

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN RECURSOS**

**NATURALES RENOVABLES**



**INFLUENCIA DE *Inga edulis* (GUABA) EN LA RECUPERACIÓN Y REGULACIÓN  
DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN UN SUELO DEGRADADO EN TINGO  
MARÍA, PERÚ**

**Tesis**

**Para optar el título de:**

**INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

**Presentado por:**

**GERLLY NAOMI DOLORES TINEO**

**Tingo María – Perú**

**2025**



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 024-2026-FRNR-UNAS**

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 11 de diciembre de 2025, a horas 05:00 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:

**“INFLUENCIA DE *Inga edulis* (GUABA) EN LA RECUPERACIÓN Y REGULACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN UN SUELO DEGRADADO EN TINGO MARÍA, PERÚ”**

Presentado por la Bachiller: **DOLORES TINEO, GERLLY NAOMI** 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, la 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, 19 de febrero de 2026

  
Dr. RONALD HUGO PUERTA TUESTA  
PRESIDENTE

  
Ing. MSc. EDILBERTO DIAZ QUINTANA  
MIEMBRO

  
Ing. MSc. WARREN RIOS GARCIA  
MIEMBRO



  
Dra. MARÍA EVELING DAZA PANDURO DE REAÑO  
ASESOR

  
Dr. YTAVOLVERH VARGAS CLEMENTE  
(AUSENTE POR AÑO SABÁTICO)

  
Ing. FRITS PALOMINO VERA  
ASESOR



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

## CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 087 - 2026 - CS-RIDUNAS

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

### CERTIFICA QUE:

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

### Programa de Estudio:


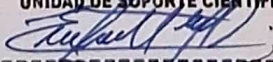
Ingeniería en Recursos Naturales Renovables

### Tipo de documento:

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

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
INFLUENCIA DE <i>Inga edulis</i> (GUABA) EN LA RECUPERACIÓN Y REGULACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN UN SUELO DEGRADADO EN TINGO MARÍA, PERÚ	GERLLY NAOMI DOLORES TINEO	07 % Siete	Menor a 20 %

Tingo María, 20 de marzo de 2026.

 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

Tingo María

## VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

### DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

“Promoviendo la Calidad de la Investigación”

“Año de la recuperación y la consolidación de la economía peruana”

<b>Universidad</b>	: Universidad Nacional Agraria de la Selva
<b>Facultad</b>	: Recursos Naturales Renovables
<b>Escuela Profesional</b>	: Escuela Profesional de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables
<b>Título de la Tesis</b>	: Influencia de <i>Inga edulis</i> (guaba) en la recuperación y regulación de servicios ecosistémicos en un suelo degradado en Tingo María, Perú.
<b>Objetivo de la Tesis</b>	: Evaluar la influencia de la <i>I. edulis</i> en la recuperación y regulación de los servicios ecosistémicos en un suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María.
<b>Autor de la Tesis</b>	: Dolores Tineo, Gerlly Naomi.
<b>DNI</b>	: 75540193
<b>Correo electrónico</b>	: gerlly.dolores@unas.edu.pe
<b>Asesor (es)</b>	: Dra. Daza Panduro de Reaño, María Eveling. Dr. Vargas Clemente, Ytavclerh. Ing. Palomino Vera, Frits.
<b>Área de investigación</b>	: Valoración de la biodiversidad, recursos naturales y biotecnología.
<b>Grupo de investigación</b>	: Manejo, conservación y aprovechamiento sostenible de la biodiversidad y recursos naturales.
<b>Línea de investigación</b>	: Manejo, conservación y aprovechamiento sostenible de la biodiversidad y recursos naturales.
<b>Lugar de ejecución</b>	: Rupa Rupa
<b>Fecha de inicio</b>	: Enero 2024
<b>Fecha término</b>	: Enero 2025
<b>Presupuesto</b>	: S/ 7 217,10
<b>Financiamiento</b>	: Propio (X) FEDU ( ) Externo ( )

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES**



**TESIS**

<b>Título</b>	: Influencia de <i>Inga edulis</i> (guaba) en la recuperación y regulación de servicios ecosistémicos en un suelo degradado en Tingo María, Perú.
<b>Programa de investigación</b>	: Valoración de la biodiversidad, recursos naturales y biotecnología.
<b>Línea de investigación</b>	: Manejo, conservación y aprovechamiento sostenible de la biodiversidad y recursos naturales.
<b>Eje temático</b>	: Plantaciones forestales y agroforestales
<b>Autor</b>	: Dolores Tineo, Gerlly Naomi.
<b>Asesor (es)</b>	: Dra. Daza Panduro de Reaño, María Eveling. Dr. Vargas Clemente, Ytavclerh. Ing. Palomino Vera, Frits.
<b>Lugar de ejecución</b>	: Rupa Rupa
<b>Duración del trabajo</b>	: 12 meses
<b>Financiamiento</b>	: S/ 7 217,10
<b>FEDU</b>	: No
<b>Propio</b>	: Si
<b>Otros</b>	: No

**Tingo María – Perú Noviembre, 2025.**

## DEDICATORIA

A mis amados padres, Dino Franco Dolores Cabrera y Cecilia Consuelo Tineo Silva, quienes con su inmenso amor, sacrificio y fortaleza me enseñaron el verdadero significado de la perseverancia. Gracias por ser mi refugio en los momentos difíciles, por creer en mí, incluso cuando yo dudaba, y por impulsarme siempre a alcanzar mis sueños. Cada logro que hoy celebro lleva impreso el esfuerzo, la fe y el amor que me han brindado toda la vida. Esta meta también es de ustedes.

A mi querida hermana, Dayanna Yossira Dolores Tineo, por ser mi cómplice, mi compañera incondicional y una fuente constante de inspiración. Gracias por tu apoyo incansable, por tus palabras de aliento y por recordarme siempre que los sueños se alcanzan con esfuerzo y corazón. Tu amor ha sido una de mis mayores motivaciones.

A mis mentores y profesores, quienes con paciencia y dedicación compartieron su sabiduría, motivándome a crecer no solo como profesional, sino también como persona. Su guía y ejemplo fueron faros que iluminaron mi camino académico, dejando huellas que perdurarán siempre en mi vida.

A mis amigos, quienes con su cariño, alegría y compañía hicieron de este proceso una experiencia inolvidable. Gracias por estar presentes en los momentos de risas y también en los de cansancios, por compartir conmigo cada paso de este recorrido. Esta tesis es también un reflejo de la amistad sincera y del apoyo que me ofrecieron con tanto cariño.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser mi guía y mi fortaleza en todo momento. Gracias por concederme salud, sabiduría, serenidad y esperanza para culminar con éxito esta etapa tan importante de mi vida. En los días de cansancio y dificultad, fuiste mi refugio y mi luz, brindándome la fuerza necesaria para seguir adelante con fe y determinación.

A mi alma mater, la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por brindarme una formación académica integral y por inculcar en mí valores de responsabilidad, disciplina y compromiso. Asimismo, a todos los docentes, investigadores y personal administrativo por su dedicación, esfuerzo y profesionalismo, quienes fueron fundamentales para mi desarrollo personal y profesional.

Mi más sincero agradecimiento a mis asesores, Dra. María Eveling Daza Panduro de Reaño, Dr. Ytavclerh Vargas Clemente e Ing. Frits Palomino Vera, por su orientación constante, por compartir sus conocimientos y experiencias, y por su apoyo incondicional durante todo el proceso de esta investigación. Sus consejos, observaciones y palabras de aliento fueron esenciales para el logro de los objetivos propuestos y para mi crecimiento como investigadora.

A mi familia, pilar fundamental de mi vida, por su amor incondicional, paciencia y comprensión. Gracias por creer en mí incluso en los momentos más difíciles, por animarme a continuar y por ser mi fuente inagotable de fortaleza y motivación. Este logro es el reflejo del cariño, esfuerzo y apoyo constante.

Al señor Santos Inocente Morán Feria, por su valiosa colaboración en la interpretación de los parámetros meteorológicos, así como por la disposición y generosidad al compartir información clave para el desarrollo de esta investigación. Su apoyo fue esencial para alcanzar los resultados esperados.

A Óscar Elías Castillo Lozano y Nayeli Wendy Gabriel Nieves, por su colaboración en la ejecución de este trabajo, por su amistad, paciencia y apoyo constante. Sus palabras de ánimo y disposición fueron de gran ayuda en cada etapa del proceso.

Finalmente, a mis colegas de investigación y amigos, quienes, con su entusiasmo, compromiso y colaboración, contribuyeron de manera significativa a la realización de este proyecto. Cada gesto, palabra y momento compartido marcaron una huella especial en este logro que hoy celebro con profunda gratitud y alegría.

## ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Objetivos .....	2
1.1.1. General.....	2
1.1.2. Específicos .....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
2.1. Marco teórico .....	3
2.1.1. Características generales de la <i>I. edulis</i> .....	3
2.1.2. Restauración de ecosistemas .....	4
2.1.3. Salud del suelo .....	5
2.1.4. Degradación de suelos .....	5
2.1.5. Servicios ecosistémicos .....	6
2.1.6. Biomasa .....	7
2.1.7. Definición de términos .....	8
2.2. Estado del arte .....	12
2.2.1. Internacionales .....	12
2.2.2. Nacionales.....	15
2.2.3. Locales.....	18
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
3.1. Lugar de ejecución.....	21
3.1.1. Ubicación geográfica.....	21
3.1.2. Ubicación política .....	21
3.1.3. Características climáticas.....	22
3.1.4. Zona de vida.....	22
3.1.5. Antecedentes de la plantación.....	22
3.2. Material y métodos .....	23
3.2.1. Materiales y equipos.....	23
3.2.2. Metodología .....	23
3.2.3. Aspectos metodológicos .....	33
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	36

4.1. Recuperación de los suelos a través de sus características físicas, químicas y biológicas del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.....	36
4.1.1. Características físicas de los suelos degradados .....	36
4.1.2. Características químicas de los suelos degradados .....	40
4.1.3. Características biológicas (macrofauna) de los suelos .....	45
4.2. Regulación del microclima generado por la sombra de una plantación <i>I. edulis</i> establecida en un suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva .....	49
4.3. Captura de carbono en una plantación de <i>I. edulis</i> establecida en suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva .....	55
4.3.1. Carbono sobre el suelo en una plantación de <i>I. edulis</i> .....	55
4.3.2. Carbono bajo el suelo en una plantación de <i>I. edulis</i> .....	58
V. CONCLUSIONES .....	63
VI. PROPUESTAS A FUTURO .....	64
VII. REFERENCIAS .....	65
Anexos .....	75

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Clases del suelo de acuerdo a la profundidad efectiva. ....	24
2. Textura del suelo degradado con plantación de <i>I. edulis</i> .....	36
3. Características físicas del suelo degradado con plantación de <i>I. edulis</i> . ....	38
4. Características químicas del suelo degradado con plantación de <i>I. edulis</i> . ....	44
5. Influencia del establecimiento de <i>I. edulis</i> sobre la abundancia y biomasa de <i>L. terrestris</i> en el suelo degradado.....	47
6. Comparación de la abundancia y biomasa de <i>L. terrestris</i> en las distintas profundidades de muestreo del suelo degradado donde se estableció <i>I. edulis</i> .....	48
7. Comparación de la humedad relativa mediante la regulación del microclima generado por la sombra de una plantación de <i>I. edulis</i> . ....	50
8. Comparación de la temperatura ambiental mediante la regulación del microclima generado por la sombra de una plantación de <i>I. edulis</i> . ....	52
9. Contenido de carbono aéreo total en una plantación de <i>I. edulis</i> establecido en suelo degradado. ....	56
10. Distribución del contenido de carbono bajo el suelo degradado con una plantación de <i>I. edulis</i> .....	59
11. Carbono almacenado total en la plantación de <i>I. edulis</i> establecido en suelo degradado.....	62
12. Matriz de consistencia. ....	76
13. Contenido de humedad en distintas profundidades del suelo degradado con plantación de <i>I. edulis</i> .....	84
14. Nivel de densidad aparente en distintas profundidades del suelo degradado con plantación de <i>I. edulis</i> . ....	84
15. Contenido de la porosidad en distintas profundidades del suelo degradado con plantación de <i>I. edulis</i> . ....	85
16. Nivel de compactación y temperatura del suelo degradado con plantación de <i>I. edulis</i> .....	85
17. Cantidad y peso de <i>L. terrestris</i> encontradas en el suelo de una plantación de <i>I. edulis</i> al inicio de la investigación.....	86

