

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA EN

RECURSOS NATURALES RENOVABLES



**INCREMENTO DEL CRECIMIENTO INICIAL EN UNA PLANTACIÓN DE
Swietenia macrophylla (CAOBA) APLICANDO ABONO INORGÁNICO EN TINGO
MARÍA**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

PRESENTADO POR:

ALEXANDER PAUL PIZARRO RAMIREZ

Tingo María – Perú

2025



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 133-2025-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 14 de noviembre de 2025, a horas 7:00 p.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables de la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva para calificar la tesis titulada:

“INCREMENTO DEL CRECIMIENTO INICIAL EN UNA PLANTACIÓN DE *Swietenia macrophylla* (CAOBA) APLICANDO ABONO INORGÁNICO EN TINGO MARÍA”

Presentado por el Bachiller: **PIZARRO RAMIREZ, ALEXANDER PAUL** 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 EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 04 de diciembre de 2025

Ph. D. LUIS ALBERTO VALDIVIA ESPINOZA
PRESIDENTE

Ing. MSc. WARREN RIOS GARCIA
MIEMBRO



Ing. MSc. ANDY WILLIAMS VELA ZEVALLOS
MIEMBRO

Ing. MSc. EDILBERTO DIAZ QUINTANA
ASESOR

Ing. MSc. JENRI RUIZ GONZALES
ASESOR

Dr. YTAVCLERH VARGAS CLEMENTE
(AUSENTE POR AÑO SABATICO)



UNAS

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO REPOSITORIO INSTITUCIONAL

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 419 - 2025 - 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 en Recursos Naturales Renovables

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional
-------	---	------------------------------------

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
INCREMENTO DEL CRECIMIENTO INICIAL EN UNA PLANTACIÓN DE Swietenia macrophylla (CAOBA) APLICANDO ABONO INORGÁNICO EN TINGO MARÍA	ALEXANDER PAUL PIZARRO RAMIREZ	03 % Tres	Menor a 20 %

Tingo María, 16 de diciembre de 2025.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES



INCREMENTO DEL CRECIMIENTO INICIAL EN UNA PLANTACIÓN DE *Swietenia macrophylla* (CAOBA) APLICANDO ABONO INORGÁNICO EN TINGO MARÍA

Autor	: Alexander Paul Pizarro Ramirez	
Asesores	: Ing. M.Sc. Edilberto Diaz Quintana Ing. Mg. Jenri Ruiz Gonzales	
Área de investigación	: Valorización de la biodiversidad, recursos naturales y biotecnología	
Grupo de investigación	: Manejo, conservación y aprovechamiento sostenible de la biodiversidad y recursos naturales	
Línea de investigación:	: Manejo, conservación y aprovechamiento sostenible de la biodiversidad y recursos naturales	
Lugar de ejecución	: Fundo "Pizarro" Tingo María, Rupa Rupa, Leoncio Prado, Huánuco	
Duración	: 08 meses	
Financiamiento	: S/. 3 061,00	
FEDU	: No	
Propio	: Si	
Otros	: No	

Tingo María – Perú, 2025



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
OFICINA DE INVESTIGACIÓN
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA
SELVA

REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO
TÍTULO PROFESIONAL, INVESTIGACIÓN DOCENTE Y TESISISTA

I. Datos generales

Universidad : Universidad Nacional Agraria de la Selva
Facultad : Facultad de Recursos Naturales Renovable
Escuela Profesional : Escuela Profesional de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables
Título de la Tesis : Incremento del crecimiento inicial en una plantación de *Swietenia macrophylla* King (caoba) aplicando abono inorgánico en Tingo María
Objetivo general : Determinar el efecto de la aplicación de abono inorgánico en el crecimiento inicial de una plantación de *Swietenia macrophylla* King “caoba” en Tingo María.
Autor de la tesis : Alexander Paul Pizarro Ramirez
DNI : 44734086
Correo electrónico : alexander.pizarro@unas.edu.pe
Asesor de la Tesis : Ing. M.Sc. Edilberto Diaz Quintana
Ing. Mg. Jenri Ruiz Gonzales
Área de investigación : Valorización de la biodiversidad, recursos naturales y biotecnología
Grupo de investigación : Manejo, conservación y aprovechamiento sostenible de la biodiversidad y recursos naturales
Línea de investigación : Manejo, conservación y aprovechamiento sostenible de la biodiversidad y recursos naturales
Lugar de ejecución : Fundo “Pizarro” Tingo María, Rupa Rupa, Leoncio Prado, Huánuco
Fecha de inicio : 02 de enero del 2024
Fecha de término : 02 de agosto del 2024
Presupuesto : S/. 3 061,00
Financiamiento : Propio (x) FEDU () Externo ()

Tingo María, Perú, diciembre 2025


Alexander Paul Pizarro Ramirez
Tesisista


Ing. MSc Edilberto Díaz Quintana
Asesor


Ing. Mg Jenri Ruiz Gonzales
Asesor

DEDICATORIA

Dedico este logro a Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza en cada paso de este camino. Su infinita misericordia, sabiduría y amor me han permitido superar los desafíos y continuar con fe y esperanza. A Él le agradezco por brindarme la oportunidad y la fuerza necesarias para alcanzar esta meta.

A mis padres, quienes siempre han sido mi pilar y fuente inagotable de inspiración. Su amor incondicional, su ejemplo de esfuerzo y su apoyo constante han sido fundamentales en mi vida. Este logro es tan suyo como mío, pues sin su dedicación y confianza, este sueño no habría sido posible.

A mi esposa Yessica, mis dos hijos: Jairo Alexander y Noah Mikhail por su compañía incondicional y por estar siempre a mi lado. Su apoyo, sus palabras de aliento y su presencia han sido una motivación invaluable en este proceso. Este logro también les pertenece, pues forman parte esencial de mi vida y de este triunfo que hoy celebro con el corazón lleno de gratitud.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta investigación. Este proyecto ha sido un viaje lleno de aprendizaje y descubrimientos, y no habría sido posible sin el apoyo y la colaboración de diversas personas.

Agradezco profundamente a la institución educativa que me brindó una formación académica de calidad, la cual ha sido fundamental para mi desarrollo profesional. Esta institución ha sido el pilar de mi crecimiento y aprendizaje, proporcionándome las herramientas necesarias para enfrentar los retos que se presentaron durante esta investigación.

A mi asesor, le agradezco por su apoyo incondicional, su guía experta y por siempre estar dispuesto a compartir su conocimiento. Su dedicación y compromiso han sido esenciales para el desarrollo de este trabajo, y su orientación me ha permitido alcanzar este logro.

A mis jurados, agradezco por su tiempo, esfuerzo y valiosas observaciones durante el proceso de evaluación. Sus comentarios y sugerencias han enriquecido este trabajo, permitiéndome mejorar y alcanzar los estándares que se esperaban.

Muchas gracias y que Dios les bendiga.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Marco teórico	3
2.1.1. Plantación de caoba.....	3
2.1.1.1. Ventajas e importancia de las plantaciones forestales.....	3
2.1.1.2. Crecimiento de especies forestales	4
2.1.1.3. Sistemas de plantación	4
2.1.1.4. Factores a evaluar en una plantación	5
2.1.1.5. Importancia de <i>S. macrophylla</i>	6
2.1.1.6. Manejo silvícola.....	6
2.1.1.7. Mantenimiento de las plantaciones	7
2.1.1.8. Rendimiento maderero	7
2.1.2. Abonos	7
2.1.2.1. Abonos inorgánicos.....	8
2.1.2.2. Fertilidad del suelo.....	9
2.1.2.3. Absorción de nutrientes	10
2.1.2.4. Síntomas de deficiencia nutricional	10
2.1.2.5. Abonos nitrogenados.....	11
2.1.2.6. Fertilización en especies forestales	11
2.2. Estado del arte.....	12
2.2.1. A nivel internacional	12
2.2.2. A nivel nacional.....	19
2.2.3. Del ámbito local	23
2.3. Marco conceptual.....	25
III. MATERIALES Y MÉTODOS	27
3.1. Lugar de ejecución	27
3.1.1. Ubicación geográfica y política	27
3.1.2. Zona de vida.....	27
3.1.3. Clima	28
3.1.4. Fisiografía	28
3.2. Material y métodos	28
3.2.1. Materiales y equipos	28

3.2.2. Metodología	28
3.2.2.1. Incremento de la altura de planta, diámetro de fuste y diámetro de copa en plantas de <i>Swietenia macrophylla</i> con la aplicación del abono inorgánico	28
3.2.2.2. Efecto del abono inorgánico en el incremento en altura de planta, diámetro de fuste y diámetro de copa.....	31
3.2.2.3. Componentes de investigación.....	34
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1. Incremento de <i>S. macrophylla</i> en altura de planta, diámetro de fuste y diámetro de copa con la aplicación del abono inorgánico	38
4.2. Efecto del abono inorgánico en el incremento en altura de planta, diámetro de fuste y diámetro de copa	42
4.3. Prueba estadística para la altura de planta, el diámetro de fuste y el diámetro de copa	44
V. CONCLUSIONES.....	48
VI.PROPUESTAS A FUTURO.....	49
VII.REFERENCIAS.....	50
ANEXOS.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Análisis de variancia (ANOVA)	33
2. Cantidad de urea y superfosfato triple por planta en cada tratamiento	33
3. Descripción del tratamiento para dos aplicaciones.....	34
4. Variables e indicadores.	35
5. Clase o categoría de diámetro de fuste.	36
6. Incremento corriente anual por tratamientos y bloques de las variables de estudio.....	39
7. Análisis de varianza de altura de plantas.	43
8. Análisis de varianza del diámetro de copa.....	43
9. Análisis de varianza del diámetro de planta.	44
10. Prueba de DGC para la altura de planta con $\alpha=0,05$	44
11. Prueba de DGC para el diámetro de copa con $\alpha=0,05$	45
12. Prueba de DGC para el diámetro de planta con $\alpha=0,05$	46
13. Datos de campo de las evaluaciones realizadas a la plantación de Caoba.	56
14. Datos por cada tratamiento y bloques de las plantas de Caoba.	61
15. Promedios por tratamiento y bloque por categoría de cada evaluación.	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.	27
2. Croquis de los bloques y tratamientos en la plantación de (Caoba).....	29
3. Medición de la altura de planta de caobas por cada tratamiento.	30
4. Medición del diámetro de planta por cada tratamiento.	30
5. Medición del diámetro de copa de planta por cada tratamiento.	31
6. ICA de altura de las plantas de <i>S. macrophylla</i> por tratamiento en cada bloque.....	40
7. ICA del diámetro de copa de las plantas de <i>S. macrophylla</i> por tratamiento en cada bloque.	41
8. ICA del diámetro de las plantas de <i>S. macrophylla</i> por tratamiento en cada bloque.	42
9. Prueba de DGC para la altura de planta por bloques con $\alpha=0,05$	45
10. Prueba de DGC para el diámetro de copa por bloques con $\alpha=0,05$	46
11. Prueba de DGC para el diámetro de planta por bloques con $\alpha=0,05$	47
12. Análisis de suelo del área de investigación.	63
13. Limpieza del área de investigación.	64
14. Alineación para la instalación de las plantas de <i>S. macrophylla</i>	64
15. Apertura de hoyos para la instalación de los plántones de <i>S. macrophylla</i>	65
16. Control del peso de cada una de las dosis de acuerdo con los tratamientos.....	65
17. Abonamiento antes del plantado.....	66
18. Instalación de las plantas de Caoba luego de mezclar el abono con la tierra.	66
20. Evaluación de línea base del diámetro y altura de plántula instalada.	67
21. Evaluación de línea base de la altura de planta.	68
22. Evaluación de línea base del diámetro de copa.	68

RESUMEN

El estudio analizó diferentes dosis de nitrógeno y fósforo que afectan el crecimiento inicial de *Swietenia macrophylla* (caoba), utilizando un diseño de bloques completos al azar (4 bloques \times 3 tratamientos + control). Durante seis meses, se midió el aumento en altura, el diámetro del fuste y el diámetro de la copa en 48 plantas. Los resultados indicaron que la combinación ideal (86,95 g de urea + 396,74 g de superfosfato triple) generó los mayores incrementos: 71,66 cm en altura, 52,33 cm en diámetro de copa y 16,19 mm en diámetro de fuste ($p < 0,05$). Sin embargo, el análisis de varianza mostró que la variabilidad espacial (bloques) explicó hasta el 72 % de la variación ($R^2=0,72$), superando el impacto de los tratamientos. Esto resalta la influencia de factores edáficos no controlados en el desarrollo temprano de la especie. La investigación demuestra que, aunque la fertilización inorgánica puede acelerar el crecimiento inicial, su efectividad depende en gran medida de las condiciones específicas del sitio. Estos hallazgos ofrecen información valiosa para el manejo sostenible de plantaciones forestales en ecosistemas tropicales, sugiriendo la necesidad de realizar diagnósticos de suelo previos para optimizar los programas de fertilización. El estudio también contribuye al campo de los recursos naturales renovables al proporcionar parámetros técnicos para la restauración de suelos degradados y el manejo silvícola de especies maderables en peligro.

Palabras clave: Fertilización de bosques, desarrollo diamétrico, silvicultura tropical, gestión sostenible, recuperación de suelos.

ABSTRACT

In the study, different doses of nitrogen and phosphorous that affect the initial growth of *Swietenia macrophylla* (caoba) were analyzed using a completely randomized block design (4 blocks x 3 treatments + a control). During six months, the increase in the height, diameter of the trunk and the diameter of the canopy was measured for forty eight plants. The results indicated that the ideal combination (86.95 g of urea + 396.74 g of triple superphosphate) generated the greatest increases: 71.66 cm in height, 52.33 cm in the diameter of the canopy and 16.19 mm in the diameter of the trunk ($p < 0.05$). Nonetheless, the variance analysis showed that the spatial variability (blocks) explained up to 72% of the variation ($R^2 = 0.72$), surpassing the impact of the treatments. This highlighted the influence of the uncontrolled edaphic factors on the early development of the specie. The research demonstrated that, even though non-organic fertilization could accelerate the initial growth, its effectiveness depended, to a great extent, on the specific conditions of the site. These findings provided valuable information for the sustainable management of the forest plantations in tropical ecosystems, suggesting the need to carry out diagnostics of the soil first, in order to optimize the fertilization programs. The study also contributed to the field of natural renewable resources by providing technical parameters for the restoration of degraded soil and the silvicultural management of endangered timber species.

Keywords: fertilization of forests, diameter development, tropical silviculture, sustainable management, recuperation of soil

I. INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales, que cubren la superficie de nuestro planeta, son verdaderos tesoros de biodiversidad y ecosistemas que reaccionan de manera muy sensible a los cambios globales, como el cambio climático. En la Amazonía peruana, la deforestación impulsada por la agricultura migratoria, la minería ilegal y, más recientemente, el cultivo industrial de palma aceitera ha llevado a una preocupante pérdida de biodiversidad y un serio deterioro de la calidad del suelo. Esta situación requiere que implementemos estrategias de recuperación que enfrenten la degradación del territorio y fomenten un manejo sostenible de nuestros recursos forestales.

Una opción para abordar este problema es la reforestación con especies nativas de gran valor, como la *S. macrophylla*, conocida como caoba. No obstante, su crecimiento inicial es bastante lento, lo que puede desanimar a los agricultores. Por eso, es fundamental investigar técnicas que puedan acelerar su establecimiento. En Tingo María, en particular, no se ha estudiado el impacto de la fertilización inorgánica en el crecimiento temprano de esta especie, especialmente en suelos locales que tienen una alta saturación de aluminio y pendientes pronunciadas. En tal sentido, la pregunta de investigación que surge es: ¿Cuánto será el incremento del crecimiento inicial en una plantación de *S. macrophylla* aplicando abono inorgánico en Tingo María?

Esta investigación se justifica desde un enfoque metodológico al implementar un diseño experimental controlado que permite medir con precisión el impacto de la fertilización inorgánica en las variables de crecimiento dasométrico. En términos prácticos, los resultados ofrecen a agricultores y reforestadores una opción técnica para mejorar el manejo silvicultural de la caoba, acortando el tiempo de establecimiento. Desde una perspectiva social, ayuda a diversificar la producción y a incrementar los ingresos familiares a través de plantaciones forestales rentables. En el ámbito ambiental, fomenta la recuperación de suelos degradados, el secuestro de carbono y la conservación de una especie maderable en peligro, aliviando la presión sobre los bosques naturales.

El estudio investiga cómo diferentes dosis de nitrógeno y fósforo afectan el crecimiento inicial en altura, diámetro del tallo y diámetro de la copa de *S. macrophylla* durante sus primeros meses de vida. Los hallazgos ofrecen a tomadores de decisiones, investigadores, estudiantes y profesionales parámetros técnicos que les ayudarán a diseñar programas de reforestación más eficientes y adaptados a las condiciones del suelo específicas de la región. Además, establece una base sólida para futuras investigaciones sobre el manejo de la fertilización de especies forestales nativas y refuerza las capacidades locales en silvicultura aplicada.

La investigación presenta la siguiente hipótesis: existe incremento positivo del crecimiento inicial en una plantación de *S. macrophylla* aplicando abono inorgánico en Tingo María.

Objetivo general:

- Evaluar el incremento del crecimiento inicial en una plantación de *S. macrophylla* King (Caoba) aplicando abono inorgánico en Tingo María.

Objetivos específicos:

- Determinar el incremento de la altura de planta, diámetro de fuste y diámetro de copa en plantas de *S. macrophylla* con la aplicación del abono inorgánico en Tingo María.
- Analizar el efecto del abono inorgánico en el incremento en altura de planta, diámetro de fuste y diámetro de copa en Tingo María.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Plantación de caoba

La caoba es una de las especies forestales más emblemáticas y valiosas de los neotrópicos. Su alta demanda comercial ha llevado a la sobreexplotación de sus poblaciones naturales, lo que la ha catalogado como vulnerable en la Lista Roja de la UICN. Esta presión ha motivado la creación de plantaciones comerciales, que se han convertido en una estrategia clave para su conservación y producción sostenible, aliviando así la extracción de los bosques primarios (López et al., 2019). Por lo tanto, las plantaciones de caoba representan un punto de encuentro esencial entre el desarrollo económico y la restauración ecológica en la Amazonía.

El manejo silvícola en las plantaciones de caoba necesita ser metódico y adaptarse a las condiciones locales para garantizar su éxito. Es crucial contar con un cronograma de actividades bien estructurado que incluya la preparación del terreno, la fertilización al momento del establecimiento, el control de malezas y la protección fitosanitaria, especialmente durante los primeros años, que son los más críticos para el desarrollo de la especie (Gómez, 2020). Este enfoque intensivo al inicio es particularmente importante en suelos que han sido degradados por actividades agrícolas, donde los desequilibrios nutricionales son bastante comunes.

En la actualidad, *S. macrophylla* se encuentra principalmente como árboles dispersos en paisajes agrícolas, cercas vivas y pequeños fragmentos de bosque. Su futuro a largo plazo depende en gran medida del éxito de las plantaciones que se han establecido con fines comerciales y de recuperación, así como de la conservación de los bosques naturales donde todavía se encuentra (Organización Internacional de las Maderas Tropicales [ITTO], 2021). Los proyectos de reforestación con esta especie no solo buscan producir madera de alto valor, sino que también tienen como objetivo mejorar la conectividad del paisaje y ofrecer servicios ecosistémicos.

2.1.1.1. Ventajas e importancia de las plantaciones forestales

Las plantaciones forestales son una herramienta clave para satisfacer la creciente demanda mundial de madera, aliviando así la presión sobre nuestros bosques naturales. Se estima que pueden generar entre 10 y 20 veces más madera por hectárea en comparación con los bosques nativos durante el mismo período, lo que las convierte en una opción muy eficiente para una producción sostenible (Van Bodegom et al., 2008). Pero no solo se trata de producción; estas plantaciones también ofrecen servicios ecosistémicos esenciales,

como la restauración de suelos degradados, la regulación del agua y la captura de carbono, lo que ayuda de manera significativa en la lucha contra el cambio climático (Bonnesoeur et al., 2019).

En el contexto de Perú, las plantaciones forestales se están promoviendo como parte de las estrategias de reforestación para combatir la degradación de tierras que ha sido provocada por la deforestación y la agricultura migratoria. Estos sistemas no solo se enfocan en la producción de madera, sino que también buscan restaurar la funcionalidad ecológica y ofrecer beneficios socioeconómicos a las comunidades locales, impulsando así el desarrollo rural sostenible (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre [SERFOR], 2021). La inclusión de especies nativas de alto valor, como la caoba, en estos proyectos, refuerza tanto los objetivos de conservación como los de rentabilidad económica.

2.1.1.2. Crecimiento de especies forestales

El crecimiento inicial de las especies forestales es un indicador clave de cómo se adaptan al entorno y de la efectividad de las prácticas de manejo silvícola. Factores como la altura total, el diámetro del tronco y la expansión de la copa son respuestas directas a condiciones ambientales, como la disponibilidad de nutrientes, la humedad del suelo y la competencia por la luz (Pinto et al., 2021). Tener una tasa de crecimiento rápida en las primeras etapas es crucial para garantizar que la plantación se establezca con éxito y para disminuir la mortalidad. En especies valiosas como *S. macrophylla*, un crecimiento inicial robusto puede ser determinante para superar momentos críticos de vulnerabilidad a plagas, como el ataque de *Hypsipyla grandella* (López et al., 2019).

