del sistema agroforestal.

Tabla 8. Estadística descriptiva sobre el incremento Medio Anual (IMA) por transecto

Variable	n	Media	DE	Mínimo	Máximo	CV (%)
IMA DAP (cm/año)	118	2.8041	0.6106	1.5200	4.5800	21.77
IMA HT (m/año)	118	2.0837	0.5430	1.1000	4.2400	26.06
IMA HC (m/año)	118	1.6197	0.4687	0.5800	3.1600	28.94
IMA AB (m ² /año)	118	0.0032	0.0015	0.0010	0.0080	45.53
IMA VC (m ³ /año)	118	0.0179	0.0121	0.0030	0.0802	67.88

La Figuras 6 (complots) evidencian la variación del incremento medio anual (IMA) de bolaina blanca entre transectos. En el caso del IMA en DAP, se observaron diferencias en las medianas y en la dispersión por transecto, así como valores atípicos, lo que indica heterogeneidad en el crecimiento diamétrico asociada a condiciones locales de sitio, competencia y manejo. De manera similar, el IMA en altura total mostró variación entre transectos, con transectos que presentaron mayor dispersión intra-transecto y la presencia de outliers, reflejando individuos con crecimiento en altura superior o inferior al comportamiento

general. En conjunto, estos patrones confirman que el crecimiento no es uniforme dentro del sistema agroforestal y que la respuesta de los individuos varía según el transecto evaluado.

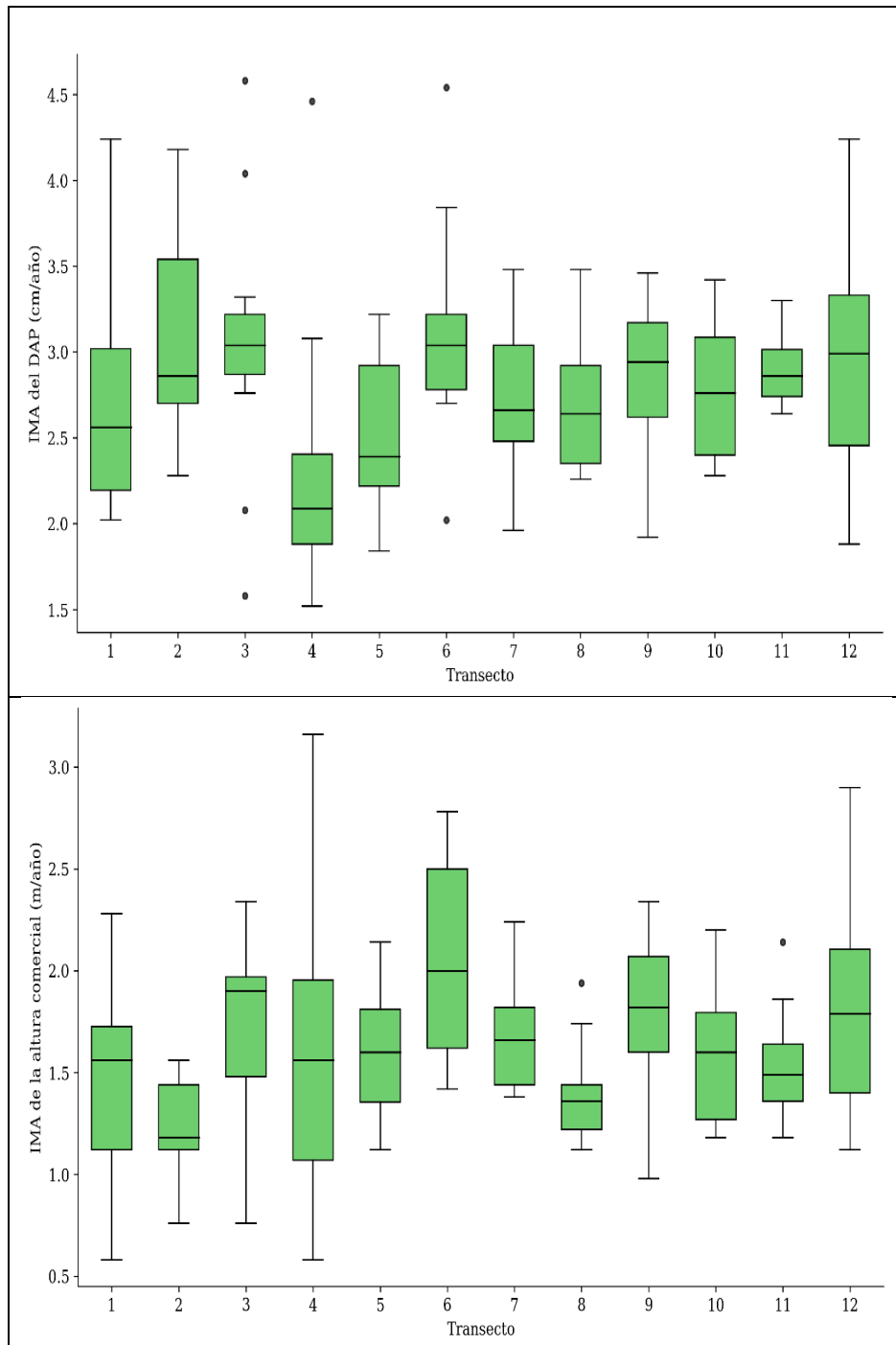


Figura 6. Diagramas de caja del Incremento Medio Anual (IMA) en diámetro (DAP) y altura total (HT) de *Guazuma crinita* por transecto.