18.	Cantidad y peso de <i>L. terrestris</i> encontradas en el suelo de una plantación de <i>I. edulis</i> a 12 meses de iniciada la investigación. ....	87
19.	Temperatura y humedad ambiental registrados bajo dosel de <i>I. edulis</i> y en espacio abierto.....	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Ubicación política del área de estudio – BRUNAS. ....	21
2. Proceso de la evaluación de infiltración del agua en la plantación de <i>I. edulis</i> .....	25
3. Esquema para el muestreo sistemático en la recolección de <i>L. terrestris</i> . ....	27
4. Esquema para el muestreo de temperatura y humedad como servicio de regulación del microclima. ....	28
5. Registro y descarga de datos de temperatura y humedad relativa. ....	29
6. Diseño de la parcela para estimar el carbono en la biomasa herbácea y hojarasca. ....	31
7. Diseño para estimar la biomasa radicular y carbono orgánico del suelo. ....	32
8. Comportamiento de la velocidad de infiltración en suelo degradado con plantación de <i>I. edulis</i> .....	39
9. Distribución de la abundancia de <i>L. terrestris</i> en las profundidades de muestreo del suelo degradado donde se estableció <i>I. edulis</i> .....	45
10. Distribución de la biomasa de <i>L. terrestris</i> en las profundidades de muestreo del suelo degradado donde se estableció <i>I. edulis</i> .....	46
11. Comportamiento de la temperatura ambiental y humedad relativa en días lluviosos como parte de la regulación del microclima. ....	54
12. Comportamiento de la temperatura ambiental y humedad relativa en días soleados como parte de la regulación del microclima. ....	54
13. Proporción del contenido de carbono aéreo en un medio degradado con plantación de <i>I. edulis</i> .....	57
14. Distribución del contenido de carbono aéreo en espacio abierto y bajo dosel de las plantas de <i>I. edulis</i> . ....	57
15. Distribución del contenido de carbono orgánico del suelo en un medio degradado con una plantación de <i>I. edulis</i> .....	60
16. Distribución del contenido de carbono radicular en suelo degradado con una plantación de <i>I. edulis</i> . ....	61
17. Distribución del contenido de carbono bajo el suelo degradado en una plantación de <i>I. edulis</i> .....	62
18. Resultado del ensayo en las muestras de suelos del año 2024.....	79

19.	Resultados del ensayo en las muestras de suelo del año 2024.....	80
20.	Resultados del ensayo en las muestras de suelo del año 2025.....	81
21.	Resultados del ensayo en las muestras de suelo del año 2025.....	82
22.	Mapa de dispersión de la plantación de <i>I. edulis</i> . ....	83
23.	Muestreo del suelo para determinar la clase textural en la plantación de <i>I. edulis</i> .....	96
24.	Muestreo de los suelos en tres profundidades empleando cilindros metálicos para determinar la densidad aparente. ....	96
25.	Medición de la profundidad efectiva en el año 2024. ....	97
26.	Medición de la profundidad efectiva en el año 2025. ....	97
27.	Medición de la compactación del suelo con penetrómetro de bolsillo (kg/cm <sup>2</sup> ). ....	98
28.	Instalación de 500 metros de manguera polietileno hacia la plantación de <i>I. edulis</i> .....	98
29.	Nivelación del infiltrómetro de doble anillo.....	99
30.	Evaluación de la infiltración del agua en la plantación de <i>I. edulis</i> en el año 2024.....	99
31.	Evaluación de la infiltración del agua en la plantación de <i>I. edulis</i> en el año 2025.....	100
32.	Proceso de la evaluación de la infiltración del agua en la plantación de <i>I. edulis</i> .....	100
33.	Muestras del suelo para determinar las características químicas en el laboratorio.....	101
34.	Extracción del suelo del primer monolito para la evaluación de <i>L. terrestris</i> .....	101
35.	Proceso de separación y recolección de <i>L. terrestris</i> que fueron almacenados en frascos de vidrio.....	102
36.	Registro de la humedad relativa y la temperatura ambiental bajo el dosel de <i>I. edulis</i> con Datalogger Elitech RC 51H.....	102
37.	Registro de humedad relativa y temperatura ambiental en un espacio abierto con Datalogger Elitech RC 51H. ....	103
38.	Codificación de las plantas de <i>I. edulis</i> mediante la colocación de placas de aluminio para el monitoreo en campo.....	103

39.	Recolección del componente herbáceo para determinar carbono sobre el suelo en la plantación de <i>I. edulis</i> . .....	104
40.	Muestras de distintos componentes recolectados para determinar la captura de carbono en la plantación de <i>I. edulis</i> .....	104
41.	Medición y registro de la altura total de las plantas de <i>I. edulis</i> . .....	105
42.	Conteo y pesado de <i>L. terrestris</i> procedente de la plantación de <i>I. edulis</i> . .....	105

## RESUMEN

El estudio evaluó la influencia de *Inga edulis* (guaba) en la recuperación y regulación de los servicios ecosistémicos en suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS), Tingo María, Perú. La plantación, establecida con un distanciamiento de 3 x 4 m en un área de 0,54 ha, fue evaluada al primer y segundo año de establecimiento. Se realizó muestreos de suelos para determinar propiedades físicas, químicas y biológicas, complementado con mediciones de la temperatura, humedad ambiental y almacenamiento de carbono en dicha plantación; los datos fueron analizados mediante estadística descriptiva y prueba t para muestras relacionadas. Los resultados evidencian que *I. edulis* favoreció la mejora progresiva de las propiedades físicas del suelo, reduciendo la densidad aparente y la compactación, e incrementando la porosidad; en las propiedades químicas, se observó un aumento significativo de nitrógeno, fósforo y materia orgánica, aunque con una ligera disminución de potasio; en el componente biológico, la abundancia y biomasa de lombrices se concentraron en las capas superficiales del suelo; asimismo, el dosel de *I. edulis* contribuyó a moderar la temperatura y aumentar la humedad relativa en horas de alta radiación; asimismo, se registró un incremento del carbono almacenado, especialmente en el suelo. Se concluye que *I. edulis* influye en la restauración ecológica y la recuperación de la fertilidad en suelos amazónicos degradados.

**Palabras clave:** Carbono almacenado, fertilidad del suelo macrofauna, microclima, plantación.

## ABSTRACT

In the study, the influence of *Inga edulis* (guaba) on the recuperation and regulation of the ecosystemic services in degraded soil from the Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS – acronym in Spanish), Tingo María, Peru, was evaluated. The plantation, established with a distance of 3 x 4 m within a 0.54 acre area, was evaluated during the first and second year after establishment. Samples were taken of the soil in order to determine the physical, chemical and biological properties, complemented with measurements of the temperature, environmental humidity and carbon storage on said plantation; the data was analyzed using the descriptive statistic and the t-test for related samples. The results evidenced that *I. edulis* favored the progressive improvement of the physical properties, reducing the apparent density and the compaction, and increasing the porosity. For the chemical properties, a significant increase was observed in the nitrogen, phosphorous and organic matter, even though there was a slight decrease in the potassium. For the biological component, the abundance and biomass of worms was concentrated in the superficial layers of the soil. At the same time, the canopy of the *I. edulis* contributed to moderating the temperature and increasing the relative humidity during the hours of high radiation. Similarly, an increase in the stored carbon was recorded, especially in the soil. It was concluded that *I. edulis* influenced the ecological restoration and the recuperation of the soil fertility in degraded Amazon soil.

**Keywords:** stored carbon, fertility of the macrofauna in the soil, micro climate, plantation

## I. INTRODUCCIÓN

Los cambios drásticos en el uso de la tierra y cubierta vegetal, que derivan al expandirse y extenderse las actividades antrópicas suelen generar alteraciones negativas sobre la diversidad biológica y su capacidad de proveer servicios ecosistémicos que afectan de manera significativa en cada proceso del cambio de clima a escala global (Sahagún-Sánchez y Reyes-Hernández, 2018). La producción agrícola en la actualidad es la fuente de satisfacer distintas demandas de las personas, sin embargo, es más notorio los impactos tecnológicos de la agricultura convencional y migratoria que son las responsables de que se degraden los suelos.

En el año 2020, el Perú alcanzó una tasa de deforestación de 203 272 hectáreas, ocupando el valor más elevado dentro de los 20 últimos años debido a los procesos migratorios que forman el cambio de uso del suelo de importancia donde la práctica agrícola informal está que reemplaza a los ecosistemas boscosos naturales del Perú, conllevando a que ocurran pérdidas de los bienes y servicios ambientales (Derecho, Ambiente y Recursos Naturales [DAR], 2021).

En el ámbito regional y en la provincia Leoncio Prado, los suelos se encuentran en procesos de erosión fortalecidos por el cultivo de *Erythroxylum coca* (coca) cuya conducción fue dependiente de la tradicional agricultura migratoria y prácticas destructivas como la tala y posterior quema de los árboles, donde se observan grandes terrenos degradados cubierto principalmente por plantas indicadoras del suelo pobre.

La especie *Inga edulis* (guaba) tiene alta capacidad para fijar nitrógeno en el suelo, mejorar la estructura y aportar materia orgánica mediante la descomposición de sus hojas. Asimismo, la captura de carbono atmosférico por su rápido crecimiento ayuda a recuperar los servicios ecosistémicos, como la regulación del microclima, la provisión de agua, y la promoción de la biodiversidad en el entorno.

Por lo descrito anteriormente, se formula la siguiente interrogante: ¿Cómo influye la especie *I. edulis* en la recuperación y regulación de los servicios ecosistémicos en un suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María?

Considerando la formulación del problema a investigar y teniendo en cuenta las características y sobre todo los beneficios de *I. edulis* para el suelo como fijación de nitrógeno, aportes de residuos orgánicos, reciclaje de nutrientes, captura de carbono, entre otros y la amplia distribución geográfica que son rasgos a favor para que se aprovechen

dichos beneficios de impacto positivo en el ecosistema y las personas (Magallanes, 2021). Por lo expuesto, la presente investigación es justificada plenamente por ser una especie valiosa que contribuye a la recuperación de áreas degradadas y la restauración de los servicios ecosistémicos.

Como propósito final, se pretende contribuir a una mejor comprensión de la respuesta y la recuperación de los servicios ecosistémicos generados por una plantación de *I. edulis* en un suelo degradado y en base a ello realizar futuros proyectos orientados a la recuperación de servicios ecosistémicos y posibles aplicaciones con fines académicos e investigativos para la comunidad científica, además como tecnología sirva para los agricultores que tengan interés en la recuperación de suelos y por ende el restablecimiento de servicios ecosistémicos.

De acuerdo con la interrogante planteada en la investigación, se llegó a aceptar la hipótesis planteada concerniente a que: “La especie *I. edulis* influye favorablemente en la recuperación y regulación de los servicios ecosistémicos del suelo degradado en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María”.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. General**

- Evaluar la influencia de la *I. edulis* en la recuperación y regulación de los servicios ecosistémicos en un suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María.

### **1.1.2. Específicos**

- Evaluar la recuperación de los suelos a través de sus características físicas, químicas y biológicas del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Determinar la regulación del microclima generado por la sombra de una plantación de *I. edulis* establecida en un suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Estimar la captura de carbono en una plantación de *I. edulis* establecida en un suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Marco teórico

#### 2.1.1. Características generales de la *I. edulis*

El género *Inga* es originaria de la amazonía que abarcan países como Perú, Ecuador, Bolivia, Colombia y Brasil. Se introdujeron también especies a muchos países de Sudamérica tropical como Costa Rica y Panamá. La *I. edulis* es una Mimosaceae con copa ancha y ramificación simpoidal, alcanzando alturas de 6,0 a 18,0 m y el diámetro varía desde los 15,0 hasta 50,0 cm. Su tronco es recto, con corteza de color marrón claro y la hoja es compuesta paripinnadas cuya dimensión varía de 15,0 cm hasta 25,0 cm. Los folíolos son opuestos de color verde oscuro, haz glabro, ápice agudo y base obtusa, el envés posee pubescencia cuya coloración es amarillenta, la inflorescencia se agrupa en forma de racimo terminal y con flores blancas. Esta planta suele adaptarse dentro del rango de lluvias anuales desde los 1 000 mm hasta más de 5 000 mm, suelo ácido con pH 4,0 y elevada cantidad de aluminio saturado (Calixto, 2018). Asimismo, controla la fragmentación del suelo al evitar que se erosione, con la caída de las hojas generan matillos que limitan el crecimiento de plantas arvenses, además de retener la humedad del suelo (Quijia-Quijia et al., 2020).

Según la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2012), la clasificación taxonómica de la especie *I. edulis* según Cronquist (1981) es:

Reino	: Plantae Haeckel, 1866
División	: Magnoliophyta Cronquist, Takht. & Zimmerm., 1966
Clase	: Magnoliopsida Cronquist, Takht. & Zimmerm., 1966
Subclase	: Rosidae Takht., 1966
Orden	: Fabales Bromhead, 1838
Familia	: Mimosaceae R. Br., 1814
Subfamilia	: Mimosoideae
Género	: <i>Inga</i> Mill.
Especie	: <i>Inga edulis</i> Martius
Autor	: Carl Friedrich Philipp von Martius

*I. edulis* presenta un patrón fenológico caracterizado por dos periodos de floración, fructificación y brotación constante, y ausencia de caída marcada de follaje. La

coincidencia de algunas fenofases con la precipitación y las diferencias respecto a otros estudios sugieren variación fenológica influenciada por condiciones locales y distribución geográfica (Marín-Gómez et al., 2012).

*I. edulis* es utilizado para el control de malezas, a consecuencia de que las hojas de esta especie presenta descomposición lenta y suelen generarse capas de hojarasca que limita a las semillas de las malezas su germinación oportuna (Powell, 1996). Los mantillos de hojarasca son eficientes en el control de malezas al permanecer en el suelo al no descomponerse llegando a prevenir que la semilla de maleza anual llegue a germinar, dicho control no suele ocurrir en el caso de la presencia de alguna maleza propagada vegetativamente (Ferrari & Wall, 2004).

La especie *I. edulis* es empleada hasta en la restauración del suelo que fue afectado por la minería ilegal en donde también se muestra un desarrollo vegetativo óptimo, similar a *Calliandra angustifolia* comúnmente conocida como bobinzana (Mora, 2025).