La fertilización, especialmente, puede impulsar de manera notable el crecimiento en altura y diámetro durante la fase de establecimiento. Investigaciones en plantaciones tropicales han mostrado que una aplicación equilibrada de nitrógeno y fósforo puede fomentar el desarrollo de raíces y hojas, lo que mejora la capacidad de la planta para absorber recursos (Ramos et al., 2020). Al monitorear el crecimiento a través de estas variables dasométricas, se puede evaluar la efectividad de los tratamientos aplicados y hacer los ajustes necesarios en el manejo para maximizar la productividad de la plantación.

2.1.1.3. Sistemas de plantación

Los sistemas de plantación son clave para definir cómo se distribuyen y se relacionan los árboles en su entorno. Esto afecta su interacción con elementos como la luz, los nutrientes y la competencia. En los sistemas de campo abierto, las plántulas crecen sin la sombra de otros árboles, lo que les permite alcanzar rápidamente una buena altura, pero también las hace más vulnerables al estrés por falta de agua y a la proliferación de malezas

(Chambi et al., 2020). Este enfoque es muy común en las plantaciones comerciales de caoba, ya que facilita el uso de maquinaria y promueve un crecimiento más rápido en diámetro durante los primeros años.

Como alternativa, los sistemas de enriquecimiento bajo dosel intentan replicar las condiciones naturales de regeneración, utilizando árboles remanentes para proporcionar sombra temporal. Esta estrategia ayuda a disminuir notablemente el ataque de *H. grandella* en las meliáceas, ya que la sombra altera las condiciones microclimáticas que benefician a la plaga (López et al., 2019). Sin embargo, este enfoque puede ralentizar las tasas de crecimiento inicial y requiere un manejo gradual del dosel para permitir que los árboles en desarrollo se liberen.

El sistema en tresbolillo (6 x 6 m) que se emplea en esta investigación está diseñado para maximizar la captación de luz y el espacio para las raíces, asegurando que los recursos se distribuyan de manera equitativa entre los individuos. Esta configuración espacial promueve un crecimiento simétrico de las copas y ayuda a disminuir la competencia entre especies en las etapas tempranas, lo cual es fundamental para lograr troncos rectos y bien formados (SERFOR, 2021). Es importante calcular la densidad inicial teniendo en cuenta el diámetro de la copa que se espera alcanzar en la madurez, para así reducir la necesidad de raleos en el futuro.

2.1.1.4. Factores a evaluar en una plantación

La evaluación sistemática de plantaciones jóvenes implica monitorear variables dasométricas que actúan como señales tempranas del desarrollo futuro. La altura total, el diámetro a la altura del cuello (DAC) y el diámetro de copa son los parámetros clave para medir las respuestas a tratamientos silvícolas, como la fertilización (Pinto et al., 2021). El Incremento Corriente Anual (ICA), que se calcula a partir de estas mediciones, nos permite comparar la efectividad de distintas estrategias de manejo nutricional.

Es fundamental evaluar periódicamente el estado fitosanitario, registrando la incidencia y severidad de plagas y enfermedades. En el caso de la caoba, es crucial prestar especial atención a *H. grandella* durante los primeros tres años, documentando el porcentaje de plantas afectadas y el número de brotes dañados por cada individuo (López et al., 2019). Además, la supervivencia general, la inclinación del fuste y la competencia con la vegetación circundante son aspectos que completan el diagnóstico integral de la plantación.

La interpretación conjunta de estos indicadores nos permite hacer ajustes oportunos en la gestión silvícola. Por ejemplo, si observamos una baja tasa de crecimiento en altura, pero un buen desarrollo de la copa, esto podría señalar una deficiencia

nutricional específica. Por otro lado, una alta mortalidad acompañada de síntomas de amarillamiento podría indicar problemas de adaptación al suelo (Chambi et al., 2020). Esta evaluación integral es clave para asegurar el éxito de las inversiones en reforestación con especies nativas de alto valor.

2.1.1.5. Importancia de *Swietenia macrophylla*

S. macrophylla es una especie de madera dura tropical que tiene un importante valor comercial. Su madera es muy apreciada por su durabilidad, su hermoso color y su facilidad de trabajo, lo que le ha ayudado a afianzarse en los mercados internacionales. Sin embargo, esta popularidad también ha provocado su vulnerabilidad, ya que la sobreexplotación histórica ha afectado gravemente a sus poblaciones naturales (ITTO, 2021). Por lo tanto, es fundamental dar prioridad a su conservación y uso sostenible en las agendas forestales de los países neotropicales, fomentando su cultivo en plantaciones comerciales y sistemas agroforestales.

Además de su valor económico, la caoba desempeña un papel ecológico muy importante en los ecosistemas donde crece. Como especie de dosel, ayuda a dar forma a la estructura del bosque, ofrece refugio a la fauna y participa en los ciclos biogeoquímicos (López et al., 2019). Incluirla en los programas de reforestación en la Amazonía peruana no solo busca producir madera de alta calidad, sino también restaurar áreas degradadas y recuperar los servicios ecosistémicos que se han perdido, todo en línea con los objetivos de la Política Nacional Forestal y de Fauna Silvestre del Perú (SERFOR, 2021).

2.1.1.6. Manejo silvícola

Se refiere al conjunto de prácticas que tienen como objetivo guiar el desarrollo de la plantación hacia metas específicas, ya sean de producción, protección o conservación. Durante la fase de establecimiento, actividades como la fertilización, el control de malezas y la protección contra plagas son clave para garantizar una alta tasa de supervivencia y un crecimiento inicial robusto (SERFOR, 2021). Un manejo intensivo en los primeros dos o tres años es especialmente importante en los suelos degradados de la Amazonía, donde la competencia por los recursos es bastante alta.

La fertilización como práctica en el ámbito silvícola necesita ser cuidadosamente planificada, teniendo en cuenta el diagnóstico nutricional del suelo y las necesidades específicas de cada especie. En el caso de *S. macrophylla*, se ha comprobado que aplicar de manera equilibrada nitrógeno y fósforo durante la plantación y en los primeros meses puede acelerar notablemente el crecimiento, ayudando a los árboles a superar su etapa más vulnerable (Gómez, 2020). Otras prácticas, como la poda de formación y los raleos, se

programan para más adelante, con el objetivo de mejorar la forma del tronco y la calidad final de la madera.

2.1.1.7. Mantenimiento de las plantaciones

El cuidado de las plantaciones forestales en la etapa de establecimiento se enfoca en eliminar cualquier obstáculo que impida su crecimiento. Una de las tareas más cruciales es el control de malezas, ya que la competencia por agua, luz y nutrientes puede afectar seriamente la supervivencia y el desarrollo de los árboles jóvenes (Chambi et al., 2020). Se sugiere realizar deshierbes de manera regular en un área de 1 a 1,5 metros alrededor de cada planta, especialmente durante la temporada de lluvias, cuando el crecimiento de la vegetación competidora se acelera.

La clase de especie y las condiciones locales del lugar determinan la intensidad y la frecuencia con que se realiza el mantenimiento. La presión de malezas es alta en Tingo María, donde los suelos son fértiles y el clima es húmedo, lo que requiere entre dos y tres deshierbes al año en los primeros tres años (Gómez, 2020). De manera complementaria, el control de plagas como *H. grandella* y el recalce para rectificar plantas inclinadas son componentes de un programa exhaustivo de mantenimiento que asegura un desarrollo estructural óptimo de la plantación.

2.1.1.8. Rendimiento maderero

La cantidad de madera aprovechable que se puede lograr por unidad de área al término del ciclo es el rendimiento maderero de una plantación forestal. Se han registrado aumentos anuales de alrededor de 10 a 20 m³/ha/año para especies como la *S. macrophylla*, en plantaciones puras y bien gestionadas (López et al., 2019). La calidad del lugar, la densidad de plantación y la intensidad del manejo silvícola son factores directamente vinculados con este potencial productivo.

El desarrollo inicial, que se ve afectado por prácticas como la fertilización, es un gran predictor del rendimiento final. Los árboles logran llegar más pronto a la fase de "cerramiento del dosel", en la que empieza a acumularse un volumen maderable considerable (Pinto et al., 2021), cuando se establece rápidamente y de manera saludable. Las estimaciones de la productividad futura y la rentabilidad de una plantación se pueden hacer con herramientas útiles que se basan en el aumento del diámetro y de la altura durante los primeros años.

2.1.2. Abonos

En el ámbito agronómico, "abonos" alude a cualquier tipo de material, ya sea sintético o natural, que se añade al suelo para aportar uno o más nutrientes básicos para el

desarrollo vegetal. Según Bünemann y otros (2018), estos se dividen en dos categorías principales: los fertilizantes orgánicos, que provienen de la materia animal o vegetal (como el compost o la gallinaza), y los fertilizantes inorgánicos o minerales, que se producen a través de procedimientos industriales. La diferencia fundamental reside en su composición, la rapidez con que los nutrientes se liberan y el efecto que tienen sobre las características biológicas del suelo.

Los abonos inorgánicos son conocidos por su alta concentración de nutrientes que están en formas químicas simples y son rápidamente absorbibles por las raíces. En sus etiquetas, se asegura el contenido de los macronutrientes principales: el Nitrógeno (N) se presenta como un porcentaje elemental, mientras que el Fósforo (P) y el Potasio (K) se indican como equivalentes de óxidos (P_2O_5 y K_2O) (Heredia et al., 2020). Esta estandarización hace que sea más fácil calcular dosis precisas para satisfacer las necesidades nutricionales específicas de un cultivo.

La decisión de usar abonos orgánicos o inorgánicos no es una cuestión de blanco o negro; depende de los objetivos de manejo que tengamos. Si buscamos establecer plantaciones forestales rápidamente, los abonos inorgánicos son una excelente opción gracias a su acción rápida, lo que ayuda a corregir deficiencias críticas y permite que las plántulas crezcan con fuerza (Fox et al., 2019). Sin embargo, para lograr una gestión sostenible a largo plazo, es fundamental integrar fuentes orgánicas que ayuden a mantener y mejorar la salud del suelo en general.

2.1.2.1. Abonos inorgánicos

Son productos industriales que tienen nutrientes fundamentales para las plantas en formas químicas puras y de rápida disponibilidad. Se distinguen por su gran concentración de macronutrientes principales (nitrógeno, fósforo y potasio), lo cual posibilita la corrección eficaz de carencias nutricionales concretas en el terreno (Heredia et al., 2020). Su implementación tiene como objetivo optimizar el desarrollo y el rendimiento de los cultivos, resultando especialmente beneficiosa en la etapa crítica de establecimiento de plantaciones forestales. Asimismo, estos abonos buscan maximizar el crecimiento y rendimiento de los cultivos, pero su uso excesivo puede generar efectos negativos en el suelo y el medio ambiente. Se producen mediante procesos químicos y suelen ser más económicos y fáciles de aplicar que los orgánicos, aunque pueden afectar la biodiversidad del suelo y contribuir a la contaminación ambiental (Romero & Ruíz, 2021).

No obstante, es necesario un manejo técnico preciso para el uso de estos insumos, pues su aplicación deficiente o excesiva puede tener efectos adversos en el

ecosistema. La contaminación de las fuentes de agua debido a la escorrentía de fosfatos o la lixiviación de nitratos, así como la disminución de la actividad y diversidad de la microbiota edáfica beneficiosa son algunas de estas. (Bünemann et al., 2018). Por lo tanto, para conseguir una fertilización sensata y sustentable, la dosificación debe fundamentarse en un diagnóstico del terreno que se haya realizado con anterioridad.

El uso de fertilizantes inorgánicos como el superfosfato triple y la urea es una práctica habitual en el ámbito del silvicultor peruano, con el propósito de promover el crecimiento inicial de especies nativas valiosas, tales como la caoba, en terrenos que a menudo se encuentran deteriorados en la Amazonía (Zúñiga et al., 2022). Cuando se utilizan adecuadamente, estos fertilizantes tienen la capacidad de acelerar el crecimiento de las plantas de manera significativa, ayudándolas a vencer la competencia con las malas hierbas y acortando el tiempo de establecimiento.

2.1.2.2. Fertilidad del suelo

La fertilidad de la tierra es un término integral que describe la habilidad de esta para proveer nutrientes en proporciones equilibradas y apropiadas para el crecimiento ideal de las plantas. Esta habilidad es producto de la intrincada interacción entre las características físicas (estructura, textura), químicas (capacidad de intercambio catiónico, pH) y biológicas (materia orgánica, actividad microbiana) del terreno (Bünemann et al., 2018). Un suelo fértil no solo contiene nutrientes disponibles, sino también una estructura que favorece un desarrollo adecuado de las raíces y una retención apropiada de agua.

Los suelos de los trópicos húmedos, como la zona de Tingo María, suelen presentar retos para la fertilidad, incluyendo acidez elevada, baja disponibilidad de fósforo y saturación alta de aluminio que puede ser nocivo para las raíces (Zúñiga et al., 2022). Estas limitaciones frenan el crecimiento inicial de las plantas forestales, por lo que es fundamental realizar un análisis del suelo preliminar para detectar las restricciones concretas y prever las enmiendas que se requieran.

Una táctica que mejora la fertilidad química del suelo de manera rápida es el uso de abonos inorgánicos, que cubren las carencias críticas de nutrientes. Sin embargo, para lograr una fertilidad sostenible, es fundamental combinar estas prácticas con la gestión de la materia orgánica, que mejora al mismo tiempo las características biológicas y físicas del terreno, generando un ambiente radical más favorable para el crecimiento de la plantación a largo plazo (Heredia et al., 2020).

2.1.2.3. Absorción de nutrientes

Las plantas absorben iones minerales disueltos en la solución del suelo por medio de sus raíces, lo que configura un proceso fisiológico esencial llamado absorción de nutrientes. Para que esto suceda, es necesario que los nutrientes se transporten hasta la superficie radicular a través de tres mecanismos fundamentales: el flujo masal, que es impulsado por el desplazamiento del agua; la difusión, que consiste en mover iones desde áreas con alta concentración hacia zonas con baja concentración; y la interceptación debido al crecimiento de las raíces. Este último mecanismo es esencial para nutrir elementos poco móviles como el fósforo (Barros et al., 2020).

La salud y el tamaño del sistema radicular, además de las condiciones del suelo, determinan la eficacia de absorción. La capacidad de las raíces para absorber nutrientes puede verse muy restringida por factores como la temperatura baja, la compactación, el pH inapropiado o la sequía, aun cuando estos elementos estén en el suelo en una cantidad adecuada (Zúñiga et al., 2022). Por esta razón, las prácticas de gestión que optimizan el ambiente radicular tienen la misma relevancia que la fertilización. Asimismo, las plantas forestales han logrado adaptaciones para mejorar la absorción, entre las que destaca el establecimiento de asociaciones simbióticas con hongos micorrízicos. Estos hongos extienden hifas que funcionan como una extensión del sistema de raíces, lo que les permite investigar un volumen de suelo mucho más grande y absorber nutrientes, en particular fósforo y otros nutrientes inmóviles (Bünemann et al., 2018). Curiosamente, fertilizar con grandes cantidades de fósforo puede eliminar esta simbiosis beneficiosa.

2.1.2.4. Síntomas de deficiencia nutricional

Las plantas muestran déficits nutricionales por medio de síntomas visibles específicos que señalan la función metabólica de cada nutriente. La deficiencia de nitrógeno (N), el cual es un elemento esencial en las proteínas y la clorofila, usualmente se manifiesta en forma de una clorosis extensa que comienza en las hojas más viejas y va acompañada con una disminución significativa del crecimiento (Heredia et al., 2020). La planta tiene como prioridad trasladar el nitrógeno escaso a los meristemas jóvenes, aun a costa de la vegetación más madura.

En cuanto a la falta de fósforo (P), que es crucial para la transferencia de energía y el crecimiento de las raíces, normalmente provoca un enanismo grave y que las hojas tengan un color verde oscuro, azulado o con matices morados, debido a la concentración de antocianinas (Gómez, 2020). El sistema radicular está especialmente afectado,

lo que provoca un desarrollo insuficiente de las raíces y, a su vez, una reducción en la absorción de agua y otros nutrientes, generando así un ciclo de estrés.

Aunque el diagnóstico visual es un instrumento importante para una identificación inicial, a menudo no basta para hacer un diagnóstico exacto, porque la clorosis y otros síntomas pueden ser provocados por la ausencia de diversos nutrientes o por causas abióticas. Por ello, el diagnóstico visual siempre debe ser corroborado con análisis químicos de la tierra y del tejido foliar, que facilitan la cuantificación de las carencias y la realización de una recomendación de fertilización precisa (Fox et al., 2019).

2.1.2.5. Abonos nitrogenados

Los abonos nitrogenados son aquellos que tienen como principal objetivo proporcionar nitrógeno a los cultivos, ya que este es el nutriente que más a menudo limita el crecimiento de las plantas. Entre las fuentes inorgánicas más comunes a nivel mundial se encuentran la urea (46 % N), el nitrato de amonio (34 % N) y el sulfato de amonio (21 % N y 24 % S) (Heredia et al., 2020). La urea es especialmente notable por su alto contenido de nitrógeno y su costo relativamente bajo, lo que la convierte en una opción muy popular en la agricultura y la silvicultura de los países en desarrollo.

Sin embargo, la eficiencia agronómica de la urea puede verse afectada por pérdidas significativas debido a la volatilización de amoníaco (NH_3) si no se incorpora adecuadamente al suelo tras su aplicación. Este fenómeno es impulsado por la enzima ureasa, que se encuentra en el suelo y que descompone la urea en carbonato de amonio, el cual se convierte rápidamente en amoníaco gaseoso en condiciones de pH alcalino superficial (Fox et al., 2019). Para reducir estas pérdidas, se sugiere aplicar la urea antes de lluvias ligeras o incorporarla mecánicamente al suelo.

En los sistemas forestales que se encuentran en laderas, como es habitual en Tingo María, las pérdidas de nitrógeno no solo implican un costo económico, sino que también representan un riesgo para el medio ambiente debido a la posible lixiviación del nitrato (NO_3^-) que queda hacia las aguas subterráneas (Zúñiga et al., 2022). Por esta razón, es fundamental aplicar dosis calculadas a partir de análisis de suelo y, de ser posible, de manera fraccionada. Estas prácticas son clave para maximizar la recuperación de nutrientes por parte de los árboles y reducir el impacto ambiental.

2.1.2.6. Fertilización en especies forestales

La fertilización en especies forestales es una práctica silvícola que tiene un gran impacto, y su éxito realmente depende de que haya una buena sincronización entre la disponibilidad de nutrientes y las etapas en las que los árboles más los necesitan.

Durante la fase de vivero y el establecimiento en el campo, es fundamental contar con una nutrición adecuada para garantizar una alta tasa de supervivencia y un crecimiento tanto de las raíces como de la parte aérea de los árboles (Fox et al., 2019). En el caso de especies nativas como *S. macrophylla*, se ha comprobado que añadir fósforo en el hoyo de plantación es especialmente eficaz para fomentar el desarrollo de las raíces en suelos ácidos.

La respuesta a la fertilización no es la misma para todos y depende de la interacción de varios factores, lo que se conoce como el "efecto sitio". Elementos como la especie de árbol, la textura del suelo, el clima, la microbiología local y la cantidad y tipo de nutrientes aplicados juegan un papel crucial en cuánto puede aumentar el crecimiento (Gómez, 2020). Esto resalta la necesidad de llevar a cabo ensayos de fertilización en cada lugar, ya que las recomendaciones generales pueden no funcionar en situaciones específicas. En ese contexto, el objetivo principal de la fertilización forestal es lograr un crecimiento que cumpla con las expectativas económicas del plantador, ya sea acortando el tiempo de cosecha o aumentando el volumen de madera por hectárea. Sin embargo, un manejo nutricional adecuado también se enfoca en la sostenibilidad, evitando el uso de dosis excesivas que puedan causar desbalances nutricionales, toxicidades o contaminación ambiental, y priorizando la salud del suelo como fundamento para la productividad a largo plazo (Bünemann et al., 2018).

2.2. Estado del arte

2.2.1. A nivel internacional

Rahman y Zhang (2018) demostraron que el uso excesivo de abonos inorgánicos en Bangladesh ha llevado a problemas ambientales y a una disminución en los rendimientos agrícolas. Sorprendentemente, el 70% de los agricultores todavía utiliza la antigua técnica de esparcir abonos. Esta práctica se popularizó en los años 60 durante la campaña "Grow More Food", que promovió el uso de abonos químicos subsidiados. En 2016, se llevó a cabo un estudio que examinó los efectos de esta técnica de esparcimiento en el uso excesivo de abonos y los riesgos ambientales, entrevistando a 211 agricultores. Para el análisis, se aplicó un modelo de regresión logística binaria. Los resultados mostraron que el método de esparcimiento tiene un impacto altamente significativo en el uso excesivo de abonos (al 1%). Además, se observó que los agricultores más jóvenes también mostraron un efecto significativo al 10%. Con base en estos hallazgos, se sugiere la creación de políticas para un manejo sostenible de abonos.