Los diagramas de caja del IMA del área basal (AB) y del volumen comercial (VC) evidencian variación del crecimiento de *Guazuma crinita* entre transectos y dentro de cada transecto. En el IMA-AB se observaron diferencias en las medianas y en la dispersión, así como valores atípicos, lo que refleja heterogeneidad en el incremento del fuste asociada a

competencia y condiciones locales del sitio. En el caso del IMA-VC, la dispersión fue mayor y se registraron outliers más extremos, indicando que la productividad en volumen comercial presenta una variabilidad superior, esperable debido a que el volumen integra simultáneamente los cambios en diámetro y altura. En conjunto, los resultados muestran que el crecimiento y la productividad de la bolaina blanca no son homogéneos en el área evaluada, y dependen de factores locales del sistema agroforestal.

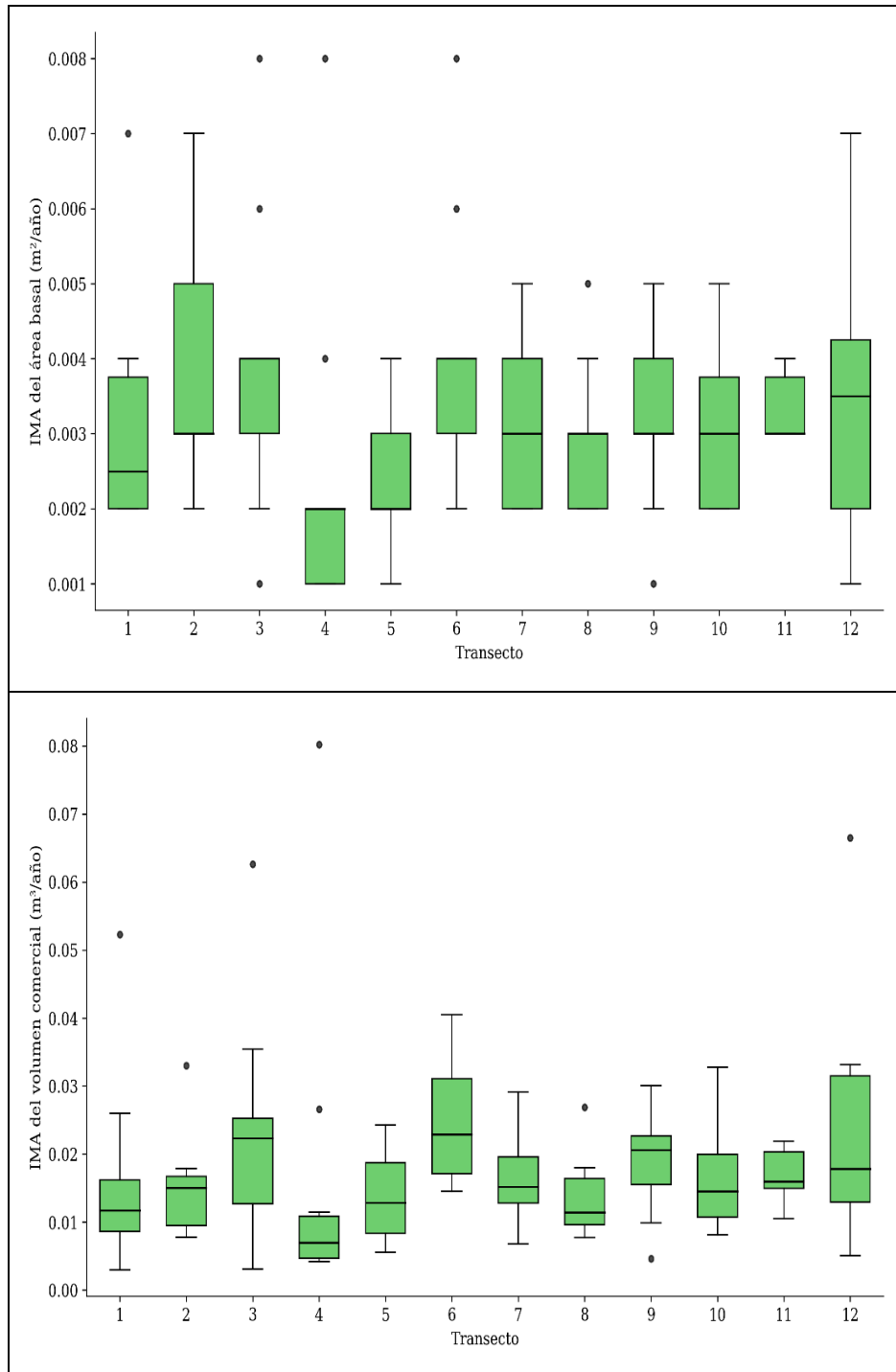


Figura 7. Diagramas de caja del Incremento Medio Anual (IMA) del área basal (AB) y del volumen comercial (VC) de *Guazuma crinita* por transecto.