### **2.1.2. Restauración de ecosistemas**

En el caso de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020), lo definen como el proceso de asistencia a la recuperación de cada ecosistema que quedó degradado, dañado o destruido, con énfasis para establecer cada proceso ecológico necesario con fines de que el sistema terrestre y acuático sea sostenible, resiliente y saludable, bajo cada condición actual y también para el futuro, además de mejorar el bienestar de las personas. Así también, menciona sobre restaurar al bosque degradado y la reintroducción de especies arbóreas en paisajes, que incluso en tierras agrícolas degradadas, pueden ayudar a aliviar la presión sobre las tierras forestales existentes, proporcionar productos forestales, conservar la diversidad biológica, mejorar el flujo hidrológico y el nivel de fertilidad edáfica y se reduzca la erosión del suelo, además que se contribuya la mitigación del cambio de clima por medio del secuestro, la sustitución y la conservación del carbono.

Al restaurar se incorporan especies arbóreas que aportan hojarasca al suelo lo cual se descompone, pero durante el proceso de descomposición de las hojarasca forestales pueden producir muchos ácidos orgánicos, y la formación y las características de estos ácidos tienen efectos importantes en la química del suelo, la ecología microbiana y los ciclos de nutrientes de los vegetales. La acumulación de ácidos orgánicos puede reducir el nivel de pH en el suelo y afectar la solubilidad mineral, así como la actividad microbiana en el suelo. Además, los ácidos orgánicos pueden quelar iones metálicos en el suelo (Al, Fe, Ca, etc.) para promover la liberación y absorción de nutrientes (Zhang et al., 2024).

Al utilizar especies arbóreas en acciones de restauración se observan diferentes cambios, por ejemplo, Kalhoro et al. (2018) demuestra que la infiltración acumulada aumenta con el tiempo de restauración (9, 15 y 25 años) de vegetación, encontrando que a edades superiores a los 25 años de establecidos se observan las tasas de velocidades más altas, esto ocurre según Pereira et al. (2022) debido a que las mejoras en las infiltraciones son realizadas por raíces jóvenes siendo esta acción transitoria, estabilizándose solo tras varios años cuando se consolidan los agregados estables en el suelo. Además, para Revell et al. (2022) la infiltración está influenciada por la proximidad al árbol, la densidad de raíces y la porosidad: sin embargo, no se halló una correlación clara con la madurez de los árboles en ese caso.

### **2.1.3. Salud del suelo**

De acuerdo al Panel Técnico Intergubernamental sobre Suelos (ITPS, 2020), se define como su capacidad del suelo para que sostenga la diversidad, la productividad, así como cada servicio ambiental del ecosistema terrestre. Para la FAO (2020), la tendencia en la salud del suelo se asume por el cambio de su estado anterior, determinado por dos presiones dominantes en el suelo que están influenciadas al manejo de la tierra: las presiones físicas que se relacionan a la pérdida de masa de suelo y su estructura y; las presiones del bienestar de las características químicas del suelo por tiempo prolongado bajo el enfoque de disponibilidad de nutrientes y la no presencia de toxicidades que se acumulen en el suelo. Las tendencias pueden ser negativas (degradaciones) en el caso de que el manejo del suelo no es contrarrestado de manera adecuada respecto a la presión (bajo manejo y natural). Pero, se podría volverse positiva y resultaría en mejoras al aplicarse técnicas de manejo y conservación del suelo y la recompensación que superaría el deterioro del suelo.

### **2.1.4. Degradación de suelos**

Cartes (2013), argumenta que la degradación del suelo pudiera entenderse respecto a la pérdida del equilibrio de sus características, limitando su capacidad productiva. Esto abarcan las propiedades físicas (erosión), químicas (salinidad, pérdida de nutrientes, acidez, etc.) y biológicas (carencia de la materia orgánica) del suelo. Asimismo, la definen como el cambio ocurrido en la salud del suelo cuyo resultado es la mengua de su capacidad de dicho ecosistema respecto a la producción de bienes o la prestación de servicios para sus beneficiarios. El suelo degradado contiene un estado de salud carente de que proporcione bienes y servicios de manera normal respecto al suelo saludable en cuestión en su ecosistema. Como indica Piscitelli (2016), que es un cambio del estado del suelo, cuyo resultado es la disminución de su capacidad inicial respecto a que provea cada bien y servicio.

### **2.1.5. Servicios ecosistémicos**

En base al Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR, 2018), un servicio ecosistémico se traduce en el beneficio aportado por un ecosistema hacia las personas generando mejoría en aspectos económicos, la salud y así como la calidad de vida. El servicio ambiental o ecosistémico es resultado del funcionamiento propio de cada ecosistema. Entre los ejemplos se tiene el agua limpia producida, su capacidad de formar suelos, regular el microclima y la contribución a regular el clima mediante plantaciones o bosques en general, entre otros benéficos que contribuyen. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible del país colombiano (MADS, 2012), conceptualiza al servicio ecosistémico como, el proceso y función del ecosistema que perciben las personas como un beneficio (de tipo cultural, ecológico o económico) indirecto o directo. Además, hay servicios de aprovisionamiento, como agua y alimentos, servicio de regulación, como regular la inundación, sequía, degradación de los suelos y ciertas enfermedades; servicio de sustento como la formación del sustrato y reciclar los nutrientes; y servicio cultural que incluye la recreación, temas espirituales, religiosos entre otros beneficios no materiales.

#### **2.1.5.1. Servicios de provisión**

Según el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM, 2016), el servicio de provisión está definido como el beneficio que se obtiene de algún bien y servicio recibido por las personas de manera directa del ecosistema, dentro del cual se tiene a los alimentos, materia prima, agua, algún recurso genético, etc.

#### **2.1.5.2. Servicios de regulación**

Suelen derivar de ciertas funciones claves del ecosistema, las mismas que reducen algunos impactos globales y locales como es regular el clima, regular el microclima, mantener el ciclo hidrológico, controlar la erosión edáfica, polinizar las flores y demás impactos (Vargas-Gálvez et al., 2018).

El dosel del bosque suele crear el microclima del sotobosque que es diferente del clima que se encuentra en los alrededores; dicha variación del clima local viene a ser la respuesta de muchas interacciones entre distintos rasgos de los rodales y entornos fisiográficos (Arx et al., 2012). Independientemente de la complejidad, la mayoría de los estudios sobre el microclima forestal encontraron un efecto moderador general del dosel forestal sobre parámetros meteorológicos comunes. La regeneración natural de las especies arbóreas, que se encuentran en la fase inicial de vida con mayor vulnerabilidad en el ciclo de vida de un árbol, se encuentra adaptadas y tienen dependencia de estos escenarios microclimáticos específicos creadas por el dosel forestal (Niinemets, 2010).

La influencia del dosel forestal en el microclima del sotobosque se relaciona inversa y directamente a la presencia de tallos y dosel. La rama y las hojas reflejan y absorben parte de la radiación solar durante el día, lo que permite que llegue menor cantidad de energía al suelo debajo del dosel. El grado de absorción está determinado en gran medida por la estructura del rodal y cómo se encuentra compuesto las especies (Renaud y Rebetez, 2009).

Durante la noche, el calor infrarrojo liberado tanto del suelo como de las plantas es parcialmente retenido por el dosel de arriba. Como consecuencia, las áreas boscosas generalmente se enfrían en menor medida durante la noche y limitan que se caliente el aire durante el día. Distintos autores lograron demostrar, que los efectos suavizantes sobre las amplitudes diarias de temperaturas son más pronunciados en días cálidos y soleados y en rodales de mayor densidad (Ma et al., 2010), pero también depende de configuraciones fisiográficas como la elevación, la pendiente y el aspecto, la distancia desde el borde del bosque, la capa de vegetación edáfica y la humedad del suelo (Ferrez et al., 2011).

Dentro de un rodal, el dosel y los tallos ofrecen resistencia a la mezcla de aire y al intercambio de aire con la atmósfera circundante. Debido a este efecto aislante, y debido a que la evaporación de la superficie del suelo y las superficies húmedas de las plantas y la transpiración de las hojas agregan agua al aire mientras se enfrían. Por lo tanto, reducen la capacidad de retener agua del aire, la humedad absoluta y particularmente relativa, generalmente aumenta debajo del dosel. La diferencia con el área abierta es mayor al mediodía y a la primera hora de la tarde, al registrarse valores diarios más bajos. A pesar de la humedad relativa generalmente más alta, las amplitudes diarias debajo del dosel suelen ser más pequeñas que en el área abierta cercana (Renaud y Rebetez, 2009).

Las condiciones cercanas al suelo son generalmente más protegidas, mientras que las condiciones en la capa superior del dosel se acercan a las condiciones ambientales. Estos gradientes dan lugar a procesos termodinámicos verticales entre las diferentes capas de las masas forestales (Arx et al., 2012).

#### **2.1.6. Biomasa**

La biomasa se refiere a un elemento primordial con la cual se determina el contenido del carbono que se almacena dentro del bosque. Al conocer la biomasa forestal, se puede elaborar previsiones respecto al ciclo del carbono a nivel mundial, que es un elemento importante en investigaciones vinculados al cambio de clima (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático [IPCC], 2007).

### **2.1.6.1. Estimación de biomasa**

Con fines que se obtenga la biomasa total por individuos suele realizarse la sumatoria de las biomásas contenidas en cada componente del árbol. Cuando se obtiene la totalidad de biomasa de cada árbol muestreado se suele intentar obtener logros empleando estrategias estadísticas, correlaciones directas de la variable biomasa total de cada árbol con las demás variables de la misma planta; así como mediciones en pie. Para el cálculo de la biomasa viva empleando modelos alométricos es conveniente que se diseñe un muestreo estadístico representativo donde se va medir cada variable independiente de dicho modelo matemático seleccionado. El dato final pudiera presentarse mediante clases diamétricas (Pesantez, 2015).

### **2.1.6.2. Captura de carbono**

Es el proceso de fijar carbono de manera perenne en cada sistema de uso de la tierra como resultado de intervenciones en un área degradada o en proceso de degradación, por lo general el estimado de la cantidad fijada de carbono es expresado en unidad de t/ha/año. Son medidos en distintos sistemas de uso de la tierra que tienen como referencias (generalmente tiempo de uso) mediante conocimiento por el agricultor como: sistemas silvopastoriles, bosques primarios, bosques secundarios de diferentes edades áreas quemadas para cultivos anuales o plantaciones perennes, pastizales, sistemas agroforestales, barbechos mejorados, etc. (Arévalo et al., 2003). Asimismo, para Jandl y Rubio (2005), el secuestro de carbono en un ecosistema forestal se realiza por medio de su almacenamiento en la biomasa y en el suelo. Actividades de forestar una pradera y cambiar el uso de la tierra cuya finalidad es que se establezcan bosques nuevos vienen a ser medidas de mayor efectividad para almacenar el carbono capturado.

### **2.1.7. Definición de términos**

#### **2.1.7.1. Recuperación de servicios ecosistémicos**

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2019), lo consideran al proceso de transformar la degradación del ecosistema con fines de que se recupere la funcionalidad ecológica, mejorando su productividad y capacidad del ecosistema con la cual se satisface diversas necesidades de las personas y que significa favorecer la recuperación de aquellos ecosistemas que fueron destruidos o degradados, así como la conservación de los que aún se encuentran intactos. Disponer del ecosistema más saludable con una diversidad biológica con mayor riqueza suele aportar más beneficios como un suelo muy fértil, mejor disponibilidad de recursos maderables o el pescado, así como mayor reserva de gases de efecto invernadero. La recuperación o restauración se producen

mediante distintas maneras como, por ejemplo, plantar de manera activa o eliminando las presiones perjudiciales a la naturaleza con fines de que se recupere por sí misma.

Según Vanegas (2016), el objetivo primordial de la restauración es recuperar de manera integral un ecosistema que está degradado de manera total o parcial, respecto a la estructura de las plantas, la cantidad de especies, la funcionalidad y su autosuficiencia, hasta que logre alcanzar las condiciones similares a la que presentaba inicialmente.

#### **2.1.7.2. Recuperación de suelos**

Consiste en el mejoramiento del suelo, mediante la aplicación de técnicas y prácticas conservacionistas de tipo biológico, mecánico o tratamientos integrales, para el uso conservacionista del suelo y aguas contrarrestando su degradación. De manera análoga, la recuperación del suelo está definida mediante el cambio de la salud del suelo dando como resultado su mejora de la capacidad del ecosistema con la cual puede producir cada bien o servicio para las personas beneficiarias. Para la FAO (2021), consiste en la rehabilitación de sus características, químicas, físicas y biológicas del suelo, con tal de que se propicie una elevada interacción entre los elementos que lo integran, con la cual logran obtener algún bien o servicio.

Según Bernal (2018), recuperar el suelo contaminado posee fines de que se logre alcanzar ciertos niveles de aceptabilidad concerniente a la salud y calidad del suelo, esto se entiende como su capacidad del suelo con la cual mantiene las funciones de productividad y de calidad ambiental y favorezca la salud vegetal y animal. Cada método biológico de recuperación del suelo consiste en eliminar, atenuar y otras formaciones de sustancias contaminantes a través de utilizar organismos vivos.