Wright (2019) observó que el meta-análisis se centra en cómo las plantas responden a 48 experimentos de adición de nutrientes en bosques tropicales naturales, excluyendo los manglares. Los nutrientes que se añadieron incluyen nitrógeno (N), fósforo (P), calcio y potasio. Se investigan varias hipótesis sobre la limitación de nutrientes en bosques

sucesionales y antiguos, así como la limitación de P en bosques de tierras bajas y N en bosques montañosos. Las respuestas a la combinación más completa de nutrientes fueron bastante notables en lo que respecta a la producción aérea (g de cobertura = 0,87), aunque no se observaron efectos significativos en la biomasa de raíces finas. La limitación por N y P resultó ser significativa para las concentraciones de estos nutrientes en los tejidos, moderada para la producción de hojarasca fina y débil para el crecimiento de las plantas. Las respuestas de crecimiento fueron más pronunciadas en los bosques sucesionales. Los hallazgos sugieren que tanto N como P limitan el crecimiento de las plantas en los bosques tropicales, y también se identifican limitaciones adicionales por calcio, potasio y magnesio. Las investigaciones futuras deberían enfocarse en la limitación de todos los nutrientes esenciales.

Bautista et al. (2023) realizaron proporciones óptimas de nitrógeno y fósforo para plántulas de madera dura tropical, exploraron las relaciones nutricionales ideales para el crecimiento inicial. Utilizando un diseño factorial con cinco proporciones diferentes de N:P en un vivero, evaluaron los parámetros de crecimiento de *S. macrophylla* durante un período de seis meses. Los resultados revelaron que una proporción N:P de 2:1 condujo a impresionantes aumentos del 45 % en altura y del 38 % en diámetro en comparación con el grupo de control. Además, la biomasa radicular mostró el desarrollo más significativo con esta proporción específica. El estudio concluyó que el equilibrio de nutrientes desempeña un papel más crucial que las dosis absolutas aplicadas individualmente. Recomendaron ajustar las formulaciones de fertilizantes basándose en análisis foliares previos.

Johnson y Kumar (2023) en su estudio "Análisis económico de fertilización en silvicultura a pequeña escala" examinaron la rentabilidad de varias estrategias nutricionales. Analizaron datos de 120 plantaciones familiares que tenían diferentes niveles de inversión en fertilización. La fertilización balanceada mostró una tasa de retorno del 35 %, en comparación con solo un 12 % en los testigos que no recibieron fertilización. El punto de equilibrio se alcanzó en 3,2 años con fertilización, mientras que, sin ella, se extendió a 5,1 años. Los pequeños productores que decidieron invertir en nutrición reportaron ingresos netos más altos. El estudio recomendó ofrecer créditos blandos para la compra de fertilizantes a pequeños propietarios. Además, se observó que la asistencia técnica estaba relacionada con el éxito de las inversiones en nutrición.

Mueller et al. (2023) en su investigación "Fertilización de precisión en viveros forestales tropicales", introdujeron un sistema automatizado orientado a optimizar el uso de los recursos. Implementaron sensores de pH y conductividad eléctrica junto con la dosificación automática de nutrientes. Este sistema innovador logró reducir el consumo de

fertilizantes en un 40 % manteniendo los estándares de calidad. La uniformidad de las plántulas mejoró significativamente, pasando del 65 % al 88 % gracias a la configuración automatizada. La tecnología también permitió ajustar fórmulas nutricionales según las etapas de desarrollo de las plantas. Los investigadores estimaron un retorno de la inversión en un plazo de 2,5 años para los viveros comerciales y recomendaron este sistema para producir plantas que cumplen estrictas especificaciones técnicas.

Park et al. (2023) demostró que el estudio "Monitoreo nutricional a largo plazo en plantaciones tropicales", establecieron una red de 25 parcelas permanentes para la investigación. Durante cinco años, llevaron a cabo mediciones trimestrales de nutrientes en el suelo y en las plantas. Notaron una disminución crítica de potasio después del segundo año en todos los sitios. Además, el calcio y el magnesio mostraron patrones estacionales relacionados con la precipitación. Crearon curvas de extracción nutricional específicas para *S. macrophylla* y recomendaron iniciar la fertilización de mantenimiento a partir del tercer año. Los datos recopilados fueron útiles para ajustar modelos de recomendación para plantaciones comerciales.

Rodrigues et al. (2023) revelaron que el meta-análisis en la fertilización y el encalado aumentaron la producción de madera de *Pinus taeda* al mejorar tanto la altura como el diámetro del tronco. Este crecimiento adicional se relacionó con un mayor desarrollo de las raíces y un mejor estado nutricional de los árboles. Además, el incremento en el crecimiento de los árboles también elevó la cantidad de hojarasca, lo que impactó el ciclo de nutrientes. La eficiencia de la fertilización fue bastante similar entre las aplicaciones en plantaciones y en sitios de 2 a 8 años, aunque hubo algunas variaciones menores. El uso de residuos equilibrados se destacó en comparación con las fuentes minerales. La combinación de fertilización mineral con cal resultó ser más beneficiosa, probablemente porque ayudó a suplir deficiencias de calcio y magnesio. El pino mostró una mayor respuesta en suelos arenosos. En resumen, estos resultados ofrecen pautas valiosas para prácticas sostenibles en la reforestación con *P. taeda*.

Rodríguez et al. (2023) analiza la "Respuesta temprana del crecimiento de la caoba a los fertilizantes de liberación controlada", compararon tres formulaciones comerciales diferentes de liberación lenta. Utilizaron un diseño de bloques completamente aleatorio y tomaron mediciones mensuales a lo largo de un año. Los fertilizantes de liberación controlada mostraron un aumento del 28 % en la altura en comparación con el grupo de control después de seis meses. La formulación de 180 días demostró ser la más consistente en el suministro de nutrientes durante la estación seca. El estudio también encontró una correlación positiva entre la duración de la liberación y el desarrollo de la biomasa foliar. Los autores

sugirieron estos fertilizantes para los pequeños productores, ya que requieren menos aplicaciones. Sin embargo, advirtieron que el costo inicial podría ser una barrera importante para su adopción generalizada.

Takahashi y Santos (2023) en el estudio titulado "Respuesta de la arquitectura radical a la localización de fósforo en caoba", investigaron sistemas radicales utilizando diferentes métodos de aplicación. Emplearon rizotrones para observar el desarrollo radical en aplicaciones en hoyo, banda y superficie. La aplicación localizada en hoyo resultó en un 52% más de densidad de raíces finas absorbentes. Además, la distribución espacial de las raíces se correlacionó directamente con la ubicación del fertilizante. Por otro lado, los tratamientos con aplicación superficial mostraron un menor desarrollo radical en profundidad. Los autores sugirieron la incorporación profunda de fósforo en suelos tropicales lixiviados. Este estudio subrayó la importancia de la colocación para maximizar la eficiencia de los fertilizantes.

Chen y Liu (2024) en la investigación "Disponibilidad de fósforo mediada por microorganismos en suelos tropicales" investigaron cómo los inoculantes microbianos pueden mejorar la efectividad de los fertilizantes fosfatados. Realizaron un experimento en invernadero utilizando suelos ácidos de bosque tropical, donde aplicaron cuatro cepas bacterianas junto con superfosfato triple. Los resultados revelaron que la absorción de fósforo aumentó en un 35 % cuando se utilizó *Pseudomonas fluorescens* como el inoculante principal. Además, la actividad de las fosfatasas ácidas mostró un aumento significativo en los tratamientos que incluían microbiota nativa. Los investigadores concluyeron que la biofertilización puede complementar de manera efectiva la fertilización química tradicional y sugirieron desarrollar formulaciones comerciales que integren ambos enfoques para suelos degradados.

González et al. (2024) en sus ensayos "Mezclas orgánico-inorgánicas para silvicultura sostenible" evaluaron diferentes combinaciones para facilitar la transición hacia sistemas ecológicos. Durante dos años, probaron cinco proporciones distintas en un diseño completamente al azar. La mezcla que consistía en un 70 % de inorgánico y un 30 % de orgánico demostró ser la más efectiva, mostrando un crecimiento y una salud del suelo superiores. Además, las propiedades microbiológicas mejoraron notablemente cuando las inclusiones orgánicas superaron el 20 %. Se observó un aumento del 0,5 % anual en la materia orgánica del suelo en los tratamientos combinados. Los autores sugirieron esquemas progresivos de conversión para las plantaciones ya establecidas, logrando reducir en un 25 % el uso de fertilizantes sintéticos sin comprometer la productividad.

Lee y Chen (2024) trabajaron el "Modelado de respuesta de crecimiento a fertilización en caoba", desarrollaron un algoritmo predictivo utilizando aprendizaje automático. Integraron datos de suelo, clima y gestión de 150 plantaciones. El modelo logró una impresionante precisión del 85 % en la predicción del crecimiento anual del diámetro. Las variables clave identificadas fueron el pH del suelo, la precipitación y la dosis de nitrógeno. Esta herramienta permite a los usuarios simular diferentes estrategias de fertilización. Los investigadores también hicieron accesible el modelo a través de una plataforma web, recomendándolo para la planificación forestal y la optimización de recursos.

Li et al. (2024) encontraron que los bosques tropicales son muy sensibles a la cantidad de nitrógeno (N) y fósforo (P) que tienen a su disposición, pero aún no se comprenden del todo los mecanismos que ayudan a conservar el carbono orgánico del suelo (SOC) cuando se aplican nutrientes. Este estudio se centró en una plantación de Acacia y un bosque de múltiples especies que recibieron fertilización continua en regiones subtropicales, analizando compuestos de carbono provenientes de plantas y microorganismos. Además, se realizó un meta-análisis con 125 mediciones emparejadas de 62 estudios para evaluar cómo la aplicación de fósforo afecta al SOC. En el experimento de campo, la composición microbiana influyó en las respuestas específicas del bosque al fósforo. En la plantación de Acacia, el fósforo disminuyó el carbono residual microbiano (MRC), mientras que en el bosque de múltiples especies, se observó un aumento en la descomposición del carbono. El meta-análisis reveló que el contenido de SOC tuvo una respuesta neutra al fósforo, aunque con algunas variaciones. La reducción del MRC fúngico afectó negativamente la estabilidad del SOC.

Martínez et al. (2024) revelaron que la disponibilidad de nutrientes en el suelo puede influir en funciones clave de los ecosistemas forestales, como la herbivoría de insectos. Aunque su impacto en el crecimiento y la mortalidad de las plantas forestales es significativo, hay poca evidencia sobre cómo la adición de abonos afecta los patrones de herbivoría. Este estudio analizó cómo la frecuencia de herbivoría en *Nothofagus antarctica* se ve influenciada por la adición de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y sus combinaciones, en un experimento de campo a largo plazo en un bosque del norte de la Patagonia (Argentina). Los resultados indicaron que la adición de abonos aumentó la frecuencia de herbivoría, gracias al incremento en las concentraciones de nutrientes en las hojas. Además, las interacciones entre los abonos también llevaron a un aumento en la herbivoría, tanto en la cantidad de hoja consumida como en el porcentaje de daño foliar. Estos hallazgos sugieren que la fertilización tiene efectos complejos en las interacciones entre plantas y herbívoros, dependiendo de los nutrientes, la especie vegetal y la disponibilidad de nutrientes.

Shi et al. (2024) identificaron que los microorganismos que solubilizan fósforo (PSMs) representan una estrategia ecológica interesante para abordar la escasez de fósforo (P) en las plantas, aunque su efectividad puede variar en el campo. Este estudio se centró en evaluar la combinación de aminoácidos (AA) y PSMs en plántulas de *Phyllostachys edulis* cultivadas en suelos con bajo contenido de P. Se analizaron aspectos como la biomasa vegetal, la morfología de las raíces, y el contenido de N y P en los tejidos, así como los nutrientes del suelo, las comunidades microbianas en la rizosfera y las actividades enzimáticas. La combinación de AA y PSMs no solo mejoró el crecimiento de los brotes, sino que también modificó la estructura de las raíces, aumentó los nutrientes en las plantas y en el suelo, y favoreció la disponibilidad de P. Además, tuvo un impacto diferente en la estructura microbiana del suelo en comparación con las aplicaciones individuales. Estos resultados subrayan el potencial de esta combinación para optimizar el crecimiento de las plantas y mejorar la salud del suelo, aunque se necesitan más estudios para comprender completamente las interacciones entre planta, suelo y microorganismos.

Silva et al. (2024) en su estudio "Asociación micorrízica en plántulas de caoba fertilizadas" exploró las interacciones entre hongos micorrízicos y la fertilización química. Inocularon *Glomus spp.* con varias dosis de NPK en un entorno controlado. Se observó que la mayor colonización micorrízica se dio con dosis moderadas de fósforo (50 kg/ha). Sin embargo, dosis elevadas de fósforo (>100 kg/ha) redujeron la formación de micorrizas en un 60 %. El crecimiento de las plantas mostró una sinergia notable cuando se combinó la inoculación con una fertilización equilibrada. Los autores recomendaron ajustar las dosis de fósforo para no perjudicar las simbiosis naturales y sugirieron incluir inoculantes en los programas de producción de plantas.

Singh et al. (2024) definieron normas de referencia para el seguimiento nutricional en "Diagnóstico nutricional foliar en plantaciones jóvenes de caoba". Obtuvieron 500 muestras de hojas de plantaciones con edades entre 1 y 3 años y bajo varias condiciones del suelo. Los análisis determinaron intervalos críticos de K (1,5-1,8 %), N (2,8-3,2 %) y P (0,2-0,25 %) para plantas vigorosas. Utilizando la espectroscopía NIR, elaboraron ecuaciones predictivas para deficiencias. El protocolo sugerido hace posible un diagnóstico rápido en campo con una fiabilidad del 95 %. Con el fin de lograr una mayor precisión, los investigadores aconsejaron realizar el muestreo foliar durante la temporada de lluvias. La metodología fue validada en cultivos comerciales de Centroamérica.

Wang et al. (2024), en su estudio "Interacción agua-fertilizante en especies maderables tropicales", examinaron la sinergia entre la nutrición mineral y la disponibilidad de

agua. Utilizó un diseño de parcelas fraccionadas con tres dosis de NPK y dos niveles de agua. Para todas las variables de crecimiento, la interacción demostró ser estadísticamente significativa ($p < 0,01$). El tratamiento más efectivo consistió en una combinación de riego complementario y la aplicación total de fertilizante. La fertilización no mostró ventajas notables en condiciones de sequía moderada. Los científicos alertaron acerca del peligro de fertilizar sin una adecuada disponibilidad de agua. Se sugirió el uso de sistemas de riego suplementario para optimizar la inversión en fertilizantes.

Gao et al. (2025) encontraron que los ecosistemas forestales son cruciales en la captura global de carbono, lo que está estrechamente relacionado con la absorción de nitrógeno (N) por las raíces. Sin embargo, las estrategias de absorción de N por las plantas y sus implicaciones para la gestión forestal no están completamente comprendidas. Se realizaron experimentos de campo en China utilizando trazadores dobles (^{13}C - ^{15}N) para tres formas de N (NH_4^+ , NO_3^- y glicina). Se observaron cambios significativos y no uniformes en el contenido de N, la abundancia natural de ^{15}N en raíces y las propiedades del suelo. Las tasas y patrones de absorción de NH_4^+ , NO_3^- y glicina por las raíces varió, lo que llevó a una diferenciación en los nichos de N entre especies vegetales. El análisis sugiere que la absorción de N es más oportunista que estrictamente preferencial. Estos resultados son clave para optimizar la composición de especies en prácticas de forestación, favoreciendo la coexistencia de especies y manteniendo ecosistemas forestales productivos.

Shi et al. (2025) describieron que la adquisición de fósforo (P) en los ecosistemas forestales depende del ciclo de la hojarasca, pero las concentraciones foliares de P en los bosques de haya están disminuyendo. Este estudio utilizó una combinación innovadora de trazado con ^{33}P -wick para seguir el reciclaje de P en la hojarasca y un enfoque de dilución microbiana para investigar el ciclo de P microbiano en suelos con pérdida de biodiversidad microbiana. Se inocularon suelos esterilizados con diferentes diluciones de sus comunidades microbianas nativas y se incubaron con hojarasca de haya marcada con ^{33}P . La actividad de fosfatasa ácida disminuyó significativamente con el aumento de la dilución, indicando una pérdida funcional de la movilización de P. La actividad general de fosfatasa fue mayor en el sitio con deficiencia de P, sugiriendo una alta redundancia funcional en la movilización microbiana de P. La recuperación de ^{33}P derivada de la hojarasca en la biomasa microbiana del suelo (SMB) y en Presin fue significativamente más alta en el sitio deficiente en P, lo que confirma que la redundancia funcional microbiana puede mantener procesos clave de adquisición de P.

2.2.2. A nivel nacional

Díaz (2022) demostró cómo diferentes tipos de abonos, tanto biorgánicos como químicos, afectan el crecimiento inicial de dos especies: *Caryodendron orinocense* H. Karst., conocido como "metohuayo", y *Cedrelinga cateniformis* D. Ducke, o "tornillo". Utilizó un diseño estadístico de Bloques Completos al Azar (DBCA) con cuatro repeticiones en un sistema agroforestal de 1 hectárea, aplicando los siguientes tratamientos: T1= sustrato orgánico (gallinaza-tierra negra+arena), T2= SO + 100 g de NPK (20-20-20), T3= SO + 100 g de roca fosfórica, y T4= SO + FBO (Fertilización Bio-Orgánica). Los resultados indican que ambas especies forestales mostraron un aumento en el crecimiento inicial, tanto en altura de planta como en diámetro de tallo y cantidad de hojas. Sin embargo, no se encontró suficiente evidencia estadística que respalde el impacto de los abonos en el crecimiento inicial de estas especies.

Castillo et al. (2023) en su trabajo "Monitoreo nutricional en plantaciones industriales de la selva central", establecieron un protocolo estandarizado para el monitoreo. Evaluaron el estado nutricional cada seis meses en 100 hectáreas durante un período de tres años. Tras el primer año, detectaron deficiencias de magnesio en el 70 % de las parcelas. Las medidas correctivas adoptadas dieron lugar a una mejora del 25 % en el crecimiento en comparación con los grupos de control. También elaboraron una guía práctica para el diagnóstico visual de las deficiencias. Como resultado, las empresas forestales comenzaron a aplicar un monitoreo sistemático, lo que mejoró significativamente su planificación de la fertilización para el mantenimiento.

Gutiérrez et al. (2023) en su investigación "Análisis económico de fertilización en plantaciones de caoba en selva central" se dedicaron a evaluar la rentabilidad de varias estrategias nutricionales. Examinaron 30 plantaciones comerciales que tenían diferentes niveles de inversión en fertilizantes. Los resultados mostraron que la fertilización balanceada generó un Valor Actual Neto (VAN) positivo de S/ 15,000 por hectárea. Además, el tiempo necesario para recuperar la inversión fue de 4.2 años con fertilización, en comparación con 6.8 años sin ella. Los costos de fertilización representaron entre el 18% y el 25% del costo total de establecimiento. El estudio concluyó que invertir en nutrición es una estrategia clave para lograr rentabilidad en el corto plazo. Los bancos comerciales también utilizaron estos datos para ofrecer créditos forestales.

Mesias (2023) analizó cómo diferentes dosis de abono de liberación controlada (Basacote 6M) afectan el crecimiento de plántulas de *Dipteryx odorata*, conocido como Shihuahuaco, en un vivero. Se trabajó con 336 plántulas, distribuidas en cuatro grupos: un grupo de control (0g), y otros con 1g, 2g y 3g de abono. Las mediciones de altura y diámetro

se realizaron cada 15 días durante un periodo de 5 meses, utilizando un diseño completamente al azar. Aunque no se encontraron diferencias significativas en altura entre los tratamientos, el grupo T2 (2g) mostró un crecimiento superior. En cuanto al diámetro, T2 fue significativamente mejor que el grupo de control, aunque no superó a T1 y T3. Se observó que T2 mantenía una ligera ventaja en las evaluaciones a lo largo del tiempo. En conclusión, el uso de 2g de Basacote 6M se presenta como una opción efectiva para fomentar el crecimiento en tubetes.

Paredes et al. (2023) determinaron "Biofertilizantes en producción de plántulas de caoba en Ucayali" evaluaron la combinación de microorganismos con nutrientes minerales. Utilizaron un diseño factorial que incluía tres cepas bacterianas y diferentes dosis de NPK. La mezcla de *Pseudomonas* con un 50 % de NPK demostró un crecimiento un 30 % mayor. Además, los biofertilizantes lograron reducir en un 40 % la necesidad de fertilizantes químicos. La calidad de las plantas alcanzó los estándares necesarios para la plantación comercial. Los autores también propusieron paquetes tecnológicos para viveros artesanales, y esta tecnología fue validada en centros de producción en Pucallpa.

Quispe et al. (2023) observó "Fertilización nitrogenada en bolaina y capirona en suelos de Loreto" identificaron las dosis óptimas de urea para especies nativas. Para ello, establecieron parcelas experimentales con cuatro tratamientos: 0, 40, 80 y 120 g de N por planta. La dosis de 80 g por planta resultó en el mayor aumento del diámetro en ambas especies. Además, la bolaina mostró una mejor respuesta a la fertilización nitrogenada en comparación con la capirona. Los análisis de las hojas confirmaron una adecuada absorción de nitrógeno en los tratamientos aplicados. Los investigadores sugirieron ajustar las dosis según la especie y las condiciones locales. Este trabajo proporciona una base técnica valiosa para la reforestación con especies nativas.