Los resultados muestran que el crecimiento de *G. crinita* en la plantación de 5 años no fue uniforme entre transectos ni entre individuos. La mayor variabilidad observada en área basal y volumen coincide con el hecho de que estos indicadores derivan de la combinación de diámetro y altura, por lo que amplifican las diferencias de crecimiento entre árboles. Esta heterogeneidad puede estar asociada a competencia, microsítio y diferencias de manejo dentro del sistema, tal como se reporta en plantaciones juveniles donde la edad y el espaciamiento influyen en los incrementos (Michela et al., 2015). De manera complementaria, estudios en plantaciones de edad comparable han señalado que el crecimiento y la productividad pueden variar considerablemente por condiciones de sitio y manejo (Vásquez-Miñope et al., 2023).

4.3. Correlación (Pearson) entre el carbono orgánico del suelo (COS) y los incrementos medios anuales (IMA) de bolaina blanca (*Guazuma crinita*) en sistemas agroforestales.

Las correlaciones de Pearson mostraron asociaciones positivas y significativas entre los indicadores de crecimiento de *Guazuma crinita*. Destacó la correlación muy alta entre IMA DAP e IMA AB ($r = 0.985$; $p < 0.001$), debido a la dependencia geométrica del área basal respecto al diámetro. Asimismo, se observó una relación muy fuerte entre IMA HT e IMA HC ($r = 0.935$; $p < 0.001$) y correlaciones altas entre el IMA del volumen comercial y las variables de diámetro y altura ($r = 0.800$ – 0.878). En contraste, el carbono orgánico del suelo (COS) presentó correlaciones negativas y no significativas con todos los indicadores de crecimiento ($r = -0.086$ a -0.401 ; $p > 0.05$), indicando que, en las condiciones evaluadas, el stock de COS no se asoció de manera estadísticamente significativa con el crecimiento de la bolaina blanca.

Tabla 9. Matriz de correlación de Pearson entre las variables IMA y COS de *Guazuma crinita* (n = 12)

Variable	IMA DAP	IMA HT	IMA HC	IMA AB	IMA VC	COS
IMA DAP	—	0.598*	0.604*	0.985***	0.800**	-0.178ns
IMA HT	0.598*	—	0.935***	0.625*	0.843***	-0.148ns
IMA HC	0.604*	0.935***	—	0.628*	0.878***	-0.401ns
IMA AB	0.985***	0.625*	0.628*	—	0.805**	-0.086ns
IMA VC	0.800**	0.843***	0.878***	0.805**	—	-0.317ns
COS	-0.178ns	-0.148ns	-0.401ns	-0.086ns	-0.317ns	—

Nota. Los valores corresponden al coeficiente de correlación de Pearson (r). * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, ns = no significativo. Las celdas con — indican la correlación de la variable consigo misma.

Los círculos del correlograma muestran la dirección y la fuerza de la relación entre pares de variables. La dirección se interpreta por el color: tonos rojizos indican una correlación positiva (ambas variables aumentan o disminuyen conjuntamente) y tonos azulados indican una correlación negativa (cuando una variable aumenta, la otra tiende a disminuir). La fuerza de la correlación se representa por el tamaño del círculo y la intensidad del color: círculos más grandes y colores más intensos corresponden a valores absolutos de r más altos (relación más fuerte), mientras que círculos más pequeños y colores más tenues corresponden a valores de r cercanos a 0 (relación débil o nula). La escala lateral muestra el rango del coeficiente de Pearson, que varía de -1 (relación inversa perfecta) a $+1$ (relación directa perfecta), siendo 0 ausencia de relación lineal.

Los símbolos de significancia ubicados en la matriz resumen el resultado de la prueba estadística asociada a cada correlación: ns indica que la relación no es estadísticamente significativa ($p > 0.05$), mientras que los asteriscos señalan niveles crecientes de evidencia estadística: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ y *** $p < 0.001$. En términos prácticos, una correlación significativa sugiere que la asociación observada es poco probable que se deba al azar dentro de la muestra analizada, mientras que una correlación no significativa indica que, aun cuando el coeficiente r tenga signo positivo o negativo, no se cuenta con evidencia suficiente para afirmar una asociación consistente en la población.

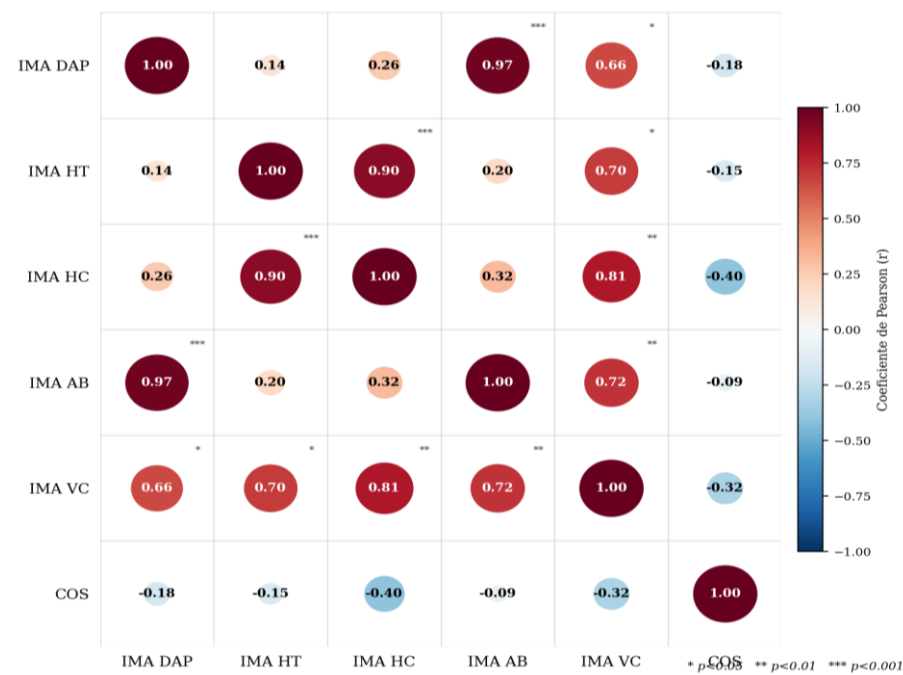


Figura 8. Corplot de la matriz de correlación de Pearson IMA de *Guazuma crinita* y carbono orgánico del suelo