#### **2.1.7.3. Profundidad afectiva**

Según Villasanti y Roman (2013), se refiere a la profundidad hasta donde suele llegar la raíz de la planta en busca de agua y nutrientes. Asimismo, García (2017) argumenta que es el espacio donde la raíz de la planta puede penetrar sin mayor obstáculo, para conseguir el agua y los nutrientes primordiales. Muchas plantas pueden penetrar sus raíces superiores a 100 cm de profundidad en el caso de que haya condiciones edáficas favorables. El suelo tiene que presentar condiciones propicias para que reciba, almacene y haga aprovechable el agua para la planta, a una profundidad de por lo menos un metro. En suelo profundo, la planta resiste mejor la sequía porque a mayor profundidad mejor es la capacidad de retener humedad; de manera similar, las plantas pueden utilizar los nutrientes que se almacenan en cada horizonte del subsuelo, al estar al alcance de la raíz.

#### **2.1.7.4. Compactación del suelo**

Según McKenzie (2010), la compactación del suelo se refiere a la compresión de partículas del suelo en un espacio volumétrico de menor tamaño, generando una reducción del tamaño de espacios con poros que estén dispuestos para el agua y el aire. Gran parte del suelo está compuesto por aproximadamente un 50 % de sólidos (arena, limo, arcilla y materia orgánica) y aproximadamente un 50 % de espacios porosos. La compactación del suelo puede perjudicar la infiltración de agua en el suelo, la emergencia de los cultivos, la penetración de las raíces y la absorción de agua y nutrientes de los cultivos, todo lo cual da como resultado una disminución del rendimiento de los cultivos. Asimismo, esta pérdida del volumen que se produce en una masa de suelo ocasionada por fuerzas externas que actúan sobre él. Bajo situaciones naturales carente de intervención antrópica, la tierra contiene capas con distintos niveles de compactación, pudiéndose explicar debido a las condiciones prevalecientes al formarse y desarrollarse la tierra. Mientras que, bajo condición de una agricultura intensiva, dicho fenómeno suele acelerarse y crear problemas alarmantes para que se desarrolle de la planta cultivada.

#### **2.1.7.5. Infiltración del agua**

El suelo funcional desempeña un rol primordial en abastecer agua limpia y en la resiliencia frente a la inundación y sequía. La infiltración del agua por medio del suelo suele atrapar diversos contaminantes impidiendo que lleguen a filtrarse al agua freática. Asimismo, el suelo suele capturar y almacenar agua, que lo pone disponible para que absorban los cultivos; de esta manera, suele reducir a la menor cantidad de superficie de evaporación y tiende a maximizar la eficacia y productividad en el uso del agua (FAO, 2015). De manera similar, García (2017) indica que el proceso de entrar agua al suelo es conocido como infiltración y la tasa a la cual ésta ingresa es función del tipo de suelo (suelo arenoso posee mayor tasa que el suelo arcilloso), del contenido de agua y su condición física (agregación y estabilidad de agregados). Esta última variable suele tener alta sensibilidad al manejo del suelo, por lo que la tasa de infiltración suele considerarse como indicador de la calidad del suelo.

#### **2.1.7.6. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)**

Según la FAO (2007), la CIC es la cantidad de cargas negativas que se encuentran en la superficie del mineral y componentes orgánicos del suelo (arcilla, sustancias húmicas o materia orgánica) y determina el número de cationes que las superficies retendrían (K, Ca, Na, Mg, NH<sub>4</sub>, entre otros). Estos podrán intercambiarse por otros iones de hidrógeno o cationes existentes en la solución del suelo y se liberan por la raíz. El valor del

CIC suele indicar la habilidad del suelo para que retenga cationes, disponibilidad y cantidad de nutrientes a la planta, su pH potencial entre otras. El suelo al presentar poco CIC refleja la poca habilidad para que retenga nutriente, arenoso o con poco nivel en materia orgánica. Se utiliza como unidad de medida para la CIC el centimoles de carga por kilogramo de suelo (cmol/kg o meq/100 g de suelo). Asimismo, Olivia (2009) argumenta que es la carga eléctrica de las arcillas y materia orgánica del suelo, ésta tiene la posibilidad de ser permanente o depende del valor de pH.

#### **2.1.7.7. Regulación de servicios ecosistémicos**

Son funciones no consuntivas que suelen regular procesos como secuestrar de carbono, moderar eventos climáticos, mejorar la calidad del aire, descontaminar agua servida, reciclar nutrientes, prevenir la erosión, polinizar y realizar el control biológico (Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad [TEEB], 2010). Dichos servicios naturales se obtienen sin que se pasen por etapas de manufactura o transformación (Camargo et al., 2012). Por su elevada importancia de estos servicios naturales para el bienestar de las personas, suele ser determinante que se busquen medios con la cual se conserven y recuperen.

#### **2.1.7.8. Microclima**

Se define al microclima como el clima a pequeña escala de valles, colinas, bosques y campos, así como del entorno físico en un cultivo y grupo de plantas, en razón que las plantas en general influyen de manera importante en la formación del microclima reduciendo la temperatura, incrementando la humedad ambiental o humedad relativa con respecto a áreas que están sin protección arbórea (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia [SENAMHI], s.f.).

Para Rodríguez (2017), es como un conjunto de condiciones, radiación solar y terrestre, temperatura, viento y humedad relativa y precipitación, existente en el espacio externo a pequeña escala que están influenciados por las condiciones climáticas, cobertura vegetal nativa o cultivada y la estación del año.

#### **2.1.7.9. Regulación del microclima**

Son las influencias de los servicios ambientales proporcionados por los ecosistemas, y permiten regular las condiciones ambientales a nivel local como la temperatura y la humedad relativa. Principalmente están influenciados por la vegetación presente en un espacio relativamente pequeño. Por ejemplo, tenemos la regulación de la calidad del aire o el suelo, o control de la inundación y las enfermedades.

El efecto de la vegetación en el microclima es sumamente importante, las plantas cumplen funciones determinadas influyentes sobre el clima local; entre las cuales se tiene que, a través de la evapotranspiración, los árboles y la vegetación en general suelen enfriar el microclima, además de disminuir la temperatura del aire, debido a la reducción de la apertura del cielo van a proporcionar sombreado y reducirán el calentamiento de la superficie por radiación solar; todo esto suele aumentar de manera considerable la sensación de confort de las personas (Martini et al., 2017).

#### **2.1.7.10. Regulación del clima**

La regulación climática a nivel del mundo lo realiza la naturaleza por medio del almacenamiento prolongado del dióxido de carbono en el suelo, los océanos y la biomasa de las plantas. De otra parte, en el largo plazo, de manera paulatina las condiciones climáticas se modifican por el cambio climático, que va afectar más marcadamente a las personas y sus actividades. El cambio climático y el incremento de su variabilidad, viene poniendo en riesgo su bienestar de las personas por aspectos como, posibles olas de calor que se asocia a un clima cambiante, valor extremo de la temperatura persistente en muchos días (probable respuesta al cambio de cobertura y uso del suelo) o desastres hidrometeorológicos que arriesgan el desarrollo y la calidad de vida en las personas; razón por esto, adquirir conocimiento científico del clima viene a ser muy importante para las personas, porque va permitir entre otros, a que se establezcan las áreas se acondicionan a una o más actividades productivas, favoreciendo al desarrollo y crecimiento social y económico del país, incorporando el riesgo climático dentro de sus estrategias nacionales (Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales y Universidad Nacional de Colombia [IDEAM], 2018).

#### **2.1.7.11. Almacenamiento de carbono**

Según Sanz (2013), indica que se encuentra diversos tipos de almacenes subterráneos, como los yacimientos agotados de petróleo o gas, la formación salina profunda y la capa de carbón profunda o no explotable. Esta inyección es realizada en rocas con poros que almacenan a más de 800 m de profundidad y por la presión existente da condiciones para que se almacene el gas en mucho menos volúmenes.

## **2.2. Estado del arte**

### **2.2.1. Internacionales**

Román et al. (2022), en su estudio tuvieron como objetivo evaluar la influencia de distintos sistemas silvopastoriles para generar los servicios ecosistémicos y productivos que se encuentran en el centro experimental y de producción de Salache, Cantón

de Latacunga, provincia de Cotopaxi. Metodológicamente, muestrearon suelos donde se determinaron el pH, la materia orgánica, el K, P asimilable, Mg y Ca, la CIC obtuvieron mediante la suma de todos los cationes intercambiables y aplicaron análisis estadísticos descriptivos mediante ANOVA y Kruskal-Wallis. Como resultado se obtuvo que el sistema *I. edulis* presentó un pH alcalino con un valor de 8,77 y el valor de CIC fue 10,04 meq/100g siendo este el mayor e indicando que ayuda a que se eleve o mantenga la CIC en cada agroecosistema. Asimismo, el contenido de M.O. fue menor de 1,70 % en los sistemas, sin embargo, el sistema con *I. edulis* registró 1,6 % que fue estadísticamente superior a los demás sistemas, y, obtuvo niveles de P soluble igual a 34,6 mg/kg, siendo superior a los demás sistemas. Se concluyó que *I. edulis* contribuyó en mayor medida a que aumenten los nutrientes del suelo.

Según Freitas et al. (2020), su estudio abarcó como objetivo la evaluación del efecto de los árboles de *I. edulis* sobre atributos de calidad del suelo y rendimiento forrajero en un sistema silvopastoril ubicado en Carrancas, Minas Gerais, Brasil. Utilizaron el diseño en bloques completo al azar (DBCA) donde midieron variables como pH del suelo, CIC, M.O. y humedad del suelo a diferentes profundidades. Los resultados mostraron que los árboles de *I. edulis* contribuyeron significativamente a la mejora del pH (aumentó de 4,8 a 5,6), de la CIC (de 6,2 a 10,4 cmolc/kg), y del contenido de materia orgánica (incrementó de 1,8 % al 3,2 %) en el suelo bajo la copa, en comparación con las áreas sin sombra. Además, no se observó disminución del rendimiento forrajero, lo que indica que la presencia de *I. edulis* mejora las condiciones del suelo sin comprometer la productividad del pastizal.

Según Pineda et al. (2017), su estudio se enfocó en cuantificar la producción de biomasa y el aporte de nutrientes de *I. edulis* en sistemas agroforestales con cacao en la provincia de Napo, Ecuador. Utilizaron el diseño completamente al azar (DCA) con parcelas de 20 × 20 m, donde se evaluaron la producción de hojarasca, ramas podadas y raíces finas, además de analizar el nivel de N, K, Mg, Ca y P, en dichos componentes. Los resultados mostraron que *I. edulis* produjo un promedio anual de 5,4 t/ha de hojarasca y 3,2 t/ha de ramas podadas, lo que generó un aporte total de 156 kg/ha/año de N, 24 kg/ha/año de fósforo y 98 kg/ha/año de potasio. Este aporte nutricional favorece la fertilidad del suelo y la sostenibilidad del sistema agroforestal, especialmente en el suelo ácido y de baja productividad natural.

Murillo et al. (2014), en una investigación evaluaron el efecto que tiene aplicar prácticas sostenibles sobre la evolución de las características del suelo, en áreas

degradadas del departamento del Cesar. Metodológicamente, utilizaron el DBCA donde los tratamientos fueron la incorporación del abono verde *Vigna unguiculata* y establecieron cobertura vegetal con gramíneas y Mimosaceae que se asocian a *Clitoria ternatea*, *Bothriochloa pertusa* y *Leucaena leucocephala*; determinaron la textura, la densidad aparente, la velocidad de infiltración, la porosidad, M. O., N total y los elementos menores (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [USDA], 1996). La capacidad de intercambio catiónico se determinó de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias (ICONTEC, 2008). En cuanto a los resultados, se obtuvo un pH neutro, el contenido de fósforo fue medio; mientras que el calcio, magnesio y potasio resultaron de niveles altos, por lo tanto, la capacidad de intercambio catiónico tuvo un valor medio. La densidad aparente tuvo un descenso desde 1,68 g/cm<sup>3</sup> hacia 1,53 g/cm<sup>3</sup> entre 0 a 30 cm de profundidad, la porosidad aumentó desde 33,28 hasta 41,2 %, la velocidad de infiltración varió desde 0,5 mm/h hasta 1,3 mm/h y la M.O. aumentó desde 0,97 % hasta 1,40 %.

Según Kitamura et al. (2008), en un estudio muestran que el uso inadecuado de los suelos induce alteraciones, agotando la productividad y dando como resultado áreas de cultivo de suelo degradado, estudiando alternativas para promover la formación del horizonte A del suelo degradado mediante el uso de abonos verdes, lodos de depuradora y cultivo de especies arbóreas nativas, y, seleccionaron indicadores de calidad del suelo para detectar las alteraciones en la capa superficial. Las evaluaciones se realizaron anualmente donde se evaluaron propiedades como: porosidad, densidad aparente, cationes intercambiables, pH, CIC y macrofauna. Se evaluó la materia seca de los abonos verdes, el diámetro del tallo y altura total de las especies arbóreas. La movilización del suelo o la movilización del suelo más abono verde o lodos de depuradora restauraron las propiedades del suelo, aunque los efectos son similares después de un año. El mejor indicador de la calidad física del suelo es la densidad aparente. Los efectos de los tratamientos sobre la recuperación de la macrofauna del suelo fueron similares. La presencia de larvas y escarabajos fue un indicio de la mejora en la macrofauna del suelo.

El dosel del bosque generalmente modera la temperatura del aire y la humedad relativa por debajo del dosel y, por lo tanto, crea un microclima específico para el crecimiento de las plántulas de árboles. El cambio climático alterará la capacidad de moderación, lo que puede hacer que las condiciones debajo del dosel no sean adecuadas para el reclutamiento de las especies arbóreas hasta ahora dominantes.