Rojas et al. (2023) en sus análisis de "Fertilización fosfatada en suelos ácidos de Ucayali para crecimiento de caoba", analizaron cómo diferentes enmiendas fosfatadas afectan a los suelos de ultisol. Analizaron diversas cantidades de fosfato de roca—0, 50, 100 y 150 g por planta—utilizando un diseño de bloques completamente aleatorio. La dosis de 100 g por planta dio los mejores resultados en altura y diámetro tras doce meses. Además, encontraron que la saturación de aluminio disminuyó significativamente en los tratamientos con fosfato de roca. Los autores sugirieron que se debería hacer liming en suelos con pH inferior a 5,0. Este estudio puso de manifiesto el potencial del uso de fosfatos naturales en la Amazonía peruana, y los pequeños productores han adoptado con éxito esta tecnología con resultados positivos.

Vásquez et al. (2023) en su trabajo «Optimización de dosis NPK en viveros comerciales de la Amazonía», desarrollaron curvas de respuesta para la producción a

gran escala. Probaron 16 combinaciones diferentes de NPK utilizando un diseño compuesto central. Se determinó que el óptimo económico era de 120-80-60 kg/ha de N-P-K. Esta formulación no solo superó los estándares internacionales de calidad de las plantas, sino que también redujo los costos de producción en un 18 % gracias a la optimización de la dosis. El estudio proporcionó recomendaciones específicas para viveros comerciales, y las empresas de reforestación han adoptado con éxito el protocolo, con resultados documentados.

Chávez et al. (2024) en su estudio "Sistemas agroforestales con caoba fertilizada en selva central" analizó diferentes esquemas de producción integrados. Para ello, empleó un diseño de parcelas divididas, tanto con fertilización como sin ella, en sistemas diversificados. Se observó que la fertilización impulsó un crecimiento del 30 % en la caoba cuando se cultivaba junto a otros cultivos. Además, los cultivos anuales mostraron un desarrollo notablemente mejor bajo la sombra de la caoba fertilizada. El ingreso neto por hectárea aumentó un 45 % gracias a este sistema integrado. Los autores recomendaron estos enfoques a pequeños agricultores, y la tecnología fue transferida a 50 familias en Chanchamayo.

Díaz et al. (2024) realizó el estudio "Fertilización en fases tempranas de reforestación en Amazonía peruana" compararon la aplicación de fertilizantes en el momento de la plantación frente a su uso en el mantenimiento. Realizaron un experimento con mediciones trimestrales a lo largo de dos años. Los resultados mostraron que la aplicación durante la plantación tuvo una respuesta un 40 % mejor que la aplicación diferida. Además, el desarrollo de las raíces fue significativamente mayor en el tratamiento inicial. Los autores subrayaron la importancia de la nutrición en los primeros seis meses y recomendaron aplicar todos los nutrientes al momento de instalar la plantación. Los viveros ajustaron sus protocolos basándose en estos hallazgos.

Mori et al. (2024) en su investigación "Fertilización en sistemas silvopastoriles con caoba en Junín" combinó árboles maderables con pastos mejorados y fertilizados. Utilizó un diseño de bloques completos con varios esquemas nutricionales. Descubrió que ambos componentes del sistema se beneficiaban mutuamente en su crecimiento. La producción de madera aumentó un 20 % en comparación con plantaciones puras. Además, la carga animal se mantuvo sin afectar el desarrollo de los árboles. Los ingresos netos resultaron ser un 35 % más altos que en los sistemas convencionales. Por lo tanto, recomendó estos sistemas para fincas ganaderas que buscan diversificarse.

Ríos et al. (2024) en sus observaciones "Fertilización orgánico-mineral en plantaciones comunales de San Martín" evaluaron la aceptación por parte de las comunidades nativas. Implementaron mezclas de gallinaza y urea en cinco comunidades asháninkas. Los

resultados mostraron un impresionante 85 % de adopción tecnológica y buenos resultados en la producción. Los rendimientos alcanzaron hasta un 90 % en comparación con las plantaciones comerciales convencionales. Además, los costos se redujeron en un 40 % al utilizar insumos locales disponibles. Los autores también promovieron esquemas participativos para la reforestación comunal. Esta metodología fue replicada en otras regiones, adaptándose a las particularidades locales.

Salazar et al. (2024) realizó “Fertilización en suelos degradados por minería en Madre de Dios” trabajaron en la rehabilitación de áreas mineras utilizando caoba y técnicas especiales de fertilización. Aplicaron enmiendas de cal junto con NPK en un diseño experimental personalizado. Sorprendentemente, lograron una tasa de supervivencia del 70 % incluso en condiciones extremadamente duras. El crecimiento anual alcanzó 1,2 metros de altura gracias a la fertilización intensiva. Los suelos mostraron una recuperación tanto en sus propiedades físicas como químicas. Este estudio puso de relieve el potencial para abordar los pasivos medioambientales. Las empresas mineras han comenzado a adoptar esta tecnología como parte de sus procesos de cierre de minas.

Sandoval (2024) observó cómo crecen en altura y diámetro los árboles de *S. macrophylla* con diferentes tipos de fertilización: NPK, roca fosfórica y el abono foliar Bayfolán. El estudio se llevó a cabo en el CIEFOR de la UNAP, utilizando un diseño de bloques completamente al azar. Se aplicaron cuatro tratamientos: un grupo de control, NPK (100 g), roca fosfórica (100g) y Bayfolán (100 ml). Los resultados mostraron que el abono foliar Bayfolán impulsó el mayor crecimiento en altura, alcanzando los 84,81 cm, mientras que el NPK fue el que más aumentó el diámetro, con 16,57 mm, además de tener la mejor tasa de sobrevivencia, que fue del 85%. No se encontraron diferencias significativas en altura ni en la tasa de sobrevivencia entre los tratamientos. Sin embargo, el crecimiento en diámetro fue notablemente mayor con el uso de NPK. Esto resalta la importancia de seleccionar el abono adecuado según los objetivos de producción.

Torres y Mendoza (2024) en su estudio "Abonos foliares en viveros forestales de la Amazonía peruana" comparó tres formulaciones comerciales para la producción de plántones. Utilizó un diseño completamente al azar y realizó mediciones quincenales durante cinco meses. Los resultados mostraron que las aplicaciones foliares lograron un crecimiento 25 % mayor en comparación con la fertilización tradicional. La formulación que incluía micronutrientes quelatados demostró ser la más efectiva en términos de calidad de planta. El estudio sugiere hacer aplicaciones cada 21 días durante la etapa de crecimiento activo. Aunque

los costos de producción aumentaron un 15 %, la mejora en la calidad justificó la inversión. Los viveros comerciales adoptaron esta tecnología con resultados exitosos.

2.2.3. Del ámbito local

Salazar (2020) llevó a cabo un estudio sobre el impacto de la dolomita, el compost y el abono 20-20-20 en el crecimiento de *Colubrina glandulosa* en suelos degradados en Huánuco, Perú. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres tratamientos diferentes. Durante cinco meses, se midieron la altura total, el diámetro del tallo, el diámetro de la copa, el índice de robustez y la mortalidad. Los abonos mostraron efectos significativos en la altura y el diámetro en comparación con el grupo de control, comenzando a notarse desde el tercer o cuarto mes. El mayor índice de robustez y el diámetro de la copa se registraron con roca fosfórica. Sin embargo, la mortalidad fue más alta en las plantas tratadas con dolomita. En conclusión, los abonos contribuyen a mejorar el crecimiento en suelos degradados.

Vázquez (2020) examinó el impacto de enmiendas calcáreas, abonos inorgánicos y abonos orgánicos en el crecimiento de la teca en San Martín, Perú. Se utilizó un diseño de parcelas divididas con un arreglo factorial 2x4 y tres dosis diferentes. Se midieron las tasas de supervivencia, los parámetros biométricos y los atributos del suelo. La aplicación de dolomita junto con abono orgánico resultó en menores tasas de mortalidad y mayores promedios en diámetro, área foliar, altura y biomasa. El encalado (dolomita) tuvo efectos significativos sobre el crecimiento de la teca. En el suelo, sólo el magnesio mostró diferencias significativas. Aunque no hubo una interacción significativa entre la dolomita y los abonos, ambos tuvieron efectos individuales positivos.

Chávez (2023) comparó “Abonos complejos en caoba de Tingo María”, comparó tres formulaciones comerciales disponibles localmente. Realizó un experimento en una cooperativa agrícola local con réplicas. La fórmula 20-20-20 mostró los mejores resultados en términos de crecimiento del diámetro. Los costos por planta fueron un 35 % más bajos que los de las fórmulas especializadas. El estudio recomendó utilizar este enfoque basándose en análisis previos del suelo. Los productores pudieron optimizar sus costos siguiendo este consejo, lo que condujo a un aumento del 20 % en la rentabilidad con la selección adecuada de fertilizantes.

Díaz (2023) en la investigación “Análisis costo-beneficio de fertilización en caoba en Leoncio Prado”, analizó detenidamente la rentabilidad en las condiciones económicas locales. Durante dos años, supervisó diez parcelas con distintos niveles de inversión. Los resultados fueron impresionantes: una tasa interna de rendimiento (TIR) del 42 % con una fertilización adecuada, frente a solo el 15 % sin ella. El punto de equilibrio se alcanzó

en 3,8 años cuando se aplicó la fertilización. Curiosamente, los costes de mano de obra representaron el 60 % del total de los gastos de fertilización. Este estudio presentó argumentos sólidos a favor de la inversión en nutrición vegetal, especialmente para los pequeños agricultores. Las instituciones de crédito locales incluso han tenido en cuenta estos resultados para las opciones de financiación.

Paredes (2023) en su estudio "Respuesta de caoba a urea en suelos de Rupa Rupa, Tingo María", analizó cómo diferentes dosis de nitrógeno afectan las condiciones locales. Para ello, estableció una parcela experimental en un terreno privado utilizando un diseño DBCA. Se aplicaron dosis de 0, 50, 100 y 150 g/planta en dos momentos distintos. La dosis de 150 g/planta resultó en la mayor altura, alcanzando 2,8 m a los 12 meses. Los suelos respondieron muy bien a la fertilización con nitrógeno. El estudio recomendó esta dosis específica para las condiciones de Tingo María, y los productores locales han adoptado esta recomendación con resultados positivos.

Torres (2023) en su trabajo "Fertilización orgánica en viveros municipales de Tingo María", evaluó el uso de compost local para la producción de plantones de caoba. Comparó los resultados con un grupo de control y el uso de fertilizantes químicos en condiciones reales. Los hallazgos mostraron que la calidad de las plantas era similar, pero con un costo 40 % menor al utilizar compost local. Además, la tasa de sobrevivencia en el campo fue un 15 % mayor para las plantas producidas de manera orgánica. El estudio también propuso un esquema para crear viveros municipales autosostenibles, y la municipalidad decidió implementar estas recomendaciones en su vivero institucional. Como resultado, los productores familiares comenzaron a adoptar esta tecnología económica.

Gómez et al. (2024) en su estudio "Fertilización de mantenimiento en plantaciones adultas de Tingo María" aplicaron NPK a plantaciones que tenían entre 3 y 5 años. Utilizaron un diseño de bloques al azar y realizaron mediciones anuales del crecimiento. Descubrieron un aumento del 15 % en el volumen maderable gracias a la fertilización. La respuesta fue aún más notable en aquellas plantaciones que habían mostrado un crecimiento lento al principio. Los análisis foliares ayudaron a definir la formulación específica de los fertilizantes. Los autores sugirieron que se debe continuar con la nutrición después del establecimiento. Además, el estudio amplió las recomendaciones para el manejo de plantaciones maduras.

Pérez (2024) llevó a cabo una investigación sobre cómo diferentes dosis de Yaramila Complex afectan a la *Guazuma crinita*, también conocida como bolaina blanca, en el CIPTALD-PS. Se realizaron nueve tratamientos, aplicando entre 0 g y 80 g de abono por

planta. Se midieron los aumentos en diámetro (mm) y altura (cm) a los 2, 4 y 6 meses. El tratamiento que mostró el mayor aumento en diámetro fue el de 60 g/planta (T7), alcanzando un impresionante 55,74 mm a los 6 meses. En cuanto a la altura, el tratamiento con 70 g/planta (T8) logró el mayor valor numérico, con 271,66 cm. Además, el tratamiento T7 demostró una fuerte correlación entre el diámetro y la altura, con un valor de 0,98 a 1. Cabe destacar que tanto T4 como T7 registraron un 0 % de mortalidad. En general, el abono tuvo un impacto significativo en el crecimiento de *G. crinita*.

Rengifo et al. (2024) en su observación «Fertilización fosfatada en laderas de Tingo María» aplicaron superfosfato en pendientes con una inclinación superior al 40 %. Utilizaron un diseño adaptado a la topografía accidentada y realizaron mediciones cada seis meses. Los resultados mostraron un aumento del 28 % en la altura en comparación con el control absoluto. La escorrentía de fósforo fue mínima gracias a la aplicación localizada en hoyos. Esta técnica demostró ser viable en áreas con topografía difícil. Los autores validaron su metodología para las laderas de la selva alta y recomendaron su uso en proyectos de reforestación en regiones montañosas.

Salas et al. (2024) realizó el estudio "Fertilización en asociación caoba-café en Aucayacu" evaluaron un esquema nutricional integrado diseñado para pequeños productores. Implementaron un diseño de parcelas divididas en fincas cafetaleras tradicionales. Los resultados mostraron un beneficio económico al aplicar una fertilización balanceada para ambos cultivos. La producción de café aumentó un 15 % cuando se cultivó bajo la sombra de caoba fertilizada. Además, los ingresos adicionales por la madera contribuyeron a mejorar la sostenibilidad del sistema. Los autores abogaron por la adopción de sistemas agroforestales intensivos, y diez fincas demostrativas implementaron esta tecnología con éxito.

2.3. Marco conceptual

Crecimiento inicial forestal: Es la fase temprana en el desarrollo de una plantación, donde se establece y se desarrollan los árboles jóvenes. Para evaluar este proceso, se utilizan indicadores como el aumento en altura, el diámetro del tronco y el diámetro de la copa. Estos indicadores son muy sensibles a las prácticas de manejo, como la fertilización (Gómez, 2009; Wright, 2019).

Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA): Es un enfoque experimental en el que agrupamos las unidades experimentales en bloques homogéneos para poder controlar la variabilidad ambiental. En cada bloque, se aplican todos los tratamientos de manera aleatoria, lo que nos permite aislar y medir el impacto de la variabilidad espacial (Hernández et al., 2006).

Abono inorgánico: Se trata de un producto elaborado que contiene nutrientes esenciales para las plantas, como nitrógeno, fósforo y potasio, en formas químicas puras que se absorben rápidamente. Su uso tiene como objetivo maximizar el crecimiento y el rendimiento de los cultivos, aunque es importante tener en cuenta que un uso excesivo puede tener efectos negativos en el suelo y el medio ambiente (Romero & Ruíz, 2021).

Fertilidad del suelo: Se refiere a la capacidad de un terreno para proporcionar los nutrientes necesarios en las cantidades adecuadas y de manera equilibrada para el crecimiento de las plantas. Este aspecto crucial es el resultado de la interacción entre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y es esencial para el éxito de cualquier cultivo (Domínguez, 1997).

***H. grandella*:** Es un tipo de polilla, a menudo denominada “barrenador meliáceas”. Esta pequeña plaga supone una amenaza importante para especies arbóreas valiosas como la caoba, ya que sus larvas se introducen en el brote principal, lo que provoca deformidades en el tronco y afecta gravemente al valor comercial de la madera (Becker, 1976).

Incremento Corriente Anual (ICA): Es una forma de medir cuánto ha crecido un árbol o una plantación en el transcurso de un año. Este indicador refleja el aumento en aspectos como la altura, el diámetro o el volumen que se ha logrado durante ese tiempo específico, y es fundamental para evaluar la productividad forestal (Aider, 1980).

Manejo silvicultural: Se refiere a un conjunto de prácticas técnicas que se aplican de manera metódica con el objetivo de maximizar tanto la productividad como la calidad de las plantaciones forestales. Esto incluye actividades esenciales como la fertilización, el control de malezas, la poda y el raleo, que son especialmente importantes durante los primeros años de establecimiento (Desco, 2005, citado en Palacios, 2005).

Variabilidad espacial: también conocida como efecto de bloque, se refiere a las diferencias en las condiciones ambientales, edáficas o microclimáticas que se pueden encontrar dentro de un área experimental. En el ámbito de los estudios forestales, esta variabilidad puede ser responsable de una parte considerable de la respuesta observada, a veces incluso más que el propio tratamiento aplicado (Li et al., 2024).

***S. macrophylla*:** comúnmente conocida como caoba, es una especie arbórea tropical de gran valor comercial que pertenece a la familia Meliaceae. Desafortunadamente, está clasificada como vulnerable debido a la tala indiscriminada y la deforestación. Por eso, el establecimiento de plantaciones de esta especie es esencial para su conservación y producción sostenible (Palacios, 2005).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La investigación se llevó a cabo en una plantación *S. macrophylla* que abarcó un área aproximada de 0,5 hectáreas, localizada dentro del predio denominado “Fundo Pizarro”.

3.1.1. Ubicación geográfica y política

El área de investigación se ubicó en las coordenadas 391179 m E y 8971548 m N, correspondiente a uno de los vértices, con una altitud promedio de 760 m.s.n.m. políticamente, se localizó en la parte alta de la Asociación Habitacional Sven Erickson, distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, en el departamento de Huánuco.

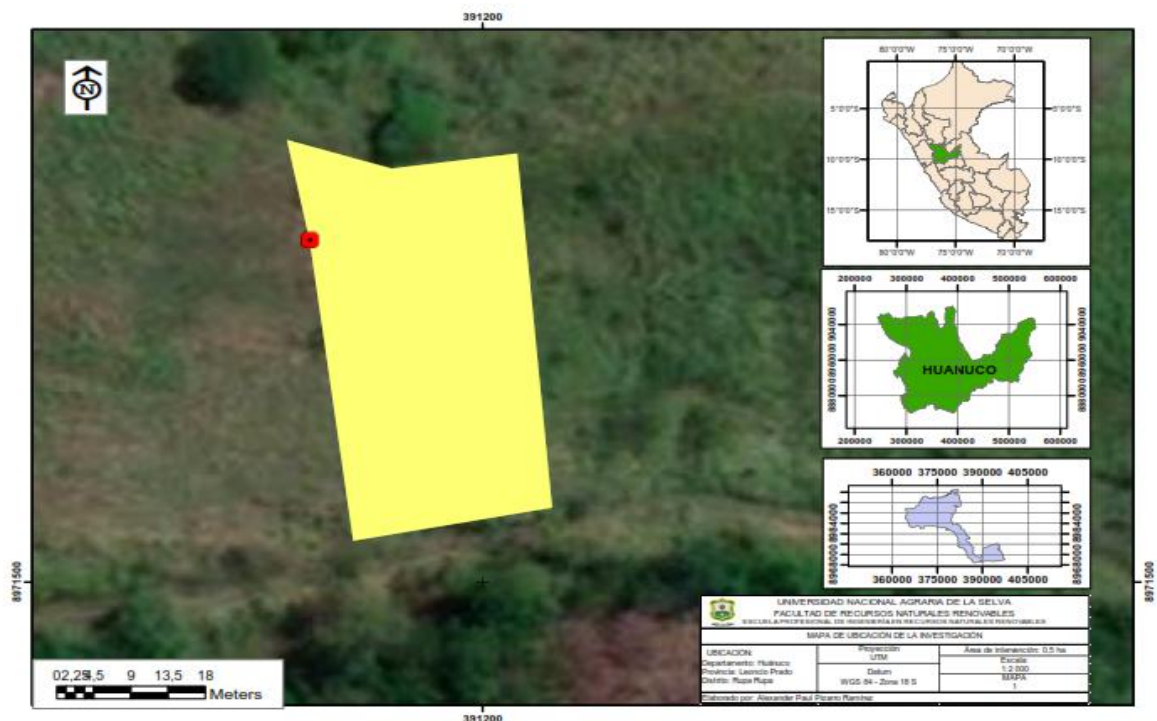


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.

3.1.2. Zona de vida

Según la clasificación de zonas de vida y las formaciones vegetales a nivel mundial, así como el esquema bioclimático de Holdridge (1967), Tingo María se encuentra en la categoría de bosques muy húmedos Premontano Tropical (bmh – PMT). De acuerdo con UNALM (2003), está situada en la ecorregión de las Yungas Peruanas Nor Huánuco. Sus coordenadas geográficas son: latitud sur 09° 08' 00". Además, se encuentra a una altitud de 660 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura media anual de 24 °C y una precipitación media anual de 3 200 mm.

3.1.3. Clima

En cuanto al clima de la zona que estamos analizando, se caracteriza por tener una precipitación bastante alta, con un promedio anual de 3 428,8 mm. Las lluvias más fuertes se presentan entre octubre y abril, alcanzando su pico en enero, donde la media mensual es de 483,6 mm. Además, la humedad relativa se sitúa en un 87 %, con temperaturas máximas de 29,4 °C, mínimas de 19,2 °C y un promedio anual de 24,3 °C.

3.1.4. Fisiografía

El área de estudio es una zona con pendientes y suelo degradados, lo que refleja la geofoma de mayor superficie del Fundo Pizarro. La fuente de agua está situada en el "Cerro Cachimbo".