La ausencia de correlación significativa entre el COS total y los IMA sugiere que el crecimiento de bolaina blanca no estuvo explicado directamente por el stock de carbono del suelo en el perfil 0–30 cm. Esto puede deberse a que el crecimiento responde con mayor sensibilidad a factores como competencia, disponibilidad de nutrientes específicos, propiedades químicas del suelo (pH, P, K, entre otros) y condiciones microambientales, aspectos que han sido señalados como determinantes del desempeño forestal en estudios nacionales y regionales (Angulo, 2014; Huamán, 2021). Además, antecedentes en sistemas agroforestales muestran que la dinámica del carbono y la productividad no siempre presentan relaciones directas, especialmente cuando intervienen variaciones de manejo y estructura del dosel (Hernández et al., 2021; Calderón-Medina et al., 2018).

V. CONCLUSIONES

1. El carbono orgánico del suelo (COS) presentó una mayor concentración en el estrato superficial (0–10 cm), con una media de 23.08 t/ha, y disminuyó conforme aumentó la profundidad, alcanzando 11.39 t/ha en 10–20 cm y 8.01 t/ha en 20–30 cm; este patrón confirma una estratificación vertical del COS en el perfil 0–30 cm del sistema agroforestal cacao - bolaina evaluado.
2. En la plantación de bolaina blanca (*Guazuma crinita*) de 5 años, los incrementos medios anuales (IMA) reflejaron un crecimiento sostenido, con promedios de IMA DAP = 2.804 cm/año, IMA HT = 2.084 m/año, IMA HC = 1.620 m/año, IMA AB = 0.0032 m²/año e IMA VC = 0.0179 m³/año; además, la variabilidad fue moderada en DAP y alturas, y mayor en área basal y volumen, evidenciando heterogeneidad del crecimiento entre individuos y transectos.
3. El análisis de correlación de Pearson no mostró asociaciones significativas entre el COS total (0–30 cm) y los incrementos medios anuales (IMA) de *G. crinita*, observándose correlaciones negativas no significativas; por ello, bajo las condiciones evaluadas, el COS no se relacionó estadísticamente con el crecimiento, lo que sugiere una mayor influencia de otros factores del sistema, como el manejo, la competencia, la disponibilidad de nutrientes y el microambiente.

VI. PROPUESTA A FUTURO

1. Implementar prácticas de manejo que favorezcan la conservación y el incremento del carbono orgánico del suelo, priorizando la protección de la capa superficial mediante cobertura permanente, reincorporación de residuos orgánicos y reducción de disturbios.
2. Fortalecer el manejo silvícola de la bolaina blanca dentro del sistema cacao – bolaina blanca, considerando el control de competencia y la regulación de densidad para optimizar el crecimiento y la productividad del componente forestal.
3. Complementar el análisis del crecimiento incorporando variables de sitio y manejo (cobertura de sombra, densidad, edad del sistema, prácticas agrícolas), así como propiedades del suelo potencialmente limitantes, para explicar con mayor precisión la variabilidad observada.
4. Desarrollar monitoreos periódicos del suelo y del crecimiento para evaluar tendencias en el tiempo y mejorar la toma de decisiones orientadas al manejo sostenible del sistema agroforestal.

VII. REFERENCIAS

- Alvarado, J., Andrade, H. J., & Segura, M. (2013). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal*, 16(1), 21–31.
- Andrade, M., & Martínez, M. E. (2014). *Fertilidad del suelo y parámetros que lo definen* (3.^a ed.). Universidad de La Rioja.
- Angulo, W. E. (2014). *Crecimiento y productividad de la plantación de Cedrelinga catenaeformis Ducke, establecida en diferentes condiciones de sitio, en suelo Inceptisol en el Bosque Alexander von Humboldt* [Informe de investigación]. Estación Experimental Agraria Pucallpa, MINAGRI, Dirección de Desarrollo Tecnológico Agrario.
- Becerra, M. (2018). *Agroforestería como una propuesta de agricultura sostenible en ecosistemas amazónicos: Caso de estudio distrito de Santa Ana* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/12311>
- Blanco, L., Lal, R., & Cerri, C. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Acta Agronómica*, 67(1), 82–91. https://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-01352018000100082&script=sci_arttext
- Calderón-Medina, C. L., Bautista-Mantilla, G. P., & Rojas-González, S. (2018). Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta. *Orinoquia*, 22(2).
- Camargo Pun, A. P. (2018). *Distribución de carbono orgánico con la profundidad del suelo en el bosque de aliso (Alnus acuminata), Cullpa, Huancayo, 2017* [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Universidad Continental. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/5026>
- Centro para la Investigación Forestal Internacional y Agroforestería Mundial (CIFOR-ICRAF). (2021). *La agroforestería al servicio de la agricultura familiar en Perú*. <https://www.cifor-icraf.org/publications/downloads/Publications/PDFS/PB22015.pdf>
- Condor Meza, J. J. (2019). *Carbono orgánico del suelo en diferentes unidades fisiográficas del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS), Tingo María – Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS.