Arx et al. (2012) asignaron datos meteorológicos a largo plazo (1997-2010) registrados dentro y fuera de 14 ecosistemas forestales diferentes en Suiza a tres tipos

de bosques (latifoliados, coníferas sin pino, pino), dos niveles altitudinales (bajo, alto), las cuatro estaciones y situaciones climáticas generales (normal, cálido/seco, frío/húmedo) para comparar la capacidad moderadora de cada uno de estos clasificadores. Los resultados confirmaron un efecto moderador general del dosel en el microclima debajo del dosel con una disminución de la temperatura máxima diaria del aire de hasta 5,1 °C (media general: 1,8 °C) y un aumento de la humedad relativa mínima diaria de hasta 12,4% (media general: 5,1%) en el promedio a largo plazo, respectivamente. Los bosques de coníferas latifoliadas y no pinos moderaron el microclima diurno aproximadamente el doble que los bosques de pinos, mientras que durante la noche se registró un enfriamiento considerablemente menor e incluso efectos negativos sobre los niveles de humedad relativa en comparación con el área abierta en los sitios de bosques de pinos. La capacidad de moderación fue más fuerte a baja altitud que a gran altitud. Fue más fuerte durante la temporada de crecimiento, particularmente en verano, y dependió de manera compleja de la situación climática general. Las desviaciones de los patrones generales de condiciones estacionales y climáticas probablemente ocurrieron cuando se agotaron las reservas de humedad del suelo. A pesar de la capacidad de moderación, el microclima por debajo del dosel no se quedó atrás del microclima de áreas abiertas. Concluyeron que el reclutamiento natural en los bosques de pinos y bosques de gran altitud puede responder de manera más sensible al cambio climático.

Ismaeel et al. (2024) realizaron la estimación pantropical de alta resolución de las temperaturas cercanas al suelo (15 cm sobre la superficie) dentro de los bosques. Cuantificaron la variabilidad diurna y estacional, revelando patrones de microclima espaciales y temporales. Se encontró que, las temperaturas cercanas al sotobosque son 1,6 °C más frías que las temperaturas al aire libre. El rango de temperatura diurna es 1,7 °C más bajo dentro de los bosques, en comparación con las condiciones al aire libre. Más importante aún, demostraron una variabilidad espacial sustancial en las características microclimáticas de los bosques tropicales. Esta variabilidad está regulada por una combinación de condiciones climáticas a gran escala, estructura de la vegetación y topografía, y por lo tanto, no podría ser capturada por las cuadrículas macroclimáticas existentes. En tal sentido, los resultados contribuyen a cuantificar los rangos térmicos reales experimentados por los organismos dentro de los bosques tropicales y proporcionan nuevos conocimientos sobre cómo estos límites pueden ser afectados por el cambio de clima y las perturbaciones de los ecosistemas.

### **2.2.2. Nacionales**

Según Java (2024), su estudio consideró el objetivo de evaluar el carbono que almacena el suelo y la necromasa de árboles de *I. edulis* de 2, 5 y 6 años de edad, en un

varillal seco ubicado en Nina Rumi, Loreto. Utilizó un DCA donde distribuyó tres tratamientos, en los que se midió la biomasa de la necromasa con ayuda de bolsas de recolección en áreas de 1 m<sup>2</sup>, mientras que el carbono orgánico del suelo fue estimado a través del método de Walkley y Black. Los resultados mostraron que árboles con 2 años obtuvieron más necromasa con 7,47 t/ha/año, mientras que el carbono orgánico del suelo fue 20,418 t/ha, observándose significancia estadística entre las dos variables; concluyéndose que *I. edulis* tiene un alto potencial para capturar carbono y generar materia orgánica.

Según Silva y Olaya (2019), su estudio tuvo como objetivo determinar el carbono que se almacena en el sistema *Coffea arabica* (café) variedad Catimor en asocio a *I. edulis* en el distrito Jaén, Cajamarca. Metodológicamente, muestrearon de manera aleatoria transectos de *C. arabica* con *I. edulis* donde midieron el diámetro, luego utilizaron modelos alométricos para determinar la biomasa; estimaron el carbono que se almacena en las hojarasca (necromasa) prosiguiendo la metodología del Centro Internacional de Investigación en Agroforestería (ICRAF 2009), y cuantificaron el carbono del suelo en base a metodologías empeladas por Gelman et al. (2011) y Díaz (2015) que prosiguen el método de Walkley Black dentro del laboratorio Oikoslab S.A.C. Como resultados, se encontró que el carbono almacenado del sistema agroforestal se distribuyó en 22,80 tC/ha para la biomasa aérea, 6,34 tC/ha para la hojarasca y 104,13 tC/ha en el suelo, obteniendo en total 133,27 tC/ha que se almacenó en dicho sistema agroforestal.

Castillo y Ñique (2019) en su estudio evaluaron la macrofauna edáfica como indicador biológico del estado de conservación del suelo en sistemas agroforestales en el sector El Choclino, San Martín. Se compararon los sistemas agroforestales: uno tradicional y otro nativo, ambos con presencia de *I. edulis*. Se utilizó la metodología TSBF para el muestreo de macrofauna, realizando análisis taxonómicos y ecológicos. Los resultados indicaron que el sistema agroforestal nativo obtuvo mayor densidad y biomasa de macrofauna, destacando la presencia de lombrices como grupo dominante. La biomasa promedio de lombrices en el sistema nativo fue de 98,5 g/m<sup>2</sup>, mientras que en el sistema tradicional fue de 65,2 g/m<sup>2</sup>. Estos datos sugieren que los sistemas agroforestales con *I. edulis* favorecen la recuperación biológica del suelo, aumentando la abundancia y biomasa de lombrices, lo que mejora la calidad y fertilidad del suelo.

Según Chávez (2018), su estudio prosiguió como objetivo determinar la distribución y biomasa de raíces finas de *I. edulis* y *T. cacao* en un sistema agroforestal orgánico en Corvina, Huánuco. La metodología incluyó el uso de monolitos de suelo para extraer raíces finas y analizar su longitud y biomasa por hectárea. Se encontró que *I. edulis*

presentó una longitud de raíces finas de 22,025 km/ha y una biomasa de 2,960 kg/ha, lo que representa una importante fuente de aporte de materia orgánica al suelo, favoreciendo su fertilidad y estructura.

Rueda (2014), en su estudio consideró evaluar el carbono aéreo de *I. edulis* en el distrito de Campo Verde, Ucayali. Metodológicamente estimó la biomasa de la parte aérea conformados por el tallo, ramas y hojas de cada individuo de la muestra conformada por 144 plantas distribuidas en estratos. Aplicó el muestreo destructivo donde el árbol fueron seccionados en componentes luego se pesó y extrajo submuestras que se llevaron a laboratorio donde se les secó al horno, con el contenido de humedad de cada submuestra llegó a estimar la biomasa por componentes, luego se sumó obteniendo la biomasa total por árbol. Con dichos datos elaboró un modelo alométrico de crecimiento para que se estime la biomasa aérea de *I. edulis* siendo de la forma:  $\text{LnPT} = -1,289 + 0,032 \text{ DAC}^2 - 0,002 \text{ DAC}^3 + 1,131 \text{ LnDAC}$  siendo dicha ecuación empleada para estimar la biomasa aérea de toda la plantación. Entre los resultados, en el año 2011 se estimó un total de la biomasa aérea igual a 6 180,21 t para dicha plantación, lo que equivale a un total de CO<sub>2</sub> que se almacena igual a los 11 330,38 tCO<sub>2</sub>. Además, la variable con mayor fuerza de correlación a la biomasa aérea de *I. edulis* fue el diámetro altura cuello de la base (DAC).

Villagaray (2014), tiene por objetivo en su investigación determinar el grado de recuperación de suelos degradados por efecto de la plantación del *Ochroma pyramidale* (paloto), *Pueraria phaseoloides* (kudzú), *Desmodium ovalifolium* (desmodium) en terrenos *Pteridium aquilinum* (alpillo) de una parcela demostrativa en Pichari Alta. En su metodología utilizó la tecnología agroforestal de árboles en asocio a pastos, inició estableciendo *O. pyramidale* seguido de forma secuencial *P. phaseoloides* y *D. ovalifolium* en una parcela que predominaba *P. aquilinum*, donde como antecedente del terreno se había cultivado *E. coca*. Los resultados muestran *O. pyramidale* en asocio a *P. phaseoloides* y *D. ovalifolium* tienden a recuperar aceleradamente el suelo sin utilizar productos químicos, de acuerdo con el análisis de las muestras del suelo, hubo incremento del pH desde 5,2 hasta 6,13, la textura fue franco arcilloso y el potasio también se incrementó en dicho suelo. El nivel del nitrógeno muy probablemente se encontraba incorporado por la materia viva de los árboles y herbáceas establecidas, de manera similar ocurrió con el fósforo, así pues, se pudo observar que el aumento de la materia orgánica mejoró el pH del suelo.

Según Lojka et al. (2012), el estudio tuvo como finalidad evaluar el uso de la especie amazónica *I. edulis* en la regeneración del suelo y el control de malezas en sistemas agroforestales en Ucayali, Perú. Se instalaron parcelas experimentales en suelos

degradados, comparando parcelas con *I. edulis* con parcelas sin cobertura arbórea. Utilizó un DBCA y evaluaron variables como la biomasa aérea de malezas, el nivel de materia orgánica, la densidad aparente, el contenido de nitrógeno total y el grado de cobertura vegetal. Los resultados demuestran que *I. edulis* redujo la biomasa de malezas en un 60 %, gracias al sombreado proporcionado por su denso follaje. Asimismo, el nivel de materia orgánica aumentó de 2,3 % a 4,1 % después de tres años, mientras que la concentración de nitrógeno total se incrementó de 0,12 % a 0,24 %. También se observó una mejora en la estructura del suelo, reduciéndose la densidad aparente de 1,44 g/cm<sup>3</sup> a 1,28 g/cm<sup>3</sup>. Estos resultados indican que *I. edulis* tiene un efecto restaurador significativo sobre el suelo degradado, favoreciendo la fertilidad, estructura y salud del suelo, además de reducir la competencia de malezas.

### 2.2.3. Locales

Según Guerra et al. (2022), en un estudio tuvieron como objetivo determinar el efecto de sembrar *I. edulis* con 2, 4 y 6 años sobre el aporte de macronutrientes N, P, K, en el suelo degradado ex cocal y su valoración económica. Metodológicamente, el nivel de investigación fue explicativo y se estableció el DBCA. Como resultado se muestra el suelo con *I. edulis* de 2 años presenta de 53,27 % hasta 59,30 % de base cambiante, y de 40,70 % hasta 46,73 % para la acidez cambiante y de 37,63 % hasta 43,78 % para la saturación de aluminio. El suelo con 4 años presenta de 74,14 % a 83,39 % para la base cambiante, y de 16,61 % hasta 25,86 % para la acidez cambiante donde la saturación de aluminio varió del 14,95 % al 25,20 % que se traduce en la existencia entre moderado y alto nivel de aluminio disponible, además hubo fosfatos de hierro, aluminio y fosfato de manganeso. Asimismo, el suelo con 6 años presenta pH de 5,63 hasta 6,11 que es ligeramente ácido donde el suelo es productivo, porque en dichos lotes el fósforo, nitrógeno, magnesio, potasio, azufre y calcio presentan disponibilidad baja a mediana para que se realicen labores agronómicas. Concluyeron que, se tiene que dar más importancia a *I. edulis* pudiendo ser empleado en recupera el suelo degradado ex cocal.

Según Pérez (2022), su estudio tuvo como objetivo evaluar la captura de carbono aéreo en plantaciones de *I. edulis* en suelo de ex cocal en Tingo María. Se evaluaron las plantaciones de diferentes edades: 2, 4 y 6 años. La metodología utilizada fue la propuesta por el Centro Internacional de Investigación en Agroforestería (ICRAF, 2002), que permite estimar el carbono aéreo total almacenado en troncos, ramas y hojas. Los resultados mostraron una tendencia al aumento del carbono almacenado con la edad de la plantación. Específicamente, la plantación con 2 años almacenó en promedio 11,5 tC/ha, las de 4 años 23,7 tC/ha, y las de 6 años 35,2 tC/ha. Estos resultados indican que *I. edulis* tiene un potencial

significativo para la capturar carbono en el suelo previamente utilizado para el cultivo de *E. coca*, contribuyendo así a la recuperación ambiental de estas áreas degradadas.

Según Calixto (2018), en su estudio tuvo como objetivo determinar el aporte de *I. edulis* a la fertilidad del suelo degradado por el cultivo de *E. coca* en el Caserío Buenos Aires del distrito de Rupa Rupa. Metodológicamente, se muestreó el suelo entre los 0 a 30 cm de 30 a 50 cm de profundidad al inicio y al culminar el estudio, las mismas que se dividieron en las zonas A, B y C basadas en la topografía del terreno, obtuvo muestras simples y compuestas con la cual se determinó su fertilidad química como la M.O., pH, P, K, bases totales (Ca + Mg + K) y CIC del suelo. Como resultado se obtuvo que *I. edulis* suele aportar a la fertilidad del suelo, esto fue evidenciado al incrementar la M.O. de baja a alta, potasio, bases totales, CICE y el pH permanecieron constantes.