3.2. Material y métodos

3.2.1. Materiales y equipos

Se emplearon materiales manuales, tales como tijera podadora de mano, azadón, pala recta, machete y pintura en espray para señalar el punto de medición del diámetro del fuste, así como una regla graduada de hasta tres metros (o más) y una wincha de mano para medir la altura de las plantas. Asimismo, se utilizaron formatos para la colecta de datos en campo, como tablero y lapicero. Entre los equipos empleados se incluyeron un vernier, un clinómetro y una cámara digital. Para el procesamiento de la información de campo se utilizó un procesador portátil (laptop).

3.2.2. Metodología

3.2.2.1. Incremento de la altura de planta, diámetro de fuste y diámetro de copa en plantas de *Swietenia macrophylla* con la aplicación del abono inorgánico

En el ámbito de la investigación, después de seguir los protocolos establecidos para el desarrollo y la aplicación del abono inorgánico, se llevó a cabo un análisis del aumento en el diámetro del fuste de la planta, así como del diámetro de la copa y la altura de la planta, con el fin de mostrar el efecto de los tratamientos. La plantación se estableció siguiendo el sistema tresbolillo de 6 x 6 m, donde además 1, 2, 3, ...64 corresponden al número de plantas instaladas bajo este sistema. De las cuales se seleccionaron al azar 48 plantas para el objeto de la investigación, de acuerdo con los tratamientos y tres plantas por cada unidad experimental. Cada tratamiento se aplicó en dos dosis para mejorar la eficiencia de la planta en la absorción de los nutrientes proporcionados por el abono inorgánico.

	8		7		6		5		4		3		2		1	B1
9		10		11		12		13		14		15		16		
	24		23		22		21		20		19		18		17	B2
25		26		27		28		29		30		31		32		
	40		39		38		37		36		35		34		33	B3
41		42		43		44		45		46		47		48		
	56		55		54		53		52		51		50		49	B4
57		58		59		60		61		62		63		64		

	T0	Testigo		1ra Aplicación	2da Aplicación
	T1	Urea 80gr+ SFT 365gr		Urea 86.95gr+SFT 396.74gr	Urea 86.95gr+SFT 396.74gr
	T2	Urea 100gr+ SFT 485gr		Urea 108.69gr+SFT 527.17gr	Urea 108.69gr+SFT 527.17gr
	T3	Urea 120gr+ SFT 605gr		Urea 130.43gr+SFT 657.60gr	Urea 130.43gr+SFT 657.60gr

Figura 2. Croquis de los bloques y tratamientos en la plantación de (Caoba).

En este estudio, se llevaron a cabo dos evaluaciones: (1) una evaluación inicial antes de comenzar el tratamiento y (2) una medición de seguimiento a los seis meses de establecida la plantación. Estas evaluaciones midieron los aumentos en el crecimiento, tanto en altura como en diámetro del tallo, en todas las unidades experimentales.

Con el propósito de visualizar el efecto de los tratamientos en las plantas de *S. macrophylla*, se calculó el incremento corriente anual (ICA), utilizando la siguiente expresión:

$$ICA = Obs. 2 - Obs. 1$$

Dónde:

ICA = Incremento corriente anual (cm, m, m², etc.)

Obs. 1 = Observación inicial (primera evaluación de altura, diámetro de copa y diámetro de planta)

Obs. 2 = Observación final (Segunda evaluación de altura, diámetro de copa y diámetro de planta)

Altura de planta

La altura de la planta, como se mencionó anteriormente, se evaluó con una regla graduada. La diferencia entre la segunda observación y la primera nos dio el aumento en altura, resultado del efecto del abono inorgánico.



Figura 3. Medición de la altura de planta de caobas por cada tratamiento.

Diámetro del tallo de la planta

Para este indicador, utilizamos un vernier y tomamos la medición a 10 cm del suelo, en dirección opuesta a la pendiente; esto nos dio un promedio. La diferencia entre la observación 2 y la observación 1 nos proporcionó el incremento en diámetro, resultado del efecto del abono inorgánico.



Figura 4. Medición del diámetro de planta por cada tratamiento.

Diámetro de copa

La medición de este indicador se llevó a cabo con una wincha de mano de 5 metros, en los cuatro puntos cardinales: norte, este, sur y oeste. La diferencia entre

la segunda observación y la primera nos dio el aumento en el diámetro de la copa, resultado del efecto del abono inorgánico.



Figura 5. Medición del diámetro de copa de planta por cada tratamiento.

3.2.2.2. Efecto del abono inorgánico en el incremento en altura de planta, diámetro de fuste y diámetro de copa

1. Etapa de planificación

Se recolectó toda la información cartográfica existente en el área de estudio, utilizando esta información para crear un mapa base que incorporaba dicha información. Este mapa simplificó la organización logística para la recolección de información en terreno.

2. Recopilación de información del área de estudio

Se llevó a cabo una recopilación de datos vinculados con el campo de estudio en tesis, publicaciones científicas y trabajos de investigación en curso. Luego, se organizaron los datos recolectados para el reporte final de la tesis.

3. Reconocimiento del lugar

Dado el enfoque del estudio, se realizó un reconocimiento del área de investigación para comprobar las condiciones prácticas de instalación o marcado del diseño experimental en las 64 plantas de *S. macrophylla* (caoba). Durante este proceso, se analizaron las características del terreno, como la pendiente, la orientación de la parcela y su estado de conservación. También se identificaron las rutas de acceso, información clave para la logística de campo.

4. Limpieza del área experimental

Se realizó el desbroce de la maleza circundante en un área de 1,5 m de radio alrededor de cada individuo de *S. macrophylla*, con el fin de eliminar competencia por recursos.

5. Evaluación inicial del terreno de la zona experimental

Paralelamente a la limpieza del área experimental, se realizó un análisis de suelo como línea base para el estudio. Este análisis preliminar tuvo como objetivo cuantificar las concentraciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en el área de plantación.

6. Manejo de la plantación

Antes de las evaluaciones de referencia, se realizó una limpieza de maleza en un radio de 1,5 metros alrededor de cada espécimen de *S. macrophylla*. El desbroce de mantenimiento posterior se realizó a intervalos de 3 meses, y el desbroce final coincidió con la evaluación a los 6 meses de las mediciones del diámetro del tallo y la altura de la planta.

Para evaluar este objetivo se utilizó el modelo aditivo lineal para un diseño en bloques totalmente aleatorio se manifiesta a través de la fórmula siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Dónde:

- Y_{ij} es la observación obtenida del tratamiento i en el bloque j .
- μ es la media general del experimento.
- τ_i es el efecto del tratamiento i (con $i=1,2,\dots,t$, $t_i=1,2,\dots,t$, donde t es el número de tratamientos).
- β_j es el efecto del bloque j (con $j=1,2,\dots,r$, $r_j=1,2,\dots,r$, donde r es el número de bloques).
- ε_{ij} es el término de error experimental asociado a la observación Y_{ij} que se asume con media cero y varianza constante.

Tabla 1. Análisis de variancia (ANOVA).

Fuentes de variabilidad	Suma de cuadrados	Grado de libertad	Cuadrado medio	F ₀	Valor-p
Tratamientos	$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_i^2}{b} - \frac{Y_{..}^2}{N}$	k-1	CM _{TRAT}	$F_0 = \frac{CM_{TRAT}}{CM_E}$	P(F>F ₀)
Bloques	$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_j^2}{k} - \frac{Y_{..}^2}{N}$	b-1	CM _B	$F_0 = \frac{CM_B}{CM_E}$	P(F>F ₀)
Error	$SC_E = SC_T - SC_{TRAT} - SC_B$	(k-1)(b-1)	CM _E		
Total	$SC_T = \sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^k Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N}$	N-1			

El análisis de suelo realizado al área de investigación previo al establecimiento de las plantas con el diseño y metodología propuesta recomendó lo siguiente: aplicación de 57,3 kg/ha de nitrógeno y 292 kg/ha de fósforo. De dicha recomendación se realizaron los cálculos para el área que ocupan las plantas objeto de la investigación de 36 m². Asimismo, considerando que la urea tiene 46 % de nitrógeno, los tratamientos fueron con 80, 100 y 120 g de N. Para el fósforo se consideró 365, 485 y 605 g de P (asumiendo que el superfosfato triple - SFT contiene 46 % de fósforo). Con estos datos se procedió a realizar los cálculos de la cantidad de urea y superfosfato triple a aplicar a cada planta por tratamiento.

$$Urea = \frac{(57,3 \frac{kg}{ha} * 36 m^2)}{10000 m^2}$$

$$Urea = 0,206 kg = 206 g (= 100 \%)$$

$$SFT = \frac{(292 \frac{kg}{ha} * 36 m^2)}{10000 m^2}$$

$$SFT = 1,051 kg = 1051 g (= 100 \%)$$

Entonces asumiendo que los cálculos respectivos equivalen al 100 %, se decidió que para T₁ sería el 75 %, T₂ 100 % y T₃ 125 % de nitrógeno y fósforo respectivamente. Con estos datos se calculó la cantidad de nitrógeno y fósforo necesario para cada planta por tratamiento (Tabla 2) (Tabla 3).

Tabla 2. Cantidad de urea y superfosfato triple por planta en cada tratamiento.

Tratamiento	Cantidad de urea	Cantidad de SFT
T ₀	0	0
T ₁	173,91 g ((154,5 g U * 80 g de N)/71,07 g N)	793,48 g ((788,25 g SFT * 365 g de P)/362,59 g P)
T ₂	217,39 g ((206 g U * 100 g de N)/94,76 g N)	1054,34 g ((1051 g SFT * 485 g de P)/483,46 g P)
T ₃	260,36 g ((257,5 g U * 120 g de N)/118,45 g N)	1315,21 g ((1313 g SFT * 605 g de P)/603,98 g P)

Tabla 3. Descripción del tratamiento para dos aplicaciones.

Tratamiento	Detalle del abono inorgánico
T₀	Ninguna aplicación de abono inorgánico.
T₁	86,95 g de nitrógeno + 396,74 g fósforo.
T₂	108,69 g de nitrógeno + 527,17 g de fósforo.
T₃	130,18 g nitrógeno + 657,60 g de fósforo.

* Urea (46 % de nitrógeno) y superfosfato triple (0 – 46 -0).

La aplicación del tratamiento se hizo como ya se mencionó en dos aplicaciones, la primera durante la instalación de plantas y la segunda aplicación a los 120 días posterior a la instalación.

3.2.2.3. Componentes de investigación

a. Enfoque de investigación

Cuantitativo con el método hipotético-deductivo, basado en la medición de variables observables como la altura, el diámetro del fuste y la copa de las plantas tras la aplicación de abono. A partir de hipótesis contrastables, se diseñaron experimentos controlados que permitieron, mediante análisis estadístico, identificar patrones sólidos y replicar los resultados. Esta estrategia, tal como señala Valderrama (2013), resulta valiosa para descubrir regularidades en fenómenos poco caracterizados, avanzando desde la evidencia empírica hacia generalizaciones teóricas verificables (Hernández et al., 2006).

b. Tipo de investigación

Aplicado, porque que utilizó disciplinas como la silvicultura y la dasometría para analizar el crecimiento inicial de una plantación de *S. macrophylla*, mediante la aplicación de abono inorgánico en Tingo María. Según Roel Pineda (1997), citado por Jacobo et al. (2013), este tipo de investigación busca ampliar el conocimiento en un área específica aprovechando los avances de la ciencia básica, con el fin de obtener aplicaciones prácticas. El enfoque se respaldó adicionalmente con las contribuciones de Carrasco (2009), Murillo (2010) y Valderrama (2013).

c. Nivel de investigación

Explicativo, ya que manipuló de forma deliberadamente una variable independiente para analizar su efecto en una dependiente, lo que permitió establecer una relación de causalidad bajo condiciones controladas (Hernández et al., 2006).

Asimismo, de acuerdo con el periodo de tiempo, este fue un estudio longitudinal, ya que se recolectaron datos en diferentes momentos para deducir el impacto del abono inorgánico en el crecimiento del diámetro del fuste, la copa y la altura de la planta. Posteriormente, se analizaron y compararon (X1, X2, X3...n), realizando en promedio dos observaciones (Hernández et al., 2006).

d. Diseño de investigación

Experimental-longitudinal, ya que combinó la manipulación deliberada de variables con mediciones repetidas en el tiempo (Hernández et al., 2006). Se implementó un diseño en bloques completamente al azar (4×4) con tres tratamientos y un testigo, tres repeticiones de 12 plantas por tratamiento, y cada tratamiento con 3 unidades experimentales. Asimismo, se realizaron dos aplicaciones con las mismas proporciones para cada tratamiento en 48 plantas de *S. macrophylla* (Tabla 1). El objetivo fue evaluar el aumento en altura, diámetro del fuste y diámetro de la copa, así como la relación de estas variables con la aplicación de abono inorgánico. Este enfoque se fundamenta en lo señalado por Hernández y Mendoza (2018), quienes destacan que la manipulación intencionada de una variable independiente en contextos controlados permite establecer relaciones causales.

e. Variables de la investigación

En este estudio se midieron las siguientes variables (Tabla 4):

Tabla 4. Variables e indicadores

Variable	Indicadores	Subindicadores
<i>Dependiente</i> Incremento	a) Altura de planta	a) Incremento en altura (m)
	b) Diámetro de fuste	b) Incremento del diámetro de fuste (m)
	c) Diámetro de copa	c) Incremento del diámetro de copa (m)
<i>Independiente</i> Abono inorgánico	a) Elementos químicos inorgánicos	a) Urea (46 % de nitrógeno) + Superfosfato triple (0 – 46 -0), es decir 46 % de fosforo.

f. Población

La población formada por 64 plantas de *S. macrophylla*, que cubrieron un área de efectiva 0,25 hectáreas. Este enfoque se basa en la definición de población que propuso Jany en 1994, citada por Bernal (2010), quien explicó que una población se refiere a todos los elementos o individuos que comparten ciertas características similares y sobre los cuales se quiere hacer inferencias, constituyendo así la unidad de análisis.

g. Muestra

Fueron 48 plantas, tres unidades experimentales, con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. La distribución de los tratamientos en cada bloque se hizo a través del sorteo al azar, donde previamente se marcaron en un papel el tratamiento y el número correspondiente. Por tal motivo no se hizo uso de ninguna fórmula matemática.

h. Técnicas de recopilación de datos

Durante la investigación, se utilizaron diversas técnicas tanto bibliográficas como de campo para recopilar y analizar información. En la parte bibliográfica, se realizó un análisis documental de las referencias consultadas sobre el tema, mientras que el fichaje ayudó a recolectar datos bibliográficos y hemerográficos necesarios para crear la bibliografía. En campo, se llevaron a cabo observaciones para medir el diámetro de la planta y de la copa, así como la altura de las plantas de caoba, utilizando herramientas como un vernier, una regla graduada, un clinómetro y una wincha de mano. Previamente a ello, se realizó un análisis de suelo como línea base en el laboratorio para evaluar la fertilidad natural del área de estudio.

Para analizar el experimento, se clasificó el diámetro y la altura en diferentes categorías, tanto de diámetro como de altura. Esto se hizo para minimizar el impacto de otras variables y hacer que los datos fueran más homogéneos (Tabla 5).

Tabla 5. Clase o categoría de diámetro de la planta.

Clase o categoría de diámetro de fuste	Dimensiones
1	0 - 2,5 cm
2	2,5 - 5 cm
3	5 - 7,5 cm
...	...

Asimismo, se utilizó instrumentos para recolectar información que se clasificaron en dos categorías: bibliográficos y de campo. En el ámbito bibliográfico, se emplearon fichas de documentación e investigación, donde se hicieron citas textuales, resúmenes y comentarios redactados siguiendo el modelo APA, todo con el fin de construir las bases teóricas del informe de tesis. En el campo, se utilizó una libreta que se basaba en las variables, indicadores y subindicadores de la investigación.

i. Análisis estadístico

Se utilizaron las descriptivas (para resumir y describir datos) e inferenciales (usando pruebas estadísticas como la prueba DGC y ANOVA, para probar hipótesis y estimar parámetros poblacionales). Procesándose los datos con software (InfoStat), presentándose tablas y figuras.

El análisis del diseño en bloques completos al azar se llevó a cabo utilizando InfoStat, con un nivel de significancia del 5 %. Se realizó un ANOVA donde la variable respuesta se consideró como dependiente, mientras que los factores de tratamiento y bloque se trataron como clasificatorios. Después de verificar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas con las herramientas del software, se aplicó la prueba de medias de DGC cuando se encontró un efecto significativo del tratamiento, interpretando los resultados a través de valores p y la variabilidad explicada por los bloques.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Incremento de *Swietenia macrophylla* en altura de planta, diámetro de fuste y diámetro de copa con la aplicación del abono inorgánico

Los resultados obtenidos muestran al tratamiento T₁, que incluyó la aplicación de 86,95 g de urea y 396,74 g de superfosfato triple (SFT), logró un aumento en altura (71,66 cm) y diámetro de copa (52,33 cm) en el bloque 3. Esto sugiere que una combinación equilibrada de nitrógeno y fósforo es crucial para impulsar el crecimiento inicial de *S. macrophylla*. Estos hallazgos concuerdan con lo que reportó Gómez (2020), quien mencionó que la fertilización con nitrógeno y fósforo acelera el desarrollo vegetativo en especies forestales tropicales. Además, Wright (2019) subrayó que el fósforo desempeña un papel fundamental en la expansión de las hojas y la eficiencia fotosintética en los bosques tropicales.

Es importante destacar que, incluso en el tratamiento de control (T₀), el bloque 3 mostró aumentos significativos en altura (58,00 cm) y diámetro de fuste (13,44 mm). Esto sugiere que en esta área podrían existir condiciones del suelo más favorables o una mayor disponibilidad de nutrientes residuales. Este hallazgo subraya la relevancia de la variabilidad espacial en los estudios de fertilización, como lo mencionaron Li et al. (2024), quienes encontraron que factores como la textura del suelo y la materia orgánica pueden tener un impacto mayor que la fertilización en sí en el crecimiento inicial.

Por otro lado, el tratamiento T₃, que utilizó dosis más altas de urea (130,43 g) y SFT (657,60 g), no mostró diferencias significativas en comparación con T₁. Esto podría sugerir que hay un límite en la eficiencia de absorción de nutrientes o que se está experimentando estrés por exceso de fertilización. Este fenómeno ha sido documentado por Rahman y Zhang (2018) y Shi et al. (2024), quienes advierten que dosis elevadas pueden inhibir el crecimiento en plantaciones forestales jóvenes. Además, la consistencia en el aumento del diámetro de copa en todos los tratamientos indica que la expansión foliar es una respuesta temprana a la fertilización, un resultado que también ha sido observado en estudios con *Pinus taeda* por Rodrigues et al. (2023). En resumen, estos hallazgos sugieren que la fertilización inorgánica puede impulsar el crecimiento inicial de *S. macrophylla*. Sin embargo, su efectividad está sujeta a dosis adecuadas y a condiciones ambientales específicas, tal como lo evidencio Sandoval (2024) en su estudio realizado en contextos similares (Tabla 6).

Tabla 6. Incremento corriente anual por tratamientos y bloques de las variables de estudio.

Variables	Tratamientos	Incremento corriente anual - ICA			
		B1	B2	B3	B4
At (cm)	0	25,33	44,66	58,00	53,33
	1	39,34	67,00	71,66	54,00
	2	29,66	65,33	53,33	63,67
	3	43,66	39,66	52,66	45,67
Dc (cm)	0	7,67	18,83	27,33	28,17
	1	9,84	39,33	52,33	31,66
	2	8,16	51,83	35,34	41,00
	3	23,83	20,66	32,33	31,83
Dp (mm)	0	4,19	9,66	13,44	11,93
	1	6,44	13,64	16,19	12,47
	2	6,16	11,43	10,16	12,10
	3	9,71	8,58	10,47	11,35

* At = Altura total de la planta en cm.

Dc = Diámetro de copa de la planta en cm.

Dp = Diámetro del tallo de la planta en mm.

El tratamiento T₁ mostró el mayor aumento en altura, alcanzando los 71,66 cm en el bloque 3, seguido por T₂ con 65,33 cm en el bloque 2. Esto respalda la idea de que la combinación de nitrógeno y fósforo estimula el crecimiento temprano de *S. macrophylla*. Estos hallazgos coinciden con lo que reportaron Wright (2019) y Takahashi y Santos (2023), quienes subrayaron la importancia del nitrógeno para el desarrollo de la biomasa aérea y del fósforo para la eficiencia fotosintética. En contraste, el bloque 1 presentó los incrementos más bajos en altura, con solo 34,50 cm, a pesar de la fertilización. Esto podría estar relacionado con limitaciones en el suelo o estrés hídrico, factores que Chen y Liu (2024) identificaron como esenciales para el establecimiento de plantaciones tropicales. Este descubrimiento refuerza la necesidad de evaluar las condiciones del suelo antes de aplicar fertilizantes, tal como sugirieron Rahman y Zhang (2018).

La variabilidad que hemos observado entre los bloques sugiere que la respuesta a la fertilización no es la misma en todos los casos. Este hallazgo coincide con lo que documentaron Rodrigues et al. (2023) en sus estudios sobre *Pinus taeda*. Además, el hecho de que no haya diferencias significativas entre T₁ y T₃ en algunos bloques sugiere que dosis más altas no siempre conducen a mejores resultados. Esto apoya la idea de que existe un umbral de eficiencia en la absorción de nutrientes, tal como señalaron Shi et al. (2024). En conjunto, estos resultados respaldan el uso estratégico de fertilizantes inorgánicos para optimizar el crecimiento inicial de *S. macrophylla*, pero también resaltan la importancia de ajustar las dosis a las condiciones locales, como lo demostraron Sandoval (2024) y Lee & Chen (2024) (Figura 6).