- De Los Ángeles, N., Rubiano, J. E., & Castro, A. (2016). Sistemas agroforestales como estrategia para el manejo de ecosistemas de Bosque Seco Tropical en el suroccidente colombiano utilizando los SIG. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 25(1), 65–77. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v25n1.41993>
- Del Rey, I. (2019). *Las formas del potasio en el suelo*. Tiloom. <https://www.tiloom.com/formas-del-potasio-en-el-suelo/>
- Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria (DICTA). (2016). *Manejo de suelos ácidos de las zonas altas de Honduras*.
- Echeverría, H. E., Sainz Rozas, H. R., & Barbieri, P. A. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia del Suelo*, 32(1), 13–19. https://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_32n1/13-19%20pags%201CS%20267%20Eyerhabide%20et%20al%202014.pdf
- Elliot, J. (2015). *Experiencias de mitigación y adaptación con sistemas agroforestales* [Conferencia]. Soluciones Prácticas. <https://www.solucionespracticas.org.pe/Descargar/5606/32371>
- Estrada Torres, Y. X. (2023). *Carbono orgánico del suelo en cinco sistemas de uso en el Centro de Investigación y Producción Tulumayo Anexo La Divisoria (CIPTALD), Pueblo Nuevo* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS
- European Agroforestry Federation (EURAF). (2020). *Home*. <https://euraf.net/>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2017). *Soil organic carbon: The hidden potential*. <https://openknowledge.fao.org/items/a9260c9f-71e8-46fa-a853-0d18f0de3bda>
- Gaona Ochoa, T. G. (2014). *Dinámica de crecimiento de veintinueve especies forestales establecidas y análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo en el Jardín Botánico el Padmi, Zamora Chinchipe* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja]. Repositorio Institucional UNL.
- Gutiérrez-Castorena, M. C., Ortiz-Solorio, C. A., & Etchevers-Barra, J. D. (2016). Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación y conservación. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 125–136.
- Hernández Núñez, H. E., Andrade, H. J., Suárez Salazar, J. C., Sánchez A., J. R., Gutiérrez S., D. R., & Gutiérrez García, G. A. (2021). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales en los Llanos Orientales de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 69(1), 352–368.

- Huamán Mendoza, J. H. (2021). *Influencia de los sistemas de uso en la calidad de suelo sector Cora Cora, distrito Luyando, provincia de Leoncio Prado* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/029ecdee-18b7-418c-93a1-f71657ea4d34>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories* (Vol. 4: Agriculture, forestry and other land use). <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- Jara Sánchez, R. A. (2016). *Almacenamiento de carbono en el suelo en dos tipos de sistemas agroforestales cacao (Theobroma cacao L.) y café (Coffea arábica L.) en Hermilio Valdizán*. [Tesis pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva] <https://hdl.handle.net/20.500.14292/1363>
- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Agricultura Técnica*, 68(1), 36–45.
- Michela, J. F., Kees, S. M., & Skoko, J. J. (2015). Evaluación del crecimiento de plantaciones juveniles de algarrobo blanco (*Prosopis alba* Griseb) en el centro oeste del Chaco argentino. *Temas Agrarios*, 20(1), 9–18.
- Moreno, A. E., & Navorio, C. A. (2004). *Caracterización biofísica y suelos de los sistemas agroforestales de café bajo sombra en la zona del Pacífico de Nicaragua: Uso y efectividad de los nutrientes* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional UNA. <https://repositorio.una.edu.ni/1929/>
- Mosquera-Losada, M. R., McAdam, J., Romero-Franco, R., Santiago-Freijanes, J. J., & Rigueiro-Rodríguez, A. (2009). Definitions and components of agroforestry practices in Europe. En M. R. Mosquera-Losada, J. McAdam, & A. Rigueiro-Rodríguez (Eds.), *Agroforestry in Europe* (pp. 3–19).
- Negash, M., & Starr, M. (2015). Biomass and soil carbon stocks of indigenous agroforestry systems on the south-eastern Rift Valley escarpment, Ethiopia. *Plant and Soil*, 393(1–2), 95–107. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2469-6>
- Ospina, [Inicial]. (2001). [Título del documento]. [Editorial/Institución].
(Completar: en tu lista falta el título exacto y la fuente.)
- Parra, M. R. E. (2003). *Los suelos y la fertilización del olivar cultivado en zonas calcáreas*. Mundi-Prensa.
- Perdomo, C., & Barbazán, M. (2016). *Área de suelos y aguas: Cátedra de fertilidad nitrógeno*. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. <http://www.fagro.edu.uy/fertilidad/publica/Tomo%20N.pdf>

- Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: Del trabajo de campo a la predicción*. FAO & CIRAD.
- Pocomucha, V. S., Alegre, J., & Abregú, L. (2016). Análisis socioeconómico y carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Huánuco. *Ecología Aplicada*, 15(2).
- Poveda, V., Orozco, L., Medina, C., Cerda, R., & López, A. (2013). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao en Waslala, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*, 49, 1–12.
- Pretzsch, H. (2009). *Forest dynamics, growth and yield: From measurement to model*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88307-4>
- Rázuri, L., Linares, J., Romero, E., Galindo, A., & Hernández, J. (2005). *Evolución de la salinidad en un suelo del Valle de Quibor*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Salas, C., Gregoire, T. G., Craven, D. J., & Gilabert, H. (2016). Modelación del crecimiento de bosques: Estado del arte. *Bosque*, 37(1), 3–12. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000100001>
- Sánchez, D. V. (2016). *Dinámica del carbono orgánico en suelos de sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca* [Tesis de maestría, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A.]. <https://repository.udca.edu.co/entities/publication/f60bb000-61a8-442f-8c1d-f2b9e10b7d70>
- Santos Peña, M. N. (2023). *Carbono almacenado en tres sistemas de uso del suelo en el distrito de Uchiza - San Martín* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2765>
- Singh, I., Rawat, P., Kumar, A., & Bhatt, P. (2018). Soil physico-bio-chemical properties under different agroforestry systems in Terai region of the Garhwal Himalayas. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(5), 2813–2821.
- Schwartzmann, T. M. (2019). *Cambios en la calidad del suelo en un sistema agroforestal comparado con un pastizal en Madre de Dios* [Tesis de pregrado, Universidad Científica del Sur] <https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/20.500.12805/807>
- Tarazona, R. C., Rofner, N. F., & Rojas, A. R. (2020). *Impacto sobre indicadores físicos y químicos del suelo con manejo convencional de coca y cacao*. <https://core.ac.uk/download/pdf/327992989.pdf>

- Vasquez-Miñope, C., Sulca-Gamboa, K., & Cuellar-Bautista, E. (2023). Crecimiento, productividad e índices silviculturales en plantaciones juveniles de *Tectona grandis* L. f. en Perú. *Colombia Forestal*, 26(1), 79–91. <https://doi.org/10.14483/2256201X.19375>
- Wang, W., Ingwersen, J., Yang, G., Wang, Z., & Alimu, A. (2022). Effects of farmland conversion to orchard or agroforestry on soil organic carbon fractions in an arid desert oasis area. *Forests*, 13(2), 181. <https://doi.org/10.3390/f13020181>

ANEXO

Tabla 10. Registro dendrométrico de *Guazuma crinita* (bolaina blanca) por transecto: diámetro, DAP, área basal (AB) y altura comercial (HC).

Nº	Transecto	Especie	Diámetro	DAP (m)	AB (m2)	HC (m)
1	1	Bolaina	11.5	0.115	0.0104	5.1
2	1	Bolaina	15.5	0.155	0.0189	10.6
3	1	Bolaina	10.1	0.101	0.0080	8.3
4	1	Bolaina	10.8	0.108	0.0092	7.3
5	1	Bolaina	13.5	0.135	0.0143	7.1
6	1	Bolaina	13.9	0.139	0.0152	8.7
7	1	Bolaina	12.1	0.121	0.0115	8.4
8	1	Bolaina	10.1	0.101	0.0080	2.9
9	1	Bolaina	21.2	0.212	0.0353	11.4
10	1	Bolaina	15.7	0.157	0.0194	4.3
11	2	Bolaina	14.2	0.142	0.0158	7.8
12	2	Bolaina	12.9	0.129	0.0131	5.6
13	2	Bolaina	11.4	0.114	0.0102	5.9
14	2	Bolaina	14.3	0.143	0.0161	7.2
15	2	Bolaina	13.5	0.135	0.0143	6.9
16	2	Bolaina	17.7	0.177	0.0246	5.6
17	2	Bolaina	20.9	0.209	0.0343	7.4
18	2	Bolaina	17.9	0.179	0.0252	5.1
19	2	Bolaina	14.4	0.144	0.0163	3.8
20	3	Bolaina	14.9	0.149	0.0174	3.8
21	3	Bolaina	22.9	0.229	0.0412	11.7
22	3	Bolaina	15.5	0.155	0.0189	9.5
23	3	Bolaina	15.6	0.156	0.0191	6.3
24	3	Bolaina	16.6	0.166	0.0216	9.5
25	3	Bolaina	20.2	0.202	0.0320	8.5
26	3	Bolaina	13.8	0.138	0.0150	11.1
27	3	Bolaina	7.9	0.079	0.0049	4.9
28	3	Bolaina	15.1	0.151	0.0179	9.6
29	3	Bolaina	15.2	0.152	0.0181	10.1
30	3	Bolaina	10.4	0.104	0.0085	8.8
31	4	Bolaina	15.4	0.154	0.0186	11
32	4	Bolaina	9.3	0.093	0.0068	10.1
33	4	Bolaina	8.2	0.082	0.0053	6.1
34	4	Bolaina	10.4	0.104	0.0085	7.5
35	4	Bolaina	7.6	0.076	0.0045	8.8
36	4	Bolaina	22.3	0.223	0.0391	15.8
37	4	Bolaina	9.7	0.097	0.0074	4.7
38	4	Bolaina	10.5	0.105	0.0087	5.1
39	4	Bolaina	11.8	0.118	0.0109	8.1
40	4	Bolaina	12.1	0.121	0.0115	2.9
41	5	Bolaina	9.2	0.092	0.0066	6.5
42	5	Bolaina	16.1	0.161	0.0204	7.6