Vásquez (2015), en su estudio tuvo como objetivo estimar el contenido del carbono aéreo que almacena el sistema agroforestal de *Theobroma cacao* (cacao) con *I. edulis* y el suelo en Tulumayo de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Metodológicamente se realizó un muestreo aleatorio donde estableció 1 cuadrante de 50 m x 20 m prosiguiendo lo detallado por el Grupo GAMMA (Ibrahim et al., 2003), recolectó los datos para calcular el carbono aéreo prosiguiendo la recomendación del Centro Internacional de Investigación en Agroforestería (ICRAF, 2009) y el carbono aéreo total lo obtuvo sumando lo determinado en los árboles, las herbáceas y las hojarascas (Arévalo et al. (2003). El resultado obtenido resalta que, en carbono aéreo capturado fue 51,1 t/ha, de los cuales en la parte arbórea hubo 34,90 t/ha, en las herbáceas encontró 6,41 t/ha y las hojarascas hubo 9,80 t/ha; y en el caso del suelo se determinó una media de 24,4 t/ha de carbono, siendo distribuido en las raíces de árboles una media de 6,59 tC/ha, en la raíz de herbáceas fue 0,00059 tC/ha y el carbono orgánico del suelo fue 17,77 t/ha. Concluyó que, el sistema *T. cacao* con *I. edulis* contiene más carbono aéreo almacenado (68%) en comparación a lo encontrado en el suelo (32%), resultados que no lo consideran en los distintos proyectos vinculados al servicio ambiental de la captura de carbono.

Vargas y Valdivia (2005), en un estudio mencionan que la Mimosaceae *Centrosema macrocarpum*, *Pueraria phaseoloides* y *Arachis pintoi*, luego de tres años cambiaron la textura del suelo de pesada a media, el pH de fuertemente ácido pasó a medianamente ácido, la M.O. disminuyó ya que *A. pintoi* tuvo menor aporte muy parecido al testigo; el P cambió desde el nivel bajo a normal y el K desde bajo hasta un nivel medio. La diversidad de familias de macroinvertebrados cambió desde 7 hasta 23, y la abundancia de

individuos de 37 mill/ha hasta 58 mill/ha, la especie *C. macrocarpum* llegó incorporar al suelo 1,6 t/ha/año de materia seca aproximadamente, mientras que *A. pintoi* fue 0,49 t/ha/año y *P. phaseoloides* aportó 1,30 t/ha/año, aunque registró la cobertura del 99,40%, en cambio *A. pintoi* solamente coberturó un 75,60%.

Oré et al. (2022) evaluaron la temperatura del suelo y encontraron que mientras un medio se encuentra menos intervenido la humedad es más baja, tal es el caso de que un sistema agroforestal con 10 años de establecido posee 26,20 °C, la parcela con cultivo de *E. coca* cuya edad fue ocho años de establecido presentó ligera superioridad de la temperatura edáfica con 26,50 °C, mientras que en ese mismo periodo de tiempo al entrar en un bosque secundario con 15 años de edad se registró solamente en promedio una temperatura de 23,20 °C.

Alegría (2021) buscó determinar comparativamente el carbono incorporado y almacenado en el suelo, de un sistema agroforestal con cultivo de *I. edulis* sembrada en alta densidad con el cultivo de cacao en el suelo degradado ex cocal en Ricardo Palma – Tingo María, consideró comparar cultivos con diferentes edades desde la siembra: 6, 2 y 4 años. Entre los resultados, el carbono del suelo fue superior en el T<sub>1</sub> (suelo degradado ex cocal con siembra de *I. edulis* y *T. cacao* de 02 años), el T<sub>2</sub> (suelo degradado ex cocal con siembra de *I. edulis* y *T. cacao* de 4 años) y T<sub>3</sub> (suelo degradado ex cocal con siembra de *I. edulis* y *T. cacao* de 6 años) con promedio de 36,95, 46,16 y 40,98 t/ha respectivamente. En el caso del carbono en la hojarasca fue superior en el T<sub>3</sub> y T<sub>2</sub> con promedios de 11,57 y 11,07 t/ha, respectivamente, y al comparar el carbono de las raíces, mayor promedio se encontró en el T<sub>3</sub> dando un valor de 7,21 t/ha.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

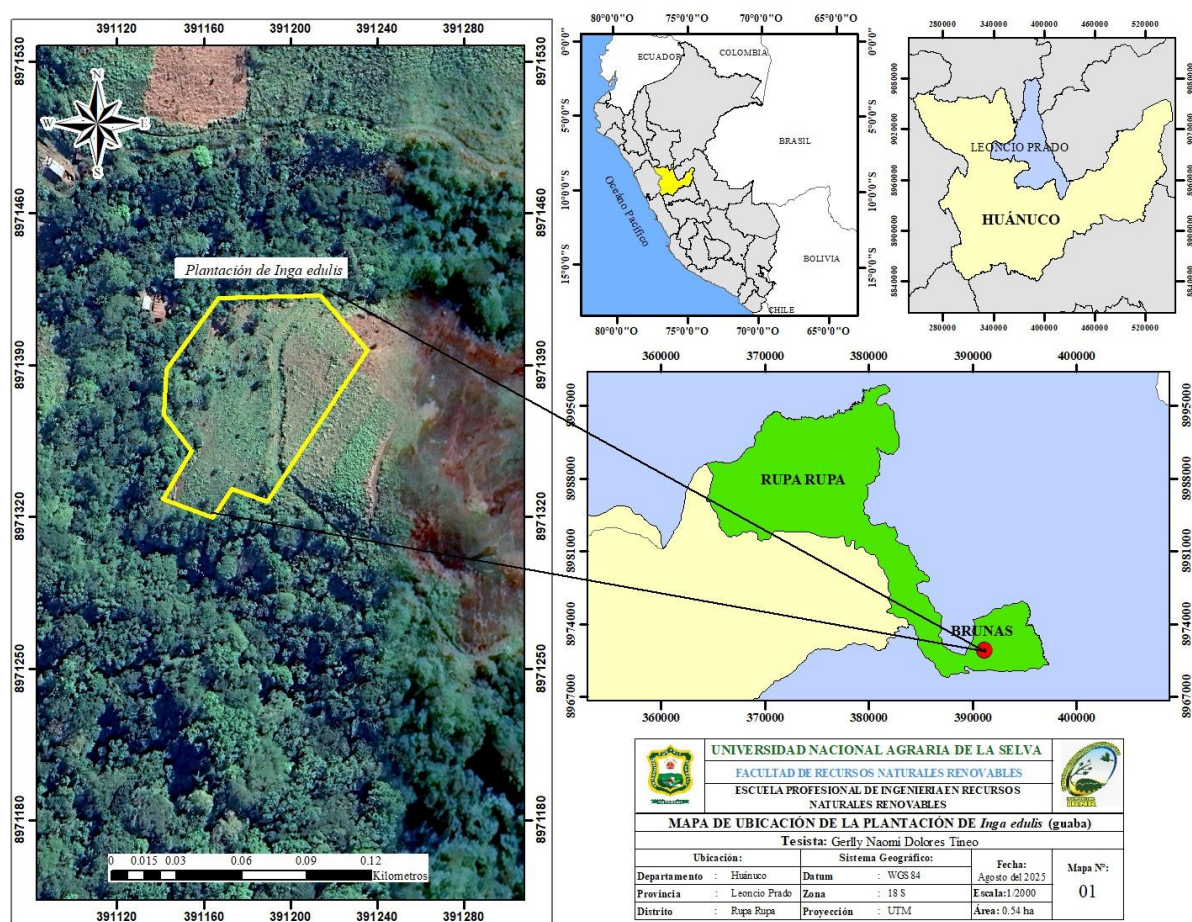
#### 3.1. Lugar de ejecución

##### 3.1.1. Ubicación geográfica

La presente investigación se realizó en la plantación de *I. edulis* que se encuentra establecida en áreas correspondientes al Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS) en una extensión 0,54 hectáreas. El área se sitúa geográficamente en las siguientes coordenadas UTM: 391172 m Este y 8971408 m Norte, con altitud de 812 m s.n.m.

##### 3.1.2. Ubicación política

El área de estudio que forma parte de BRUNAS se localiza a una distancia de 1,5 km desde la ciudad de Tingo María, a la margen izquierda del tramo Tingo María – Lima de la carretera Fernando Belaúnde Terry, políticamente está circunscrito en el distrito Rupa Rupa, provincia Leoncio Prado de la región Huánuco (**Figura 1**).



**Figura 1.** Ubicación política del área de estudio – BRUNAS.

### 3.1.3. Características climáticas

El análisis climático de los datos recopilados en la estación Tingo María por parte del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) durante el año 2024 muestra un patrón cálido y húmedo característico de la selva alta peruana. Las temperaturas se mantuvieron relativamente estables, con medias que oscilaron entre 25,5 °C en julio y 27,4 °C en octubre, reflejando la ausencia de estaciones extremas. Las temperaturas máximas alcanzaron valores de hasta 33,3 °C en setiembre y octubre, mientras que las mínimas descendieron a 20,2 °C en julio y agosto, meses considerados como el periodo más fresco. La humedad relativa se mantuvo elevada todo el año, variando entre 71,8 % y 85,6 %, lo que evidencia un ambiente constantemente húmedo que influye en la sensación térmica y en las condiciones de vida de esta parte del Perú.

En cuanto a la precipitación, se registró un acumulado anual de 3 279,3 mm, lo que confirma el carácter lluvioso de la zona. Se identificaron dos periodos bien definidos: uno de abundantes lluvias, concentrado entre diciembre y marzo, con máximas de 618,4 mm en enero y 543,9 mm en diciembre, y otro más seco, entre junio y setiembre, con mínimas de 42,4 mm en setiembre y 74,1 mm en agosto (SENAMHI, 2024).

### 3.1.4. Zona de vida

Desde una perspectiva ecológica, y siguiendo la clasificación mundial de zonas de vida o formaciones vegetales propuesta por Holdridge (1987), el BRUNAS se ubica dentro de la formación denominada bosque muy húmedo Premontano Tropical (bmh-PT). Esta categoría corresponde a ecosistemas que presentan elevados niveles de humedad, temperaturas cálidas y una marcada diversidad biológica, características propias de la selva alta peruana. Asimismo, en el marco de la regionalización natural del Perú planteada por Pulgar Vidal (1987), esta área se identifica con la región Rupa Rupa o Selva Alta, que se extiende en la vertiente oriental andina.

### 3.1.5. Antecedentes de la plantación

La plantación de *I. edulis* fue establecida en el suelo degradado del BRUNAS en enero de 2023 por estudiantes de las asignaturas de Recursos Naturales y Economía de los Recursos Naturales, bajo la supervisión del Dr. Ytavclerh Vargas Clemente, docente del Departamento Académico de Ciencia de los Recursos Naturales. El distanciamiento utilizado en la plantación fue de tres metros entre plantas y cuatro metros entre filas. El área se localiza en terrenos de ladera con pendientes que superan los 35° de inclinación. Es importante señalar que en este suelo, hasta hace aproximadamente 25 años, se cultivaba *E. coca* lo que ocasionó la pérdida de sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

Actualmente, como evidencia de la degradación, predomina la cobertura de gramíneas como *Paspalum notatum* (cashucsha) y *Anatherum bicornis* (rabo de zorro), así como del helecho *Pteridium aquilinum*, conocido localmente como macorilla.

### **3.2. Material y métodos**

#### **3.2.1. Materiales y equipos**

Para el estudio se tuvo como material biológico el sistema de plantación de *I. edulis* con una edad de 12 meses desde su establecimiento, donde se evaluó su efecto sobre las variables dependientes.

Para las mediciones de los indicadores previstos para el estudio, se utilizaron instrumentos y materiales como: el vernier digital, mira topográfica telescópica, cinta métrica de 50 metros, wincha de 5 metros, muestreador de suelo, martillo de goma, flotador graduado, cruceta de conducción de esfuerzos, nivel, penetrómetro de suelo de bolsillo, bandejas de plástico, frascos de vidrio pequeño, balanza romana colgante, bastidores de madera, cilindro Uhland, regla de metal, tamices, formularios para el registro de evaluaciones, libreta de campo, y bolsas de polietileno.

Como equipos se utilizó estufa eléctrica, balanza gramera, Datalogger de temperatura y humedad marca Elitech RC 51H, infiltrómetro de doble anillo, medidor de pH y temperatura del suelo marca ECYmeter AMT-300, GPS marca Garmin modelo Map. 60 csx, equipo celular y laptop para el procesamiento de los datos en Excel.

#### **3.2.2. Metodología**

##### **3.2.2.1. Evaluación de la recuperación de los suelos a través de sus características físicas, químicas y biológicas del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva**

###### **– Características físicas y químicas**

Para la determinación de las características físicas y químicas del suelo, la toma de muestras se realizó en dos momentos. La primera evaluación se realizó en el mes de enero (15 de enero) del año 2024 y la segunda el 15 de enero del 2025. Ambas muestras del suelo fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, considerando los indicadores o parámetros consignados por Zamudio et al. (2006), los que se precisan seguidamente, a excepción de la infiltración del agua cuya prueba se realizó directamente en el campo.

La textura (%) se determinó por el método de Bouyoucos, para ello se realizó un muestreo de suelo sistemático en zigzag el cual consistió en medir líneas cruzadas de 30 metros desde cada punto seleccionado de muestreo. Se obtuvo en total 7

puntos en toda la plantación de *I. edulis*. Con un barreno de suelo se extrajo las muestras de cada punto, se homogenizó y fue llevado al laboratorio para su análisis.