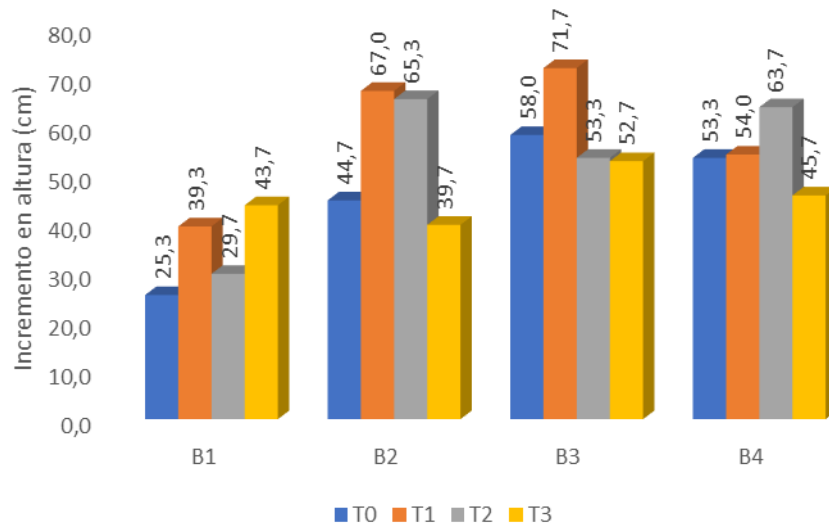


Figura 6. ICA de altura de las plantas de *S. macrophylla* por tratamiento en cada bloque.

El tratamiento T₂ logró el mayor aumento en el diámetro de la copa, alcanzando 51,83 cm en el bloque 2, seguido por T₁ con 52,33 cm en el bloque 3. Esto demuestra que las dosis moderadas de abonos inorgánicos favorecen la expansión foliar en *S. macrophylla*. Estos hallazgos están en línea con lo que reportaron Wright (2019) y Shi et al. (2024), quienes identificaron el fósforo como un elemento clave para el desarrollo de la arquitectura foliar en especies tropicales. Por otro lado, el bloque 1 mostró los incrementos más bajos, con un promedio de 12,38 cm, lo que sugiere que podría haber limitaciones en la disponibilidad de micronutrientes o diferencias en las propiedades físicas del suelo. Esta variabilidad en la respuesta a la fertilización ha sido documentada en estudios similares en bosques tropicales por Li et al. (2024) y Martínez et al. (2024).

La ventaja de los tratamientos T₁ y T₂ en comparación con el control (T₀) en todos los bloques subraya lo crucial que es tener una fertilización equilibrada para el crecimiento inicial de la copa. Este aspecto es fundamental para que las plantas sean competitivas en sistemas agroforestales, como señalaron Rodrigues et al. (2023). Sin embargo, la menor respuesta observada en el bloque 4 sugiere que factores como la competencia por luz o recursos radiculares podrían estar afectando estos resultados, de acuerdo con lo que documentaron González et al. (2024). Así, estos hallazgos apoyan la idea de que el diámetro de la copa reacciona más rápidamente a la fertilización en comparación con otras variables de crecimiento, lo que podría ser un buen indicador temprano de la efectividad de los tratamientos en programas de reforestación, tal como propusieron Gómez (2020) y Sandoval (2024) (Figura 7).

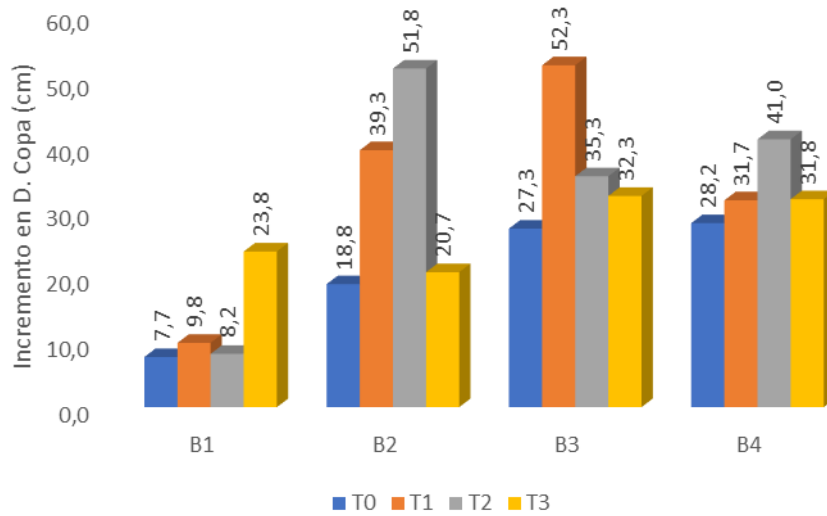


Figura 7. ICA del diámetro de copa de las plantas de *S. macrophylla* por tratamiento en cada bloque.

El tratamiento T₃, que consistió en 130,43 g de urea y 657,60 g de superfosfato triple, logró el mayor aumento en el diámetro del fuste, alcanzando 9,71 mm en el bloque 1. Le siguió el tratamiento T₁, con un incremento de 16,19 mm en el bloque 3. Esto demuestra que las dosis elevadas de abonos inorgánicos pueden impulsar el crecimiento en las primeras etapas de desarrollo. Estos hallazgos concuerdan con investigaciones que subrayan la importancia del nitrógeno en la formación de tejidos leñosos y del fósforo en la división celular (Gómez, 2024; Wright, 2019). Además, la variabilidad observada entre los bloques, que va desde 6,63 mm en el bloque 1 hasta 12,57 mm en el bloque 3, sugiere que factores como la compactación del suelo o la profundidad de las raíces podrían influir en la respuesta a la fertilización. Esta heterogeneidad espacial se alinea con descubrimientos recientes en plantaciones tropicales (Li et al., 2024; Rodrigues et al., 2023).

El aumento en el diámetro mostró menos sensibilidad a los tratamientos en comparación con otras variables, probablemente porque el engrosamiento del tallo de la planta es un proceso más lento que el crecimiento en altura o la expansión de las hojas. Este patrón ha sido documentado en estudios sobre especies de rápido crecimiento por Shi et al. (2024) y Sandoval (2024). Por lo tanto, estos hallazgos concuerdan con la importancia de considerar períodos de evaluación más largos para identificar efectos significativos en el diámetro del fuste, especialmente en investigaciones con especies forestales valiosas como *S. macrophylla*, tal como sugirieron Rahman y Zhang (2018) y Lee y Chen (2024) (Figura 8).

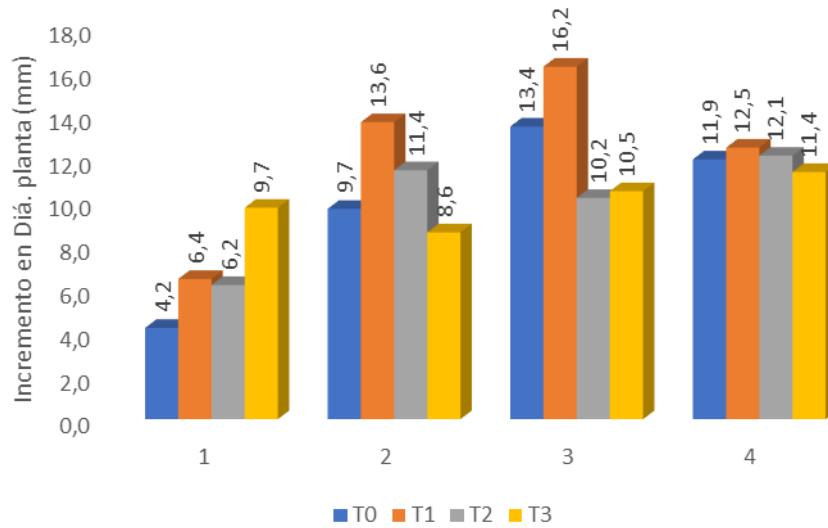


Figura 8. ICA del diámetro de las plantas de *S. macrophylla* por tratamiento en cada bloque.

4.2. Efecto del abono inorgánico en el incremento en altura de planta, diámetro de fuste y diámetro de copa

El análisis de varianza (ANOVA) para altura de planta muestra que el modelo explica el 72 % de la variabilidad ($R^2 = 0,72$) y es significativo ($p = 0,04$), lo que confirma que los tratamientos de fertilización influyen considerablemente en el crecimiento vertical de *S. macrophylla*. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Wright (2019) y Bautista et al. (2023), quienes destacaron el efecto positivo de la fertilización nitrogenada en el desarrollo apical de especies forestales. Sin embargo, el análisis de varianza indica que los bloques explican una mayor proporción de la variabilidad ($SC = 1414,79$) en comparación con los tratamientos ($SC = 460,33$), lo que sugiere que factores espaciales, como la heterogeneidad del suelo o condiciones microclimáticas, pueden ser más determinantes que las dosis de fertilizante aplicadas. Esta observación coincide con lo documentado por Li et al. (2024) y Martínez et al. (2024) respecto a la importancia de la variabilidad ambiental en plantaciones tropicales. Además presenta un coeficiente de variabilidad del 18 %.

La falta de significancia en el efecto de los tratamientos ($p = 0,21$) podría deberse a la corta duración del estudio o a la alta variabilidad natural entre individuos, un fenómeno que ya se ha documentado en ensayos con especies meliáceas, según Rodrigues et al. (2023) y Shi et al. (2024). Este hallazgo sugiere que sería útil tener períodos de evaluación más largos para poder identificar diferencias claras entre los tratamientos. Por lo tanto, estos resultados subrayan la importancia de tener en cuenta tanto los factores nutricionales como los espaciales al diseñar

estrategias de fertilización para las plantaciones de caoba, tal como lo propusieron Sandoval (2024) y Lee & Chen (2024) (Tabla 7).

Tabla 7. Análisis de varianza de altura de plantas.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1875,12	6	312,52	3,79	0,04
Bloques	1414,79	3	471,60	5,72	0,02
Tratamientos	460,33	3	153,44	1,86	0,21
Error	741,48	9	82,39		
Total	2616,60	15			

El ANOVA muestra un 34,57 % del coeficiente de variabilidad y el diámetro de la copa muestra que los tratamientos de fertilización explican el 69 % de la variabilidad ($R^2 = 0,69$; $p = 0,05$). Esto confirma que la aplicación de nutrientes tiene un impacto significativo en la expansión foliar de *S. macrophylla*, especialmente cuando se utilizan combinaciones de nitrógeno y fósforo, tal como lo señalaron Wright (2019) y Shi et al. (2024). Sin embargo, los bloques mostraron un efecto más marcado ($SC = 1473,07$) en comparación con los tratamientos ($SC = 478,52$), lo que sugiere que factores ambientales, como las características del suelo o la disponibilidad de agua, podrían tener un papel más importante que las dosis de fertilización aplicadas, como reportaron Li et al. (2024) y Martínez et al. (2024). La ausencia de diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0,25$) podría ser el resultado de la corta duración del estudio o de la alta plasticidad fenotípica de la especie. Esto subraya la necesidad de desarrollar estrategias de fertilización que se adapten a las condiciones específicas de cada sitio para maximizar el crecimiento de la copa, como sugieren Rodrigues et al. (2023) y Sandoval (2024) (Tabla 8).

Tabla 8. Análisis de varianza del diámetro de copa.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1951,59	6	325,26	3,29	0,05
Bloques	1473,07	3	491,02	4,97	0,03
Tratamientos	478,52	3	159,51	1,61	0,25
Error	889,63	9	98,85		
Total	2841,22	15			

Al igual lo que se observó con la altura de las plantas, en el modelo, el diámetro de la planta explica el 72 % ($R^2 = 0,72$; $p = 0,04$), y el coeficiente de variación del 20,03 %. En este caso, los bloques ($SC = 86,10$; $p = 0,01$) mostraron un impacto más significativo que los tratamientos ($SC = 15,34$; $p = 0,38$). Esto confirma que factores espaciales, como la heterogeneidad del suelo, son más relevantes que las dosis de abono en el engrosamiento del

fuste de *S. macrophylla*, tal como documentaron Gómez (2020) y Li et al. (2024). La falta de significancia en los tratamientos sugiere que el crecimiento en diámetro responde más lentamente a la fertilización en comparación con otras variables morfométricas. Esto implica que se necesitan períodos de evaluación más largos para detectar efectos significativos, como señalaron Rodrigues et al. (2023) y Sandoval (2024). Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar el tiempo de monitoreo y las condiciones específicas del sitio al evaluar el impacto de la fertilización en plantaciones forestales, tal como recomendaron Wright (2019) y Lee & Chen (2024) (Tabla 9).

Tabla 9. Análisis de varianza del diámetro de planta.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	101,44	6	16,91	3,83	0,04
Bloques	86,10	3	28,70	6,49	0,01
Tratamientos	15,34	3	5,11	1,16	0,38
Error	39,78	9	4,42		
Total	141,22	15			

4.3. Prueba estadística para la altura de planta, el diámetro de fuste y el diámetro de copa

La prueba de DGC (Di Rienzo, Guzmán y Casanoves) para la altura de planta revela diferencias notables entre los bloques ($p < 0,05$). El bloque 3 mostró los valores más altos (58,91 cm, grupo A), seguido de cerca por los bloques 4 y 2 (54,17-54,16 cm), mientras que el bloque 1 tuvo el menor crecimiento (34,50 cm, grupo B). Estos hallazgos sugieren que la variabilidad espacial tiene un impacto mayor que los tratamientos en el crecimiento vertical de *S. macrophylla*, lo cual coincide con lo que han reportado Li et al. (2024) y Wright (2019) sobre la importancia de los factores microambientales en las plantaciones tropicales. La diferencia significativa entre bloques (hasta 24,41 cm) indica que condiciones edáficas no controladas, como la profundidad de las raíces o el contenido de materia orgánica, podrían ser claves para el éxito de los programas de reforestación, tal como observaron Rodrigues et al. (2023) y Sandoval (2024) (Tabla 10) (Figura 9).

Tabla 10. Prueba de DGC para la altura de planta con alfa=0,05

Bloques	Medias	n	
3	58,91	4	A
4	54,17	4	A
2	54,16	4	A
1	34,50	4	B

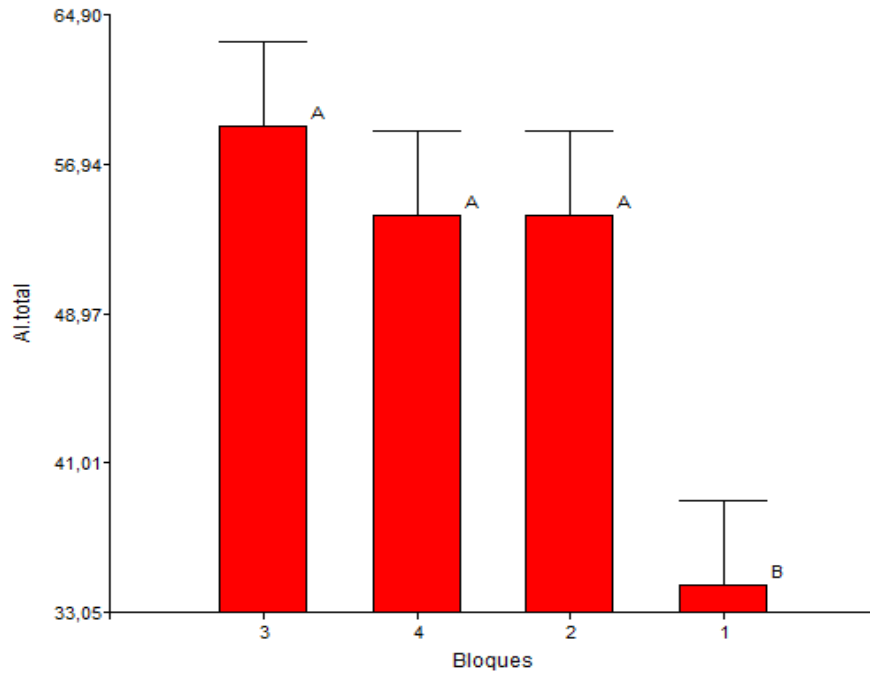


Figura 9. Prueba de DGC para la altura de planta por bloques con $\alpha=0,05$

Se observan diferencias notables en el diámetro de copa entre los bloques ($p < 0,05$). El bloque 3 se destacó con el mayor crecimiento (36,83 cm, grupo A), seguido de cerca por los bloques 4 y 2 (33,17 y 32,66 cm), mientras que el bloque 1 tuvo valores más bajos (12,38 cm, grupo B). Esta notable variabilidad entre los bloques, con diferencias de hasta 24,45 cm, sugiere que factores ambientales no controlados, como la radiación solar, la competencia por recursos o las propiedades físico-químicas del suelo, tienen un impacto mayor que los tratamientos de fertilización en la expansión foliar de *S. macrophylla*. Esto está en línea con lo que documentaron Wright (2019) y Martínez et al. (2024). Estos resultados coinciden con estudios anteriores que indicaron una alta sensibilidad del desarrollo de copa a condiciones específicas del micrositio en plantaciones tropicales, como señalaron Shi et al. (2024) y Rahman & Zhang (2018). Esto resalta la importancia de realizar evaluaciones del suelo antes de optimizar el manejo silvícola, tal como lo recomendaron Rodrigues et al. (2023) y Sandoval (2024) (Tabla 11) (Figura 10).

Tabla 11. Prueba de DGC para el diámetro de copa con $\alpha=0,05$

Bloques	Medias	n	
3	36,83	4	A
4	33,17	4	A
2	32,66	4	A
1	12,38	4	B

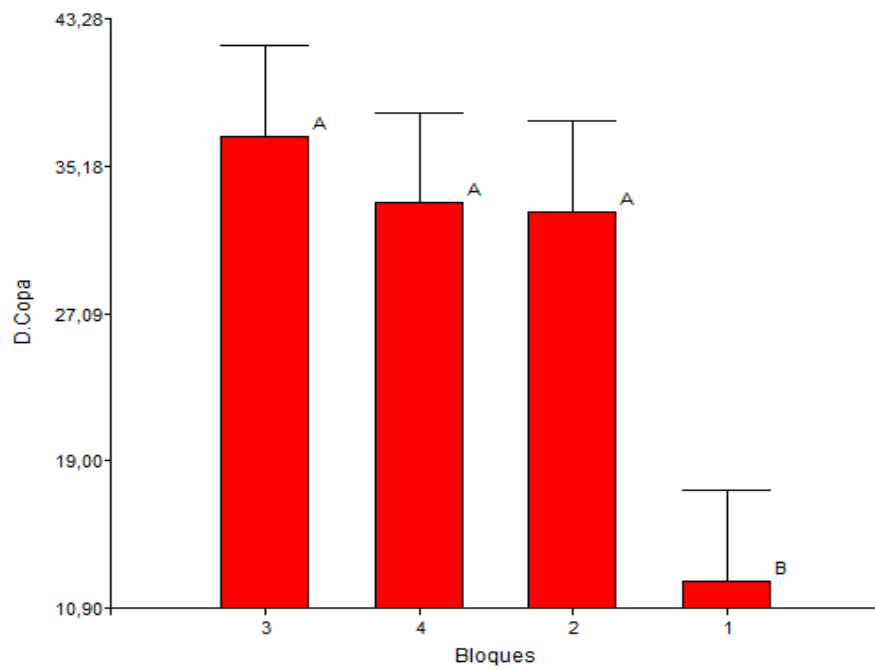


Figura 10. Prueba de DGC para el diámetro de copa por bloques con alfa=0,05

Se encontraron diferencias significativas en el diámetro del tallo de la planta entre los bloques ($p < 0,05$). El bloque 3 presentó los valores más altos (12,57 mm, grupo A), seguido de cerca por los bloques 4 y 2 (11,96-10,83 mm), mientras que el bloque 1 mostró el menor crecimiento (6,63 mm, grupo B). Esta variación entre bloques, con diferencias de hasta 5,94 mm, sugiere que factores intrínsecos del sitio, como la densidad del suelo o la profundidad de enraizamiento, tienen un impacto mayor que las dosis de abono en el engrosamiento del fuste. Este hallazgo coincide con lo que documentaron Gómez (2020) y Li et al. (2024) sobre la alta sensibilidad del crecimiento en diámetro a las condiciones del suelo en especies meliáceas. La respuesta limitada en el bloque 1 sugiere que podrían existir restricciones físicas, como la compactación, que afectan el desarrollo de las raíces, un fenómeno que ha sido observado en suelos tropicales degradados por Rodrigues et al. (2023) y Shi et al. (2024). Esto subraya la importancia de realizar diagnósticos del suelo antes de aplicar fertilizantes, tal como recomendaron Sandoval (2024) y Lee & Chen (2024) (Tabla 12) (Figura 11).