N°	Transecto	Especie	Diámetro	DAP (m)	AB (m2)	HC (m)
43	5	Bolaina	12.4	0.124	0.0121	8.9
44	5	Bolaina	13.7	0.137	0.0147	7.6
45	5	Bolaina	11.1	0.111	0.0097	9.3
46	5	Bolaina	16.1	0.161	0.0204	9.1
47	5	Bolaina	14.9	0.149	0.0174	10.7
48	5	Bolaina	11.5	0.115	0.0104	5.6
49	5	Bolaina	11.1	0.111	0.0097	8.4
50	5	Bolaina	10.2	0.102	0.0082	6.2
51	6	Bolaina	22.7	0.227	0.0405	7.7
52	6	Bolaina	14.1	0.141	0.0156	8.4
53	6	Bolaina	19.2	0.192	0.0290	10
54	6	Bolaina	15.2	0.152	0.0181	7.1
55	6	Bolaina	16.1	0.161	0.0204	8.1
56	6	Bolaina	13.9	0.139	0.0152	11.6
57	6	Bolaina	10.1	0.101	0.0080	13.9
58	6	Bolaina	15.6	0.156	0.0191	12.5
59	6	Bolaina	13.5	0.135	0.0143	12.7
60	7	Bolaina	13.3	0.133	0.0139	7.1
61	7	Bolaina	17.4	0.174	0.0238	9.4
62	7	Bolaina	12.3	0.123	0.0119	8.3
63	7	Bolaina	15.2	0.152	0.0181	9.1
64	7	Bolaina	15.9	0.159	0.0199	7.2
65	7	Bolaina	9.8	0.098	0.0075	6.9
66	7	Bolaina	12.4	0.124	0.0121	8.4
67	7	Bolaina	13.1	0.131	0.0135	11.2
68	7	Bolaina	13.8	0.138	0.0150	7.8
69	8	Bolaina	11.4	0.114	0.0102	6.9
70	8	Bolaina	12.9	0.129	0.0131	5.9
71	8	Bolaina	14.4	0.144	0.0163	6.1
72	8	Bolaina	13.5	0.135	0.0143	9.7
73	8	Bolaina	11.9	0.119	0.0111	7.5
74	8	Bolaina	16.7	0.167	0.0219	6.1
75	8	Bolaina	14.8	0.148	0.0172	6.9
76	8	Bolaina	11.6	0.116	0.0106	5.6
77	8	Bolaina	11.3	0.113	0.0100	6.8
78	8	Bolaina	13.2	0.132	0.0137	6.4
79	8	Bolaina	17.4	0.174	0.0238	8.7
80	9	Bolaina	16.5	0.165	0.0214	9.1
81	9	Bolaina	11.2	0.112	0.0099	11.7
82	9	Bolaina	15.4	0.154	0.0186	8.5
83	9	Bolaina	17.3	0.173	0.0235	7.5
84	9	Bolaina	15.2	0.152	0.0181	9.5
85	9	Bolaina	14.7	0.147	0.0170	8.6
86	9	Bolaina	16.3	0.163	0.0209	11.1
87	9	Bolaina	13.4	0.134	0.0141	5.4

N°	Transecto	Especie	Diámetro	DAP (m)	AB (m2)	HC (m)
88	9	Bolaina	12.8	0.128	0.0129	9.6
89	9	Bolaina	13.5	0.135	0.0143	11.3
90	9	Bolaina	9.6	0.096	0.0072	4.9
91	10	Bolaina	17.1	0.171	0.0230	11
92	10	Bolaina	11.9	0.119	0.0111	7.1
93	10	Bolaina	14.5	0.145	0.0165	6.1
94	10	Bolaina	15.9	0.159	0.0199	10.3
95	10	Bolaina	12.3	0.123	0.0119	7.9
96	10	Bolaina	13.1	0.131	0.0135	9.1
97	10	Bolaina	11.7	0.117	0.0108	5.9
98	10	Bolaina	11.4	0.114	0.0102	6.1
99	10	Bolaina	15.6	0.156	0.0191	8.1
100	10	Bolaina	14.9	0.149	0.0174	8.6
101	11	Bolaina	13.7	0.137	0.0147	6.5
102	11	Bolaina	14.1	0.141	0.0156	7.6
103	11	Bolaina	14.7	0.147	0.0170	6.7
104	11	Bolaina	13.2	0.132	0.0137	5.9
105	11	Bolaina	15.2	0.152	0.0181	9.3
106	11	Bolaina	16.4	0.164	0.0211	7.5
107	11	Bolaina	13.7	0.137	0.0147	10.7
108	11	Bolaina	16.5	0.165	0.0214	7.1
109	11	Bolaina	13.7	0.137	0.0147	8.4
110	11	Bolaina	14.5	0.145	0.0165	7.4
111	12	Bolaina	21.2	0.212	0.0353	14.5
112	12	Bolaina	15.6	0.156	0.0191	8.1
113	12	Bolaina	17.4	0.174	0.0238	10
114	12	Bolaina	14.3	0.143	0.0161	6.7
115	12	Bolaina	9.4	0.094	0.0069	5.6
116	12	Bolaina	12.5	0.125	0.0123	9.8
117	12	Bolaina	11.6	0.116	0.0106	7.1
118	12	Bolaina	16.4	0.164	0.0211	12.1