La profundidad efectiva del suelo (m) se determinó conforme a la "Guía de clasificación de parámetros edáficos" establecida en el Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor del Ministerio de Agricultura (D.S. N° 017-2009-AG). Para ello, en puntos representativos de la plantación de *I. edulis*, se realizó una calicata (excavación vertical) permitiendo la observación directa del perfil edáfico. Una vez expuesto, se midió con una mira topográfica la profundidad a la cual las raíces pueden penetrar sin impedimentos significativos como roca dura, capas endurecidas o un nivel freático elevado. Finalmente, la medida registrada se utilizó para clasificar el suelo según los criterios de profundidad efectiva detallados en la **Tabla 1**.

**Tabla 1.** Clases del suelo de acuerdo a la profundidad efectiva.

<b>Profundidad efectiva</b>	<b>Clases</b>
Menor a los 25 cm	Muy superficial
Desde 25 cm hasta 50 cm	Superficial
Desde 50 cm hasta 100 cm	Moderadamente profundo
Desde 100 cm hasta 150 cm	Profundo
Mayor a los 150 cm	Muy profundo

Fuente: Ministerio de Agricultura. D. S. N° 017-2009-AG. Reglamento de clasificación de Tierras.

La compactación del suelo ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) se evaluó en los siete puntos de muestreo distribuidos en zigzag utilizando un penetrómetro de bolsillo, se insertó el instrumento perpendicularmente con presión lenta y se registró la lectura máxima. En cada punto se realizó cuatro mediciones, se calculó el promedio y se registró.

La infiltración del agua ( $\text{cm}/\text{h}$ ) se llevó a cabo mediante el proceso propuesto por García (2017), debido que se encontraba el terreno con pendiente, se realizó la nivelación con la ayuda de una pala, en donde se puso el cilindro sobre el suelo luego se procedió a presionando empleando un martillo de goma con la cual se le golpeaba a la cruceta de conducción de esfuerzos hasta que quede nivelado llegando hasta que haya profundizado unos 10 cm, luego se cubrió el suelo dentro del cilindro con un plástico. Seguidamente se ha tenido que echar suavemente el agua dentro del cilindro hasta casi llenarlo, y se anotó el valor hasta el nivel que alcanzó. Se le quitó el plástico y anotó la dimensión que se infiltraba el agua por periodos de cuatro minutos; en el caso que descendía

el volumen con rapidez, se procedió a volver a llenar el agua al que se le denominó medida de carga y continuar con las anotaciones de las lecturas por cada cuatro minutos, esta labor fue realizada hasta que se estabilizó la infiltración que por lo general ocurrió entre los 36 minutos.



**Figura 2.** Proceso de la evaluación de infiltración del agua en la plantación de *I. edulis*.

Se repitió el mismo procedimiento en otros dos sitios para realizar las comparaciones de las diferencias en la velocidad de infiltración entre sitios, pero en las mismas condiciones de pendiente y suelo. Se realizó las anotaciones de los datos generados en una ficha de registro de datos.

Para las características fisicoquímicas como textura, humedad de suelo, densidad aparente, porosidad, pH, los macroelementos (N, P y K), capacidad de intercambio catiónico y la materia orgánica, las muestras del suelo de ambas evaluaciones se llevaron al laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, donde se calculó los valores respectivos. Además, para la interpretación, se describió teniendo como base la propuesta por el Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología, y Universidad Nacional Agraria de la Selva (LASAE y UNAS, 2024), siendo estos las siguientes:

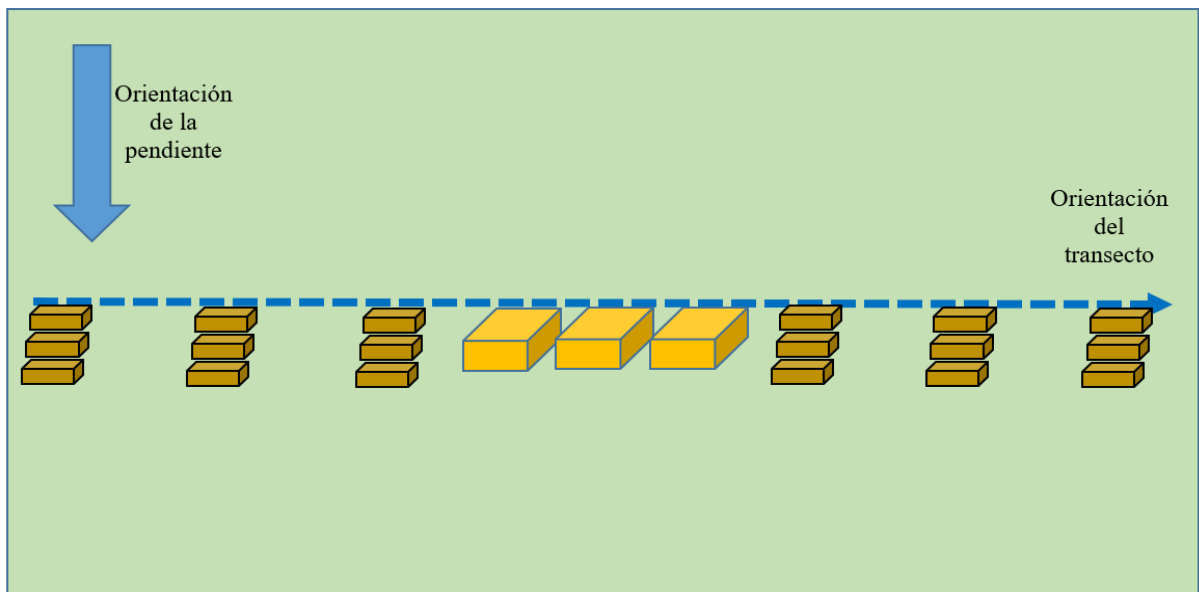
- Para el pH:
  - ✓ Extremadamente ácido, menor a 4,0.
  - ✓ Fuertemente ácido, entre 4,0 a 4,9.

- ✓ Medianamente ácido, entre 5,0 a 5,9.
  - ✓ Ligeramente ácido, entre 6,0 a 6,9.
  - ✓ Neutro, 7,0
  - ✓ Ligeramente alcalino, entre 7,1 a 8,0.
  - ✓ Mediana alcalino, entre 8,1 a 9,0.
  - ✓ Fuertemente alcalino, entre 9,1 a 10,0.
  - ✓ Extremadamente alcalino, mayor a 10,0.
- Para la materia orgánica:
    - ✓ Bajo, menor al 2%
    - ✓ Medio, entre 2% hasta 4%
    - ✓ Alto, mayor al 4%
  - Para el nitrógeno total:
    - ✓ Bajo, menor a 0,1%
    - ✓ Medio, entre 0,1% hasta 0,2%
    - ✓ Alto, mayor a 0,2%
  - Para el fósforo disponible:
    - ✓ Bajo, menor a 7 ppm
    - ✓ Medio, entre 7 ppm hasta los 14 ppm
    - ✓ Alto, mayor a 14 ppm
  - Para el potasio disponible:
    - ✓ Bajo, menor a 100 ppm
    - ✓ Medio, entre 100 ppm hasta los 240 ppm
    - ✓ Alto, mayor a 240 ppm

– **Características biológicas**

Se tomó como indicador de macrofauna solamente a *Lumbricus terrestris* (lombriz de tierra) y se realizó mediante el protocolo del método de monolito de suelo TSBF para evaluar abundancia y la biomasa de *L. terrestris* en ecosistemas tropicales (Anderson & Ingram, 1993). La unidad de muestreo fue un monolito de suelo de 25 x 25 cm y de 30 cm de profundidad, los monolitos se distribuyeron a lo largo de un transecto corto (60 m), se consideró seis monolitos en el área de estudio (**Figura 3**). En cada punto de muestreo se extrajo un pequeño monolito de 25 x 25 x 30 cm que se rebanó en tres capas: 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm.

Luego se depositó la tierra en charolas de plástico y seguidamente se procedió a la separación manualmente, la *L. terrestris* se colectaron y fueron almacenados en una solución de formol al 4 % para ser contados y pesados. De igual manera, el muestreo se realizó en la segunda evaluación de la investigación (enero 2025), a razón que la *L. terrestris* es más activas en estas condiciones y temporadas con mayores precipitaciones según refieren Tondoh & Lavelle (2005).



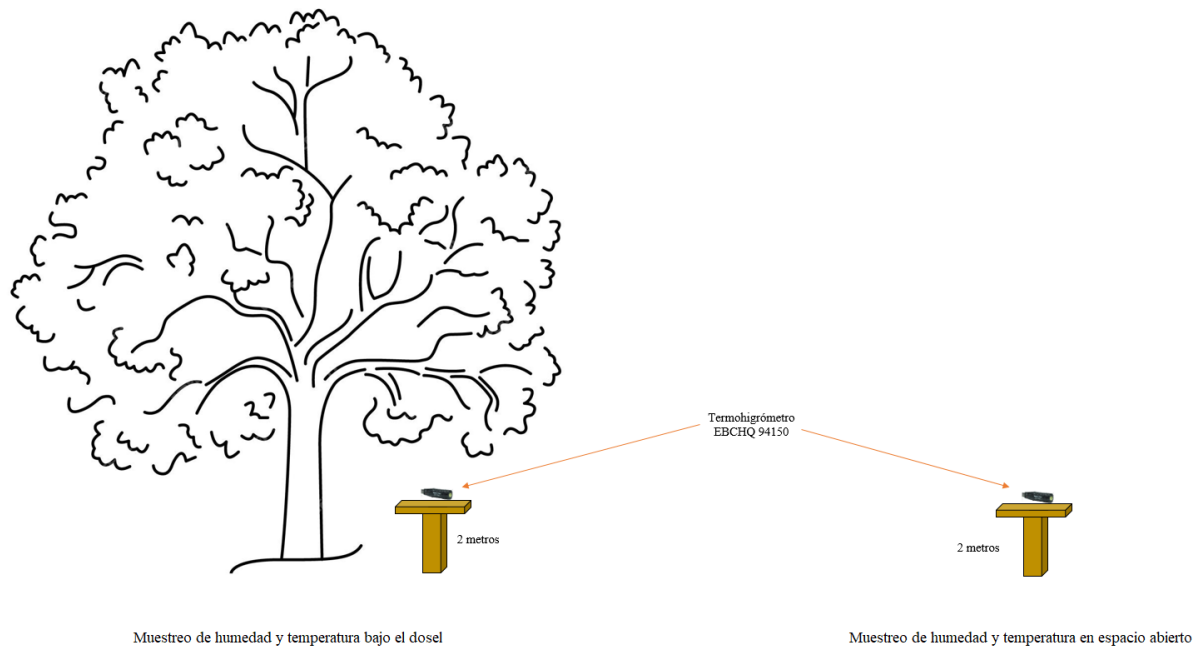
Adaptado de Anderson & Ingram (1993).

**Figura 3.** Esquema para el muestreo sistemático en la recolección de *L. terrestris*.

De manera adicional, con fines de ratificar los datos determinados mediante los monolitos pequeños, se procedió a extraer tres grandes monolitos cuyas dimensiones fueron de 50 x 50 cm y con 20 cm de profundidad teniendo en consideración la superficie del suelo, estas muestras se ubicaron en intervalos de distancias igual a 5 m distribuidos a lo largo del mismo transecto donde se muestrearon los monolitos de menores dimensiones, este transecto tuvo como su origen de partida un punto elegido de manera aleatoria direccionado perpendicularmente a la pendiente del terreno (TSBF modificado, Anderson & Ingram, 1993), los puntos de muestreo fueron sistemáticos enmarcados en el transecto lineal de 60 m. Los monolitos adicionales (**Figura 3**) se extrajeron para que se pueda considerar la heterogeneidad en la plantación. Los monolitos mayores fueron separados entre las capas de 0 a 10 cm y desde los 10 a 20 cm, siendo distintos a los monolitos pequeños, debido a que la mayor cantidad de especímenes (57 % hasta 99%) se localizan entre 0 a 20 cm el muestrear en temporada lluviosa (Tondoh & Lavelle, 2005).

### 3.2.2.2. Determinación de la regulación del microclima generado por la sombra de una plantación de *I. edulis* establecida en un suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva

De manera específica, como indicadores del microclima se evaluó el comportamiento de la temperatura ambiental del aire ( $T$  °C) y la humedad relativa (%) registradas bajo la cobertura de *I. edulis* y en un espacio abierto, que no presentó ningún tipo de cobertura sea arbustiva y/o arbórea. Para medir la temperatura y humedad relativa bajo el dosel de *I. edulis* y un espacio abierto, se utilizó un equipo Datalogger de Humedad y Temperatura marca Elitech RC 51H para cada condición. Para el primer caso fue ubicado el dispositivo bajo la copa de una planta de *I. edulis* elegido al azar a una altura de dos metros y para el segundo caso considerando un espacio sin cobertura en un radio de 25 m contiguo a la plantación de *I. edulis*, se ubicó también el dispositivo a una altura de 2 m.



**Figura 4.** Esquema para el muestreo de temperatura y humedad como servicio de regulación del microclima.

En cuanto al registro de los datos fue realizado de manera continua durante un año completo, desde enero de 2024 hasta enero de 2025. Ambos equipos fueron programados para el registro automático de la temperatura y la humedad relativa cada hora del día durante este período. La descarga de los datos acumulados en los dispositivos se realizó mensualmente para su procesamiento. Los resultados obtenidos fueron comparados

con los registros de la Estación Meteorológica del SENAMHI, ubicada en el campus universitario.

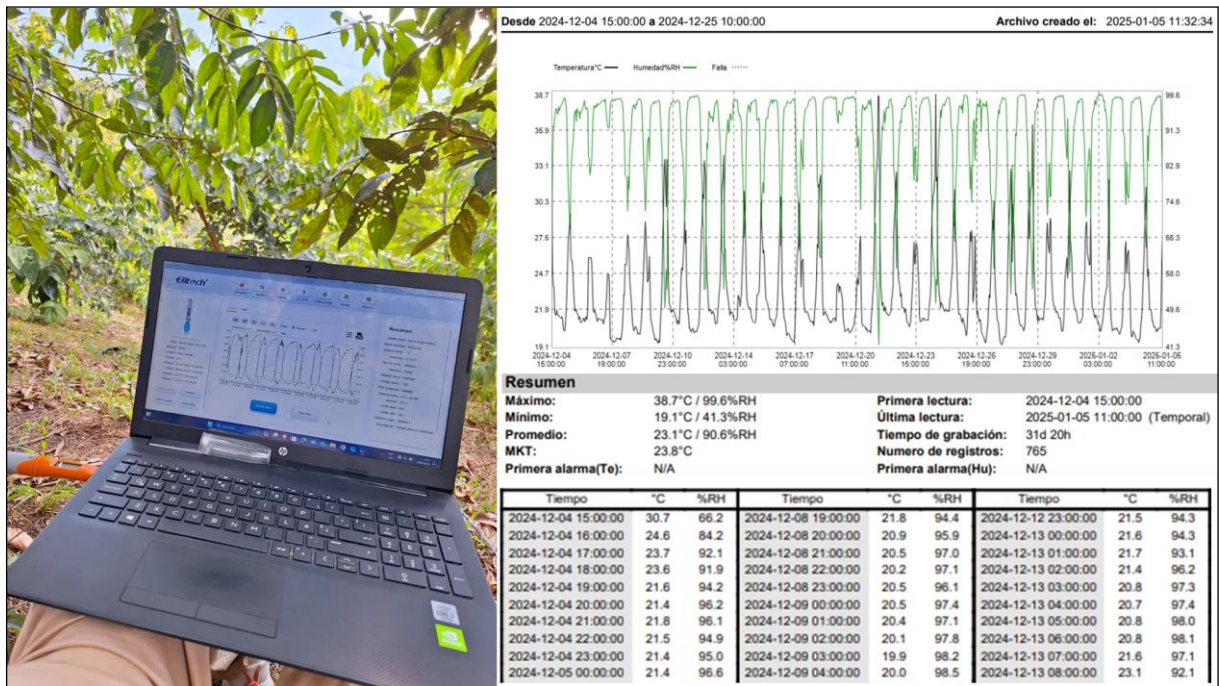


Figura 5. Registro y descarga de datos de temperatura y humedad relativa.

### 3.2.2.3. Captura de carbono en una plantación de *I. edulis* establecida en suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva

La recolección de datos se realizó anualmente, para ello, la primera evaluación se ejecutó el mes de enero del 2024, información que constituyó la línea base para determinar el comportamiento de la captura de carbono atmosférico al año de iniciado la investigación en campo (enero del 2025).

#### – Carbono sobre el suelo (t/ha)

**Carbono en la biomasa de los árboles de *I. edulis*.** Para la estimación de la captura de carbono en todas las plantas de la especie en mención, se realizó la medición del diámetro del tallo de todas las plantas de *I. edulis* a 10 cm del suelo, luego fue sometido al modelo siguiente:

$$\text{Log}_{10} \text{ biomasa} = -0,889 + 2,317(\text{log}_{10}(\text{dbh}))$$

Donde:

db = diámetro de la base

h = altura total

Posteriormente se registró resultados con signos negativos en algunas plantas que presentaban menores valores del diámetro de tallo, razón por la cual se optó por determinar la biomasa de plantas con distintas dimensiones de diámetro y la altura total, a los mismos que se les seleccionó, cortó y se pesó cada componente para que posteriormente las submuestras fueran llevadas al laboratorio con el fin de conocer el peso seco y estimar su biomasa de cada planta, luego con estos datos se elaboró un modelo alométrico preliminar donde el coeficiente de determinación alcanzado fue 0,9886 y el modelo matemático obtuvo la forma de:

$$\text{Biomasa (kg/planta)} = -0,0513 \cdot \text{Ht}^4 + 0,5512 \cdot \text{Ht}^3 - 1,0658 \cdot \text{Ht}^2 + 1,3154 \cdot \text{Ht} - 0,3062$$

Siendo:

Ht: Altura total en metros

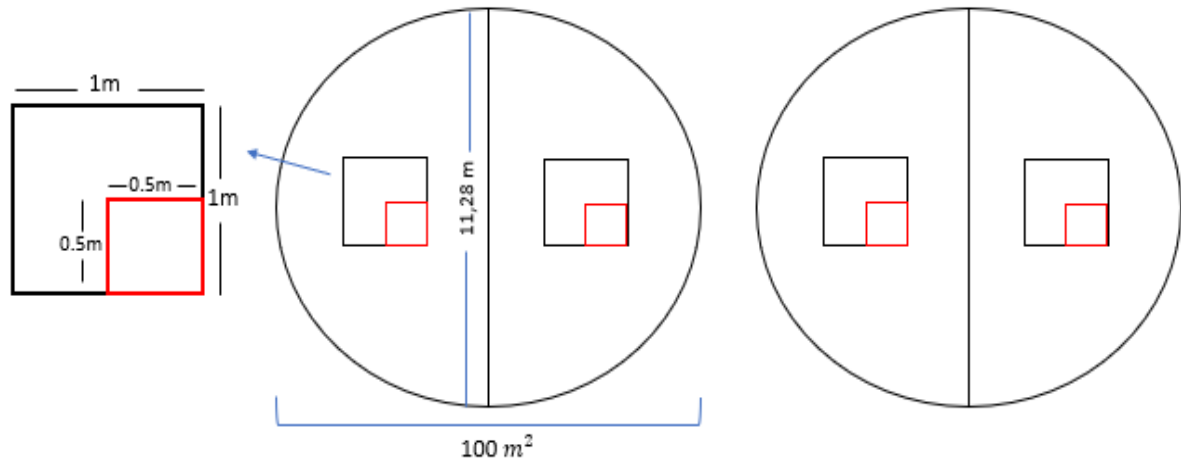
Con dicho modelo matemático se volvió a reemplazar en los datos de campo y se encontró resultados superiores a cero, ratificando la funcionalidad del modelo. Una vez estimada la cantidad de biomasa por planta, se multiplicó por la fracción de carbono (50%) para estimar la captura de carbono (IPCC, 2003) para esa edad de las plantas.

**Carbono en la biomasa de las herbáceas y arbustos.** En primer lugar, se estimó la biomasa húmeda para ello se diseñó dos parcelas circulares elegidas sistemáticamente de 100 m<sup>2</sup> con dos divisiones, con un diámetro de 11,28 m (**Figura 6**) y se instaló una subparcela que no estuvo cercano a la planta *I. edulis* en cada división. Se consideró la vegetación herbácea y arbustiva (< 2,50 cm de diámetro a 1,30 m sobre el nivel del suelo), las dos subparcelas fueron de 1,0 x 1,0 m (una por cuadrante), abarcando un total de dos repeticiones con un área total de 2 m<sup>2</sup> (Fonseca et al., 2009).

**Carbono en la biomasa de la hojarasca.** Para estimar la biomasa húmeda de las hojarascas o mantillo que lo conformaron la necromasa fina y material muerto con diámetro menor o igual a 2,5 cm, se realizó en dos subparcelas de 0,50 x 0,50 m (una por cuadrante), abarcando un total de cuatro repeticiones con un área total de 2 m<sup>2</sup> por cada parcela (**Figura 6**).

Para todos los componentes descritos, luego de evaluar la biomasa húmeda, se procedió a determinar la biomasa seca, para ello, de cada componente de biomasa húmeda fue extraída una muestra de 0,6 kg aproximadamente y siendo colocada en bolsas de plástico con su respectiva codificación para ser transportadas hacia el laboratorio de Semillas de la Escuela Profesional de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. En el laboratorio, se preparó submuestras de 200 g, las cuales se colocaron en bolsas de papel identificadas y se secaron en una estufa eléctrica a 75 °C durante 72 horas, o hasta que

alcanzaron el peso seco constante. La biomasa seca se calculó a partir del peso de estas submuestras una vez que alcanzaron la temperatura ambiente (Fonseca et al., 2009).



**Figura 6.** Diseño de la parcela para estimar el carbono en la biomasa herbácea y hojarasca.

Posteriormente con el peso húmedo obtenido en campo y el respectivo peso seco determinado en el laboratorio, se calculó el valor de la relación peso seco/peso húmedo para todos los casos y luego se calculó la biomasa usando la fórmula:

$$BT = (psm/phm) * pht$$

Siendo:

BT: Valor de la biomasa total

psm: Valor del peso seco de la muestra

phm: Valor del peso húmedo de la muestra

pht: Valor del peso húmedo total

$$\text{Biomasa t/ha} = (\text{peso seco m}^2/1000) * 10\ 000$$

Finalmente, para que se estime el valor del carbono que se almacenan en estos estratos se realizó la multiplicación de la biomasa por la constante de conversión que fue el 0,50 (IPCC, 2003).

$$\text{Carbono almacenado} = \text{biomasa seca (t ha}^{-1}) * 0,5$$

– **Carbono bajo el suelo (t/ha)**

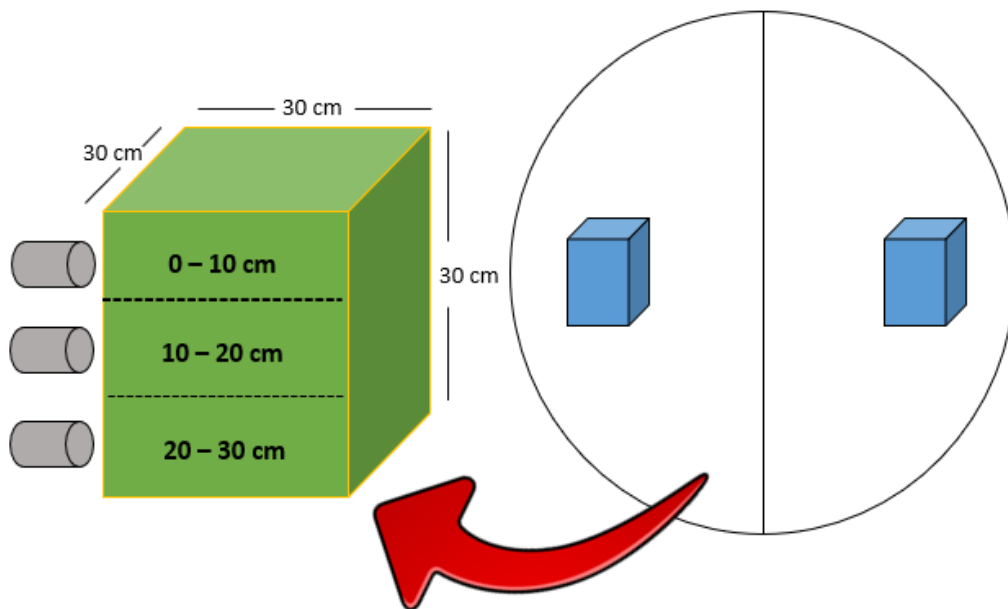
**Carbono de la biomasa radicular.** Para estimar la biomasa húmeda radicular se realizó en las mismas parcelas circulares de 100 m<sup>2</sup> dividido en dos cuadrantes que se diseñó para determinar la biomasa de las herbáceas y arbustiva. En cada

cuadrante se construyó una calicata de 30 cm x 30 cm x 30 cm de profundidad cuya ubicación fue no probabilístico o dirigido debido que se ubicó una subparcela de 0,09 m<sup>2</sup> (**Figura 4**) en espacio abierto y otra subparcela bajo el dosel de una planta de *I. edulis*. Luego se muestreó el suelo en tres profundidades, primero hasta 10 cm, de 10 a 20 y de 20 a 30 cm. En seguida las muestras fueron empacadas en bolsas de polietileno con sus claves correspondientes para ser llevados al laboratorio antes referido. Las muestras con las raíces fueron tamizadas y lavadas. Seguidamente fueron secadas en condiciones ambientales bajo sombra y luego se procedió a su pesado para determinar la biomasa húmeda. Para calcular la biomasa seca de las raíces se realizó el respectivo secado en estufa a 75° C, hasta obtener peso constante y se extrapoló a t/ha.

$$\text{Biomasa radicular (t/ha)} = ((\text{peso seco m}^2/1000) * 0,09) / 10\ 000$$

Después de estimar el valor de la biomasa radicular se multiplicó por el factor de conversión 0,5 para obtener el carbono almacenado (IPCC, 2003), mediante la expresión:

$$\text{Carbono radicular (tC/ha)} = \text{biomasa seca (t ha}^{-1}) * 0,5$$



**Figura 7.** Diseño para estimar la biomasa radicular y carbono orgánico del suelo.

**Carbono orgánico del suelo.** Se estimó la cantidad de carbono en el suelo a partir del contenido porcentual de carbono y la densidad aparente,

calculada mediante el método del cilindro (MacDicken, 1997) en las tres profundidades analizadas (**Figura 5**).

$$Da \text{ (g/m}^3\text{)} = ms / V \text{ total}$$

Donde:

Da: densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)

ms: equivale al peso de la masa seca (g)

V total: volumen del cilindro (cm<sup>3</sup>)

Luego