Tabla 12. Prueba de DGC para el diámetro de planta con alfa=0,05

Bloques	Medias	n	
3	12,57	4	A
4	11,96	4	A
2	10,83	4	A
1	6,63	4	B

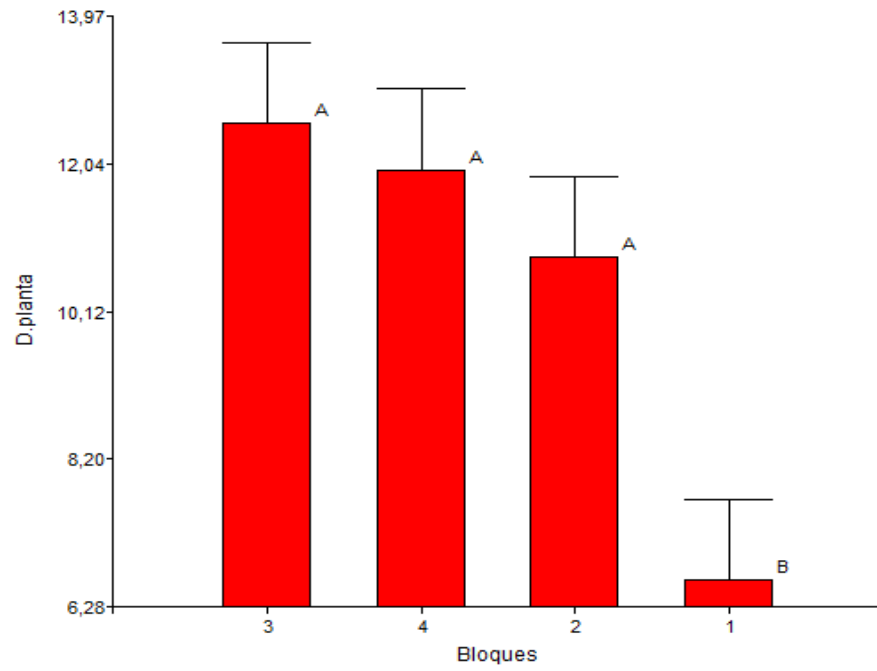


Figura 11. Prueba de DGC para el diámetro de planta por bloques con alfa=0,05

V. CONCLUSIONES

1. La aplicación de abono inorgánico, específicamente la combinación de 86,95 g de urea y 396,74 g de superfosfato triple (T₁), demostró ser la más efectiva para promover el desarrollo inicial de *S. macrophylla*, evidenciando que las dosis balanceadas de nitrógeno y fósforo optimizan significativamente el crecimiento dasométrico durante la fase de establecimiento.
2. El efecto de la fertilización inorgánica estuvo moderado por la variabilidad espacial del terreno, donde los factores edáficos específicos de cada bloque influyeron más determinantemente en el crecimiento que las dosis aplicadas, revelando la necesidad de implementar estrategias de fertilización diferenciadas según las características específicas de cada sitio.
3. La investigación valida que el manejo de fertilización con abonos inorgánicos constituye una herramienta técnica viable para intensificar la productividad en plantaciones de *S. macrophylla*, aunque su implementación debe articularse con un manejo silvícola adaptado a las condiciones locales específicas.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Desarrollar un sistema de sensores inalámbricos que monitoreen en tiempo real la humedad del suelo, los nutrientes y el crecimiento de los cultivos. Esto permitirá una fertilización precisa, reduciendo el uso excesivo de productos químicos (un problema ambiental) y maximizando la productividad de los agricultores (un beneficio social).
2. Implementar talleres prácticos para capacitar en la integración técnica de fertilizantes orgánicos (compost y bioabonos) con fuentes inorgánicas, optimizando la fertilidad y la estructura del suelo como estrategia de mitigación del deterioro ambiental, y generando empleo local mediante la consolidación de viveros comunitarios que actúen como nodos de innovación agrícola.
3. Establecer plantaciones experimentales en zonas impactadas por la minería o la agricultura migratoria, incorporando hongos micorrícicos para potenciar la absorción de nutrientes (sostenibilidad ambiental) y proporcionar opciones económicas a comunidades a través de madera certificada (equidad social).

VII. REFERENCIAS

- Bautista, R., García, M., & López, P. (2023). Optimal nitrogen-phosphorus ratios for tropical hardwood seedlings. *Forest Ecology and Management*, 528, 120-135.
- Bernal, C. (2010). *Metodología de la investigación: Administración, economía, humanidades y ciencias sociales* (3.ª ed.). México D.F.: Pearson Educación.
- Bonnesoeur, V., Locatelli, B., Guariguata, M. R., Ochoa-Tocachi, B. F., Vanacker, V., Mao, Z., ... & Mathez-Stiefel, S. L. (2019). Impacts of forests and forestation on hydrological services in the Andes: A systematic review. *Forest Ecology and Management*, 433, 569-584.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., ... & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125.
- Carrasco, S. (2009). *Metodología de la investigación científica. Pautas para diseñar y elaborar el proyecto de investigación*. San Marcos.
- Castillo, R., Mendoza, A., & Pérez, L. (2023). Monitoreo nutricional en plantaciones industriales. *Revista Peruana de Biología*, 30(2), 145-156.
- Chambi, C. H., Tito, R. M., & Arana, D. A. (2020). Crecimiento inicial de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby en función del manejo de malezas en Ucayali, Perú. *Folia Amazónica*, 29(1), 41-52.
- Chávez, E. (2023). *Abonos complejos en caoba de Tingo María*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS.
- Chávez, H., Rojas, K., & Díaz, M. (2024). Sistemas agroforestales con caoba fertilizada. *Scientia Agropecuaria*, 15(1), 78-89.
- Chen, W., & Liu, H. (2024). Microbial-mediated phosphorus availability in tropical soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 188, 109-120.
- Díaz, A. (2023). *Análisis costo-beneficio fertilización caoba*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Hermilio Valdizán]. Repositorio Institucional.
- Díaz, M., Torres, J., & Salas, R. (2024). Fertilización en fases tempranas de reforestación. *Folia Amazónica*, 33(1), 45-58.
- Fox, T. R., Miller, B. W., Rubilar, R. A., Stape, J. L., & Albaugh, T. J. (2019). *Forest fertilization: A review of the science and practice in the southern United States*. En: B. L. James (Ed.), *Advances in Silviculture* (pp. 145-178). IntechOpen.

- Gómez, D. (2020). *Efecto de la aplicación de dosis de NPK en el crecimiento de Swietenia macrophylla King "caoba" en Tingo María* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/handle/20.500.14292/XXX>
- Gómez, P., Rengifo, T., & Chávez, E. (2024). Fertilización de mantenimiento en plantaciones adultas. *Revista de Investigación UNAS*, 12(2), 67-78.
- González, M., Silva, R., & Fernández, A. (2024). Organic-inorganic fertilizer blends for sustainable forestry. *Journal of Sustainable Forestry*, 43(3), 245-260.
- Gutiérrez, L., Quispe, F., & Mori, J. (2023). Análisis económico de fertilización en caoba. *Economía Agraria*, 25(3), 112-125.
- Heredia, M. C., Zalazar, M. S., & Fernández, M. E. (2020). Efecto de la fertilización fosfatada y el encalado en el crecimiento inicial de *Cedrela balansae* en el norte de Argentina. *Bosque*, 41(2), 155-164.
- Hernández, R. & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill México. 753 p.
- Hernández, R., Fernandez, C., y Baptista, P. (2006). *Metodología de la Investigación* (cuarta ed.). México: Mc Graw Hill.
- Holdridge, L. (1982). *Ecología Basada en Zonas de Vida*. Centro de la ciencia Tropical. 1 ra Ed. San José, Costa Rica. IICA 456 p.
- Jacobo, A. E., García, J. L., & Morales, M. A. (2013). *La investigación científica y su clasificación: básica, aplicada y tecnológica*. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, 1(1), 1–15. Recuperado de <https://www.pag.org.mx/revistas/index.php/PAG/article/view/27>
- Johnson, R., & Kumar, S. (2023). Economic analysis of fertilization in small-scale forestry. *Small-scale Forestry*, 22(4), 567-582.
- Lee, S., & Chen, X. (2024). Modeling growth response to fertilization in mahogany. *Ecological Modelling*, 492, 110-125.
- Li, Y., Zhang, W., Liu, J., Chen, H., & Wang, S. (2024). Phosphorus addition alters microbial-mediated soil organic carbon persistence in tropical and subtropical forests: Evidence from field experiment and meta-analysis. *Global Change Biology*, 30(4), e17245.
- López, O., Duran, R., & Cueva, A. (2019). Crecimiento y manejo de *Swietenia macrophylla* King en plantaciones forestales: Una revisión. *Revista de Investigación Agroforestal*, 5(2), 45-60.

- Martínez, A. S., Rodríguez-Soalleiro, R., Gyenge, J., & Fernández, M. E. (2024). La fertilización modula la herbivoría de insectos en *Nothofagus antarctica*: Respuestas a la adición de nitrógeno, fósforo y potasio en bosques patagónicos. *Forest Ecology and Management*, 563, 121945.
- Mori, J., Castillo, R., & Vásquez, P. (2024). Fertilización en sistemas silvopastoriles con caoba. *Revista de Sistemas Agroforestales*, 8(1), 34-47.
- Mueller, D., Schmidt, K., & Weber, P. (2023). Precision fertilization in tropical forest nurseries. *Computers and Electronics in Agriculture*, 194, 106-118.
- Murillo, M., Camacho, P. (1997). *Metodología para la evaluación de la calidad de plantaciones forestales recién establecidas*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Departamento de Ingeniería Forestal. Costa Rica. 17 p.
- Organización Internacional de las Maderas Tropicales. (2021). *Annual Review and Assessment of the World Timber Situation*. International Tropical Timber Organization.
- Paredes, A. (2023). *Respuesta de caoba a urea en suelos de Rupa Rupa*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de Selva]. Repositorio UNAS.
- Paredes, R., Salazar, H., & Torres, M. (2023). Biofertilizantes en producción de plantones de caoba. *Biotecnología Vegetal*, 23(4), 201-215.
- Park, J., Kim, S., & Tanaka, Y. (2023). Long-term nutrient monitoring in tropical plantations. *Forest Science*, 69(2), 134-145.
- Pinto, J. R., Davis, A. S., & Leary, J. J. (2021). *Measuring and modeling tree growth and stand development*. En: *Forest Measurements and Biometrics*. Oregon State University Press.
- Quispe, F., Gutiérrez, L., & Ríos, M. (2023). Fertilización nitrogenada en bolaina y capirona. *Ciencia Amazónica*, 11(2), 89-102.
- Rahman, K. A., & Zhang, D. (2018). Effects of fertilizer broadcasting on the excessive use of inorganic fertilizers and environmental sustainability. *Sustainability*, 10(3), 759.
- Ramos, L., Sánchez, J., & García, E. (2020). Respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo en plantaciones jóvenes de *Terminalia amazonia* en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 17(41), 1-10.
- Rengifo, T., Gómez, P., & Díaz, A. (2024). Fertilización fosfatada en ladera tingalesa. *Revista de Suelos Ecuatoriales*, 54(1), 23-35.
- Ríos, M., Mori, J., & Castillo, R. (2024). Fertilización orgánico-mineral en plantaciones comunales. *Extensión Forestal*, 18(2), 67-79.

- Rodrigues, V. D. S., Motta, A. C. V., Barbosa, J. Z., Ercole, T. M., & Prior, S. A. (2023). Wood production and nutritional status of *Pinus taeda* L. in response to fertilization and liming: A meta-analysis of the Americas. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 16(4), 195.
- Rodríguez, C., Martínez, F., & García, R. (2023). Early growth response of mahogany to controlled-release fertilizers. *New Forests*, 54(3), 445-460.
- Rojas, K., Chávez, H., & Díaz, M. (2023). Fertilización fosfatada en suelos ácidos de Ucayali. *Revista Forestal del Perú*, 38(1), 56-68.
- Salas, R., Díaz, M., & Torres, J. (2024). Fertilización en asociación caoba-café. *Agroforestería en las Américas*, 52, 78-89.
- Salazar, H., Paredes, R., & Torres, M. (2024). Fertilización en suelos degradados por minería. *Recursos Naturales y Ambiente*, 85, 45-57.
- Sandoval, B. (2024). *Evaluación del crecimiento en diámetro y altura de la especie Swietenia macrophylla "Caoba" a diferentes dosis de fertilización en las plantaciones del CIEFOR puerto Almendra, Loreto, Perú – 2022*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de la Amazonia Peruana]. Repositorio Institucional UNAP. <https://hdl.handle.net/20.500.12737/10908>
- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. (2021). *Plan Nacional de Reforestación 2021-2030*.
- Shi, X., Zhang, Y., Wang, L., & Chen, J. (2024). Combined application of amino acids and phosphorus-solubilizing microorganisms improves plant growth and soil health in phosphorus-deficient soils. *Journal of Sustainable Agriculture and Soil Science*, 15 (3), 245-260.
- Silva, A., Oliveira, M., & Santos, P. (2024). Mycorrhizal association in fertilized mahogany seedlings. *Symbiosis*, 92(1), 34-48.
- Singh, R., Patel, K., & Sharma, M. (2024). Foliar nutrient diagnosis in young mahogany plantations. *Journal of Plant Nutrition*, 47(8), 1125-1140.
- Soto, R. (2015). *La tesis de maestría y doctorado en 4 pasos*. (2da Ed). Edit. DIOGRAF.
- Takahashi, Y., & Santos, R. (2023). Root architecture response to phosphorus placement in mahogany. *Plant and Soil*, 489(1-2), 345-360.
- Torres, J. (2023). *Fertilización orgánica en viveros municipales*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS.
- Torres, J., & Mendoza, A. (2024). Abonos foliares en viveros forestales amazónicos. *Journal of Tropical Forest Science*, 36(1), 78-89.

- Valderrama, S. (2013). *Pasos para elaborar proyectos de investigación científica* (2a ed.). San Marcos.
- Van Bodegom, A. J., Van Den Berg, J., & Van Der Meer, P. J. (2008). *Forest plantation for sustainable production in the tropics: Key issues for decision-makers*. Wageningen University & Research Centre.
- Vásquez, P., Mori, J., & Castillo, R. (2023). Optimización dosis NPK en viveros comerciales. *Revista de Investigación en Ciencias Agrícolas*, 15(3), 145-158.
- Wang, H., Li, X., & Zhang, W. (2024). Water-fertilizer interaction in tropical timber species. *Agricultural Water Management*, 291, 108-120.
- Wright, S. J. (2019). *Plant responses to nutrient addition experiments conducted in tropical*.
- Zúñiga, I., Rojas, E., & Barrena, M. (2022). Caracterización de la fertilidad de suelos en áreas de reforestación con especies nativas en la región Huánuco, Perú. *Scientia Agropecuaria*, 13(1), 77-86.

ANEXOS

ANEXO A: DATOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Tabla 13. Datos de campo de las evaluaciones realizadas a la plantación de Caoba.

Evaluación	Nº de hojas	Altura de yema terminal	Altura total	E-O	N-S	Diám (mm)	Fecha
1	23,00	32,00	43,00	27,00	36,00	5,13	13/01/2024
2	0,00	0,00	34,00	0,00	0,00	4,71	17/04/2024
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11/07/2024
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26/10/2024
1	15,00	36,00	48,00	30,00	22,00	3,94	13/01/2024
2	38,00	44,00	60,00	36,00	37,00	6,47	17/04/2024
3	56,00	49,00	62,00	49,00	53,00	8,40	11/07/2024
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26/10/2024
1	15,00	32,00	43,00	38,00	28,00	4,60	13/01/2024
2	31,00	45,50	51,00	37,00	36,00	9,09	17/04/2024
3	43,00	53,00	64,00	34,00	30,00	11,05	11/07/2024
4	60,00	62,00	72,00	42,00	35,00	11,89	26/10/2024
1	11,00	26,50	38,00	29,00	20,00	4,28	13/01/2024
2	41,00	41,00	54,00	38,00	31,00	6,98	17/04/2024
3	57,00	46,00	57,00	42,00	29,00	8,90	11/07/2024
4	79,00	59,00	74,00	38,00	32,00	9,96	26/10/2024
1	21,00	30,50	40,00	28,00	33,00	3,91	13/01/2024
2	27,00	33,00	46,00	37,00	28,00	6,80	17/04/2024
3	42,00	39,00	47,00	34,00	29,00	8,41	11/07/2024
4	33,00	42,00	51,00	20,00	25,00	8,45	26/10/2024
1	16,00	31,00	39,00	29,00	29,00	4,36	13/01/2024
2	41,00	37,00	43,00	36,00	30,00	6,05	17/04/2024
3	87,00	65,00	74,00	40,00	44,00	10,57	11/07/2024
4	45,00	68,00	78,00	34,00	25,00	10,60	26/10/2024
1	10,00	36,00	41,00	30,00	32,00	4,62	13/01/2024
2	36,00	50,00	60,00	44,00	27,00	8,11	17/04/2024
3	58,00	81,00	92,00	46,00	59,00	12,95	11/07/2024
4	60,00	85,00	95,00	43,00	53,00	16,94	26/10/2024
1	16,00	32,00	42,00	30,00	26,00	5,08	13/01/2024
2	45,00	51,00	68,00	51,00	40,00	9,23	17/04/2024
3	52,00	72,00	92,00	62,00	61,00	12,98	11/07/2024
4	47,00	77,00	89,00	42,00	47,00	13,00	26/10/2024
1	12,00	25,50	32,00	28,00	26,00	3,39	13/01/2024
2	29,00	32,00	46,00	29,00	30,00	5,40	17/04/2024
3	69,00	47,00	68,00	40,00	48,00	8,50	11/07/2024
4	40,00	50,00	62,00	32,00	30,00	8,55	26/10/2024
1	17,00	32,00	41,00	40,00	29,00	4,65	13/01/2024
2	34,00	40,00	46,00	38,00	45,00	6,90	17/04/2024
3	71,00	60,00	75,00	50,00	51,00	10,85	11/07/2024
4	72,00	67,00	82,00	45,00	42,00	10,88	26/10/2024
1	23,00	30,50	46,00	27,00	32,00	3,26	13/01/2024
2	27,00	40,00	48,00	37,00	36,00	5,83	17/04/2024
3	55,00	55,00	60,00	37,00	47,00	10,20	11/07/2024
4	100,00	67,00	81,00	47,00	50,00	11,27	26/10/2024
1	19,00	30,50	37,00	25,00	18,00	4,31	13/01/2024
2	21,00	34,00	42,00	24,00	30,00	5,40	17/04/2024
3	25,00	36,50	49,00	34,00	38,00	7,19	11/07/2024
4	18,00	42,00	52,00	27,00	26,00	8,55	26/10/2024

1	28,00	33,00	44,00	32,00	28,00	4,89	13/01/2024
2	32,00	38,00	46,00	28,00	34,00	5,50	17/04/2024
3	47,00	45,00	55,00	51,00	39,00	7,80	11/07/2024
4	52,00	60,00	76,00	30,00	36,00	8,87	26/10/2024
1	23,00	38,00	46,00	30,00	31,00	4,74	13/01/2024
2	21,00	40,00	49,00	26,00	31,00	5,83	17/04/2024
3	24,00	43,00	50,00	27,00	28,00	7,24	11/07/2024
4	26,00	45,00	54,00	21,00	21,00	7,63	26/10/2024
1	19,00	33,00	38,00	40,00	32,00	4,14	13/01/2024
2	42,00	36,00	46,00	31,00	25,00	7,67	17/04/2024
3	62,00	51,50	60,00	47,00	54,00	12,27	11/07/2024
4	93,00	65,50	78,00	56,00	55,00	13,42	26/10/2024
1	21,00	30,00	39,00	18,00	35,00	4,13	13/01/2024
2	50,00	42,00	57,00	34,00	42,00	7,80	17/04/2024
3	110,00	67,50	80,00	80,00	58,00	12,50	11/07/2024
4	80,00	74,00	90,00	49,00	50,00	13,62	26/10/2024
1	23,00	27,00	38,00	29,00	21,00	4,50	13/01/2024
2	27,00	37,00	51,00	34,00	37,00	6,20	17/01/2024
3	88,00	89,00	108,00	70,00	92,00	10,81	11/07/2024
4	103,00	95,50	108,00	75,00	95,00	15,43	26/10/2024
1	19,00	33,00	40,00	34,00	31,00	4,64	13/01/2024
2	37,00	43,00	53,00	28,00	34,00	6,71	17/04/2024
3	122,00	75,00	92,00	80,00	67,00	11,44	11/07/2024
4	137,00	92,00	98,00	85,00	75,00	17,79	26/10/2024
1	15,00	30,00	37,00	36,00	22,00	3,96	13/01/2024
2	28,00	34,50	42,00	27,00	26,00	6,40	17/04/2024
3	44,00	47,00	58,00	38,00	38,00	7,85	11/07/2024
4	60,00	53,00	62,00	28,00	30,00	8,83	26/10/2024
1	22,00	38,00	51,00	32,00	30,00	4,08	13/01/2024
2	36,00	43,00	54,00	33,00	36,00	6,58	17/04/2024
3	49,00	62,00	75,00	44,00	38,00	8,85	11/07/2024
4	92,00	74,00	86,00	55,00	55,00	11,92	26/10/2024
1	20,00	25,50	31,00	21,00	25,00	3,94	13/01/2024
2	39,00	33,00	42,00	29,00	27,00	6,87	17/04/2024
3	76,00	48,00	61,00	40,00	35,00	9,67	11/07/2024
4	65,00	57,00	65,00	47,00	35,00	11,67	26/10/2024
1	23,00	30,50	41,00	35,00	30,00	4,65	13/01/2024
2	34,00	39,00	48,00	38,00	35,00	7,60	17/04/2024
3	54,00	63,00	77,00	51,00	78,00	11,38	11/07/2024
4	48,00	67,00	77,00	57,00	63,00	13,82	26/10/2024
1	16,00	37,00	44,00	30,00	32,00	4,66	13/01/2024
2	30,00	42,00	57,00	33,00	37,00	7,49	17/04/2024
3	64,00	72,00	77,00	56,00	58,00	11,87	11/07/2024
4	75,00	85,00	92,00	65,00	60,00	15,07	26/10/2024
1	18,00	30,00	38,00	23,00	29,00	4,15	13/01/2024
2	37,00	37,00	46,00	34,00	32,00	7,32	17/04/2024
3	116,00	70,50	81,00	67,00	65,00	13,15	11/07/2024
4	112,00	91,00	107,00	73,00	68,00	18,57	26/10/2024
1	15,00	30,00	35,00	28,00	23,00	4,36	13/01/2024
2	45,00	49,00	59,00	40,00	44,00	8,60	17/04/2024
3	76,00	73,00	81,00	62,00	60,00	13,43	11/07/2024
4	35,00	86,00	96,00	43,00	41,00	13,47	26/10/2024
1	16,00	31,00	39,00	21,00	30,00	4,29	13/01/2024
2	37,00	45,00	52,00	39,00	33,00	7,50	17/04/2024

3	143,00	87,00	103,00	80,00	77,00	16,51	11/07/2024
4	15,00	110,00	123,00	63,00	72,00	20,40	26/10/2024
1	15,00	31,50	40,00	26,00	26,00	4,32	13/01/2024
2	37,00	41,00	54,00	41,00	29,00	6,97	17/04/2024
3	74,00	54,50	70,00	50,00	55,00	9,88	11/07/2024
4	103,00	69,00	84,00	50,00	60,00	11,59	26/10/2024
1	21,00	29,00	35,00	47,00	38,00	4,34	13/01/2024
2	50,00	37,50	50,00	42,00	47,00	7,12	17/04/2024
3	130,00	59,00	76,00	59,00	65,00	12,83	11/07/2024
4	80,00	67,00	84,00	62,00	56,00	13,18	26/10/2024
1	20,00	25,50	38,00	26,00	29,00	3,90	13/01/2024
2	30,00	38,00	47,00	30,00	39,00	7,12	17/04/2024
3	29,00	48,00	63,00	45,00	40,00	9,63	11/07/2024
4	48,00	56,00	72,00	50,00	40,00	10,46	26/10/2024
1	11,00	31,50	37,00	29,00	28,00	4,87	13/01/2024
2	49,00	50,00	64,00	50,00	48,00	8,88	17/04/2024
3	81,00	74,00	83,00	52,00	56,00	15,37	11/07/2024
4	144,00	100,00	111,00	60,00	65,00	21,14	26/10/2024
1	18,00	30,00	37,00	30,00	27,00	4,34	13/01/2024
2	37,00	41,50	53,00	38,00	34,00	7,20	17/04/2024
3	88,00	52,00	65,00	56,00	51,00	11,82	11/07/2024
4	208,00	92,00	104,00	76,00	80,00	18,73	26/10/2024
1	12,00	26,50	32,00	27,00	21,00	3,79	13/01/2024
2	28,00	37,50	50,00	42,00	33,00	6,08	17/04/2024
3	104,00	75,00	85,00	64,00	68,00	12,31	11/07/2024
4	85,00	88,00	100,00	72,00	72,00	14,01	26/10/2024
1	17,00	27,00	35,00	21,00	27,00	4,58	13/01/2024
2	20,00	33,50	38,00	27,00	26,00	6,18	17/04/2024
3	48,00	47,00	67,00	41,00	42,00	9,65	11/07/2024
4	63,00	76,00	84,00	54,00	54,00	12,33	26/10/2024
1	12,00	28,00	34,00	22,00	24,00	3,95	13/01/2024
2	23,00	35,00	42,00	33,00	28,00	6,10	17/04/2024
3	53,00	44,00	56,00	44,00	38,00	10,71	11/07/2024
4	132,00	74,50	83,00	49,00	54,00	14,92	26/10/2024
1	13,00	31,00	35,00	23,00	28,00	4,82	13/01/2024
2	28,00	42,50	54,00	38,00	28,00	6,30	17/04/2024
3	52,00	58,00	68,00	48,00	40,00	10,20	11/07/2024
4	126,00	82,50	94,00	50,00	50,00	14,70	26/10/2024
1	13,00	34,00	38,00	28,00	30,00	4,35	13/01/2024
2	33,00	45,00	54,00	30,00	40,00	7,30	17/04/2024
3	100,00	77,00	86,00	73,00	70,00	12,60	11/07/2024
4	153,00	101,50	111,00	82,00	80,00	16,90	26/10/2024
1	32,00	31,00	45,00	30,00	32,00	4,63	13/01/2024
2	58,00	42,50	55,00	47,00	33,00	7,08	17/04/2024
3	70,00	57,00	72,00	54,00	50,00	9,69	11/07/2024
4	99,00	70,00	81,00	53,00	53,00	11,20	26/10/2024
1	18,00	26,50	32,00	30,00	25,00	4,37	13/01/2024
2	40,00	41,00	52,00	58,00	54,00	8,40	17/04/2024
3	79,00	68,00	80,00	80,00	80,00	11,28	11/07/2024
4	34,00	74,00	82,00	42,00	34,00	12,01	26/07/2024
1	18,00	25,00	33,00	22,00	30,00	4,00	13/01/2024
2	35,00	36,00	53,00	35,00	33,00	6,80	17/04/2024
3	49,00	45,50	61,00	41,00	45,00	9,82	11/07/2024
4	62,00	65,00	80,00	48,00	42,00	10,28	26/10/2024

1	23,00	30,50	42,00	26,00	23,00	4,40	13/01/2024
2	39,00	42,00	55,00	38,00	33,00	6,90	17/04/2024
3	98,00	82,50	97,00	64,00	70,00	12,82	11/07/2024
4	52,00	94,00	103,00	56,00	45,00	14,72	26/10/2024
1	11,00	25,50	32,00	20,00	27,00	4,27	13/01/2024
2	28,00	32,00	43,00	34,00	35,00	5,25	17/04/2024
3	83,00	52,50	62,00	64,00	62,00	10,47	11/07/2024
4	65,00	72,00	81,00	56,00	67,00	12,76	26/10/2024
1	20,00	32,00	40,00	25,00	34,00	4,63	13/01/2024
2	36,00	42,50	57,00	35,00	35,00	7,00	17/04/2024
3	136,00	65,50	81,00	71,00	75,00	14,17	11/07/2024
4	95,00	81,00	90,00	73,00	70,00	16,30	26/10/2024
1	14,00	28,50	33,00	27,00	25,00	3,64	13/01/2024
2	24,00	32,50	41,00	27,00	28,00	5,25	17/04/2024
3	61,00	47,00	57,00	48,00	42,00	8,84	11/07/2024
4	110,00	58,00	69,00	48,00	51,00	10,59	26/10/2024
1	18,00	30,00	36,00	28,00	21,00	3,80	13/01/2024
2	19,00	36,50	42,00	27,00	23,00	6,15	17/04/2024
3	104,00	63,00	73,00	84,00	74,00	11,20	11/07/2024
4	240,00	92,50	108,00	95,00	80,00	20,64	26/10/2024
1	9,00	36,00	42,00	26,00	27,00	3,57	13/01/2024
2	39,00	45,00	56,00	40,00	42,00	7,16	17/04/2024
3	154,00	91,00	101,00	78,00	80,00	14,57	11/07/2024
4	142,00	99,50	110,00	75,00	75,00	20,60	26/10/2024
1	15,00	31,00	36,00	18,00	28,00	3,22	13/01/2024
2	32,00	39,00	47,00	34,00	31,00	6,03	17/04/2024
3	132,00	83,00	93,00	75,00	76,00	14,71	11/07/2024
4	163,00	98,00	110,00	83,00	76,00	22,19	26/10/2024
1	18,00	26,00	33,00	38,00	32,00	4,38	13/01/2024
2	32,00	35,00	45,00	37,00	39,00	7,18	17/04/2024
3	90,00	59,50	71,00	79,00	70,00	13,01	11/07/2024
4	204,00	94,00	108,00	73,00	75,00	20,82	26/10/2024
1	15,00	33,00	38,00	18,00	35,00	3,75	13/01/2024
2	26,00	39,00	51,00	27,00	30,00	7,01	17/04/2024
3	72,00	54,50	67,00	46,00	45,00	12,84	11/07/2024
4	153,00	77,00	88,00	41,00	41,00	16,67	26/10/2024
1	122,00	161,00	178,00	95,00	80,00	30,28	13/01/2024
2	130,00	165,00	178,00	80,00	86,00	32,01	17/04/2024
3	264,00	168,00	190,00	120,00	120,00	43,05	11/07/2024
4	352,00	205,00	230,00	135,00	130,00	50,25	26/10/2024
1	19,00	29,00	36,00	23,00	30,00	4,39	13/01/2024
2	39,00	38,00	49,00	31,00	40,00	7,60	17/04/2024
3	88,00	61,00	72,00	73,00	70,00	12,51	11/07/2024
4	152,00	82,00	100,00	74,00	60,00	15,80	26/10/2024
1	15,00	29,00	35,00	29,00	35,00	3,78	13/01/2024
2	36,00	36,50	50,00	41,00	32,00	5,94	17/04/2024
3	100,00	55,00	65,00	65,00	68,00	11,02	11/07/2024
4	68,00	62,00	72,00	57,00	44,00	11,90	26/10/2024
1	23,00	33,00	41,00	20,00	28,00	4,81	13/01/2024
2	50,00	37,00	48,00	36,00	37,00	8,05	17/04/2024
3	123,00	63,00	75,00	67,00	70,00	15,14	11/07/2024
4	140,00	82,50	91,00	65,00	60,00	19,26	26/10/2024
1	24,00	26,00	33,00	25,00	21,00	3,43	13/01/2024
2	37,00	36,00	45,00	38,00	39,00	6,05	17/04/2024

3	74,00	52,00	65,00	54,00	52,00	11,30	11/07/2024
4	90,00	68,50	80,00	47,00	46,00	13,29	26/10/2024
1	27,00	25,50	35,00	21,00	28,00	3,49	13/01/2024
2	56,00	44,00	52,00	50,00	41,00	8,30	17/04/2024
3	121,00	85,50	100,00	65,00	74,00	16,70	11/07/2024
4	195,00	100,00	114,00	60,00	64,00	20,37	26/10/2024
1	17,00	29,00	34,00	21,00	28,00	3,94	13/01/2024
2	34,00	39,00	53,00	44,00	36,00	6,16	17/04/2024
3	102,00	63,00	75,00	63,00	66,00	10,93	11/07/2024
4	57,00	72,00	81,00	74,00	64,00	13,24	26/10/2024
1	10,00	21,50	28,00	19,00	30,00	3,80	13/01/2024
2	20,00	33,50	45,00	36,00	30,00	7,22	17/04/2024
3	64,00	54,50	70,00	54,00	60,00	11,91	11/07/2024
4	75,00	85,00	97,00	67,00	76,00	15,66	26/10/2024
1	9,00	29,00	32,00	40,00	21,00	4,68	13/01/2024
2	41,00	37,00	47,00	35,00	35,00	6,50	17/04/2024
3	95,00	55,00	72,00	51,00	58,00	11,75	11/07/2024
4	182,00	78,00	90,00	48,00	53,00	16,24	26/10/2024
1	14,00	28,50	37,00	35,00	37,00	4,13	13/01/2024
2	27,00	37,00	50,00	42,00	46,00	10,22	17/04/2024
3	135,00	90,50	102,00	80,00	90,00	16,37	11/07/2024
4	91,00	104,00	112,00	60,00	75,00	19,28	26/10/2024
1	21,00	24,00	31,00	15,00	30,00	3,53	13/01/2024
2	23,00	27,50	35,00	26,00	33,00	4,66	17/04/2024
3	50,00	39,00	55,00	53,00	43,00	7,95	11/07/2024
4	65,00	46,00	58,00	46,00	49,00	9,25	26/10/2024
1	11,00	28,50	36,00	22,00	20,00	3,90	13/01/2024
2	36,00	39,00	52,00	31,00	36,00	6,28	17/04/2024
3	60,00	48,50	61,00	50,00	50,00	10,70	11/07/2024
4	83,00	61,50	70,00	44,00	45,00	12,95	26/10/2024
1	18,00	25,00	31,00	35,00	28,00	4,30	13/01/2024
2	32,00	36,00	41,00	40,00	34,00	5,97	17/04/2024
3	71,00	53,00	70,00	66,00	65,00	9,34	11/07/2024
4	111,00	75,50	88,00	58,00	58,00	12,15	26/10/2024
1	27,00	32,00	42,00	23,00	22,00	4,28	13/01/2024
2	34,00	34,50	41,00	27,00	26,00	7,57	17/04/2024
3	123,00	88,50	100,00	60,00	62,00	14,12	11/07/2024
4	151,00	107,00	117,00	63,00	58,00	19,13	26/10/2024
1	26,00	34,50	40,00	39,00	22,00	5,39	13/01/2024
2	21,00	41,00	50,00	30,00	28,00	6,90	17/04/2024
3	33,00	44,00	51,00	33,00	50,00	7,78	11/07/2024
4	21,00	46,50	52,00	20,00	38,00	7,85	26/10/2024
1	30,00	21,00	30,00	27,00	27,00	4,93	13/01/2024
2	27,00	24,00	30,00	20,00	31,00	5,35	17/04/2024
3	66,00	33,50	48,00	40,00	44,00	7,21	11/07/2024
4	63,00	39,00	51,00	38,00	36,00	7,60	26/10/2024

Tabla 14. Datos por cada tratamiento y bloques de las plantas de Caoba.

N° planta	Evaluación inicial			Evaluación final			Tratamientos	Bloques
	Alt. total (cm)	DC (cm)	Diám. (mm)	Alt. total (cm)	DC (cm)	Diám. (mm)		
2	48,00	26,00	3,94	88,00	55,00	14,31	T3	B1
4	38,00	24,50	4,28	74,00	35,00	9,96	T0	B1
6	39,00	29,00	4,36	78,00	29,50	10,60	T2	B1
8	42,00	28,00	5,08	89,00	44,50	13,00	T1	B1
9	32,00	27,00	3,39	62,00	31,00	8,55	T1	B1
10	41,00	34,50	4,65	82,00	43,50	10,88	T1	B1
11	46,00	29,50	3,26	81,00	48,50	11,27	T2	B1
12	37,00	21,50	4,31	52,00	26,50	8,55	T2	B1
13	44,00	30,00	4,89	76,00	33,00	8,87	T0	B1
14	46,00	21,00	4,74	54,00	30,50	7,63	T0	B1
15	38,00	36,00	4,14	78,00	55,50	13,42	T3	B1
16	39,00	26,50	4,13	90,00	49,50	13,62	T3	B1
17	38,00	25,00	4,50	108,00	85,00	15,43	T2	B2
18	40,00	32,50	4,64	98,00	80,00	17,79	T2	B2
19	37,00	29,00	3,96	62,00	29,00	8,83	T0	B2
20	51,00	31,00	4,08	86,00	55,00	11,92	T0	B2
21	31,00	23,00	3,94	65,00	41,00	11,67	T3	B2
22	41,00	32,50	4,65	77,00	60,00	13,82	T3	B2
23	44,00	31,00	4,66	92,00	62,50	15,07	T1	B2
24	38,00	26,00	4,15	107,00	70,50	18,57	T1	B2
26	39,00	25,50	4,29	123,00	67,50	20,40	T1	B2
28	35,00	42,50	4,34	84,00	59,00	13,18	T3	B2
30	37,00	28,50	4,87	111,00	62,50	21,14	T0	B2
32	32,00	24,00	3,79	100,00	72,00	14,01	T2	B2
34	34,00	23,00	3,95	83,00	51,50	14,92	T0	B3
36	38,00	29,00	4,35	111,00	81,00	16,90	T1	B3
38	32,00	27,50	4,37	82,00	38,00	12,01	T3	B3
40	42,00	24,50	4,40	103,00	50,50	14,72	T2	B3
41	32,00	23,50	4,27	81,00	61,50	12,76	T2	B3
42	40,00	29,50	4,63	90,00	71,50	16,30	T2	B3
43	33,00	26,00	3,64	69,00	49,50	10,59	T3	B3
44	36,00	24,50	3,80	108,00	87,50	20,64	T3	B3
45	42,00	26,50	3,57	110,00	75,00	20,60	T1	B3
46	36,00	23,00	3,22	110,00	79,50	22,19	T1	B3
47	33,00	35,00	4,38	108,00	74,00	20,82	T0	B3
48	38,00	26,50	3,75	88,00	41,00	16,67	T0	B3
49	178,00	87,50	30,28	230,00	132,50	50,25	T3	B4
50	36,00	26,50	4,39	100,00	67,00	15,80	T3	B4
51	35,00	32,00	3,78	72,00	50,50	11,90	T1	B4
52	41,00	24,00	4,81	91,00	62,50	19,26	T1	B4
53	33,00	23,00	3,43	80,00	46,50	13,29	T0	B4
54	35,00	24,50	3,49	114,00	62,00	20,37	T0	B4
55	34,00	24,50	3,94	81,00	69,00	13,24	T2	B4
56	28,00	24,50	3,80	97,00	71,50	15,66	T2	B4
58	37,00	36,00	4,13	112,00	67,50	19,28	T2	B4
60	36,00	21,00	3,90	70,00	44,50	12,95	T0	B4
62	42,00	22,50	4,28	117,00	60,50	19,13	T1	B4
64	30,00	27,00	4,93	51,00	37,00	7,60	T3	B4

Tabla 15. Promedios por tratamiento y bloque por categoría de cada evaluación.

Tratamientos	Bloques	Evaluación inicial			Evaluación final		
		Al.total	D.Copa	D.planta	Al.total	D.Copa	D.planta
		1	1	1	2	2	2
0	1	42,67	25,16	4,63	68	32,83	8,82
1	1	38,33	29,83	4,37	77,67	39,67	10,81
2	1	40,67	26,67	3,98	70,33	34,83	10,14
3	1	41,67	29,5	4,07	85,33	53,33	13,78
0	2	41,67	29,5	4,3	86,33	48,33	13,96
1	2	40,33	27,5	4,37	107,33	66,83	18,01
2	2	36,67	27,17	4,31	102	79	15,74
3	2	35,67	32,67	4,31	75,33	53,33	12,89
0	3	35	28,17	4,03	93	55,5	17,47
1	3	38,67	26,17	3,71	110,33	78,5	19,9
2	3	38	25,83	4,43	91,33	61,17	14,59
3	3	33,67	26	3,94	86,33	58,33	14,41
0	4	34,67	22,83	3,61	88	51	15,54
1	4	39,33	26,17	4,29	93,33	57,83	16,76
2	4	33	28,33	3,96	96,67	69,33	16,06
3	4	81,33	47	13,2	127	78,83	24,55

ANEXO B: ANÁLISIS DE SUELO EN LABORATORIO

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, AGUA Y ECOTOXICOLOGÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA



ANÁLISIS DE SUELOS



FECHA DE REPORTE: 2/02/2024
RECIBO N° 34407

SOLICITANTE: PIZARRO RAMIREZ ALEXANDER PAUL
PROCEDENCIA: MIRADOR DE LA BELLA - RUPA RUPA - LEONCIO PRADO - HUANOICO

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS	ANÁLISIS MECÁNICO						ANÁLISIS QUÍMICO													
		Arena	Arcilla	Limo	pH	CE	Materia Orgánica	N	C	P	K ₂ O	Ca	Mg	K	Na	Al	H	Acidez Cambiable	Saturación de Aluminio		
CODIGO DEL SUELO	CLASE	Abc	Lo	%	0-14 dSm	M.O.	total	Orgánico	disponible	CIC Calcio	Magnesio	Fósforo	Sodio	Aluminio	Hidrogeno	CICa	%	%			
1	6096-2024 MI - CUBRA	49.66	32.42	17.91	4.91	0.17	2.18	0.109	1.266	4.420	131.166	4.420	0.447	0.424	0.119	3.700	0.080	7.680	50.781	49.219	48.177

Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo Maria



Dr. RIGOBERTO HUAMANIPARACUI
MSc. Laborador de Suelos, Agua y Ecotoxicología

CATEDRA CONTROL AM 121 - TINGO MARIA

GRACIAS POR SU PREFERENCIA

analisis@uasla.edu.pe
TEL: 054 224 9990351

Figura 12. Análisis de suelo del área de investigación.

ANEXO C: Panel fotográfico

Figura 13. Limpieza del área de investigación.



Figura 14. Alineación para la instalación de las plantas de *S. macrophylla*.



Figura 15. Apertura de hoyos para la instalación de los plantones de *S. macrophylla*.



Figura 16. Control del peso de cada una de las dosis de acuerdo con los tratamientos.



Figura 17. Abonamiento antes del plantado.



Figura 18. Instalación de las plantas de Caoba luego de mezclar el abono con la tierra.



Figura 19. Establecimiento de los plantones de Caoba.



Figura 20. Evaluación de línea base del diámetro de tallo de la planta instalada.



Figura 21. Evaluación de línea base de la altura de planta.



Figura 22. Evaluación de línea base del diámetro de copa.