Tabla 11. Resultados de la prueba de Shapiro-Wilk para las variables IMA y COS (n = 12)

Variable	W de Shapiro	p-valor	Interpretación	Decisión
IMA DAP (cm/año)	0.9584	0.7611	Distribución normal	H ₀ no rechazada
IMA HT (m/año)	0.9666	0.8724	Distribución normal	H ₀ no rechazada
IMA HC (m/año)	0.9845	0.9958	Distribución normal	H ₀ no rechazada
IMA AB (m ² /año)	0.9668	0.8746	Distribución normal	H ₀ no rechazada
IMA VC (m ³ /año)	0.8484	0.0351	No normal	H ₀ rechazada
COS (t/ha)	0.9562	0.7287	Distribución normal	H ₀ no rechazada

Nota. H₀ = distribución normal. Nivel de significancia $\alpha = 0.05$. n = 12 transectos.

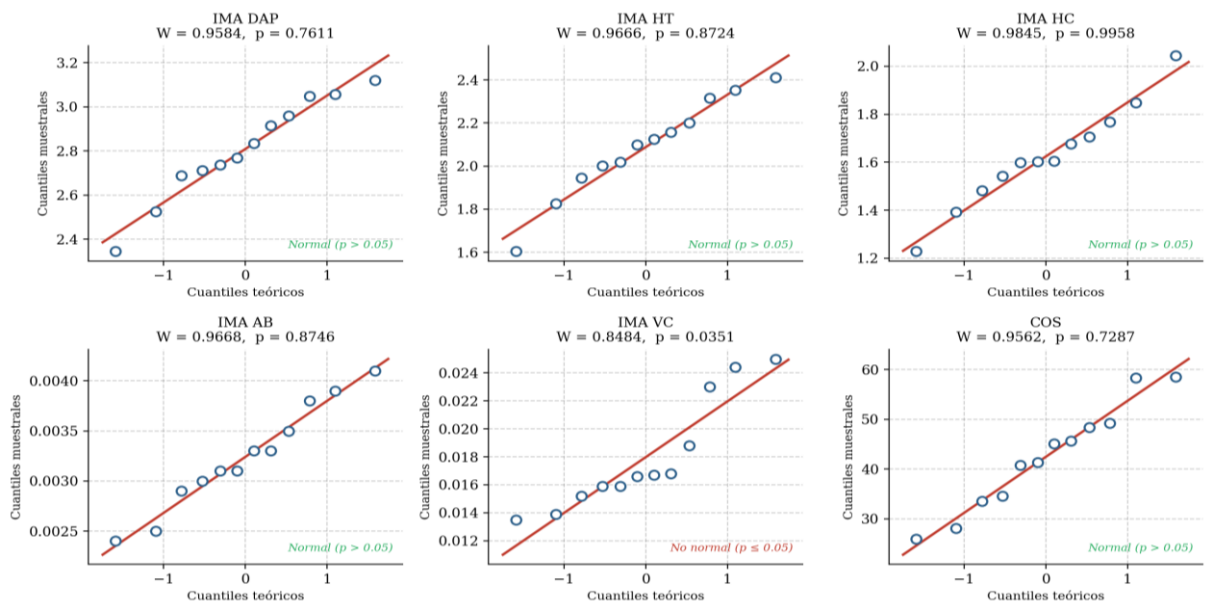


Figura 9. Gráficos Q-Q de normalidad para las variables IMA y COS de *Guazuma crinita*. La línea roja indica la distribución normal teórica esperada. Se muestran los estadísticos W y p-valor de la prueba de Shapiro-Wilk para cada variable



Figura 10. Medición del diámetro a la altura del pecho (DAP) de *Guazuma crinita* (bolaina blanca) en el sistema agroforestal cacao–bolaina (trabajo de campo).



Figura 11. Muestreo de suelo por estratos de profundidad (0–10, 10–20 y 20–30 cm) mediante cilindro de volumen conocido en el sistema agroforestal cacao–bolaina (trabajo de campo)



Figura 12. Delimitación y registro del punto de muestreo de suelo en campo para la colecta de muestras por profundidad en el sistema agroforestal cacao–bolaina.



Figura 13. Medición de variables dendrométricas en *Guazuma crinita* (bolaina blanca): altura total con telémetro y DAP con cinta diamétrica en el sistema agroforestal cacao–bolaina.



Figura 14. Medición de altura total de *Guazuma crinita* (bolaina blanca) mediante telémetro digital durante el trabajo de campo en el sistema agroforestal cacao–bolaina.



Figura 15. Rotulado y embolsado de muestras de suelo recolectadas para el análisis de carbono orgánico en el sistema agroforestal cacao–bolaina.



Figura 16. Preparación y registro de muestras de suelo en el Laboratorio de Análisis de Suelos de la UNAS para la determinación de carbono orgánico (método Walkley–Black).



Figura 17. Pesaje de muestras de suelo en balanza analítica para la determinación de densidad aparente y carbono orgánico en el laboratorio.



Figura 18. Área de estudio en el sistema agroforestal cacao–bolaina del centro poblado Supte San Jorge (Luyando), donde se realizó el muestreo de suelo y la evaluación dendrométrica de *Guazuma crinita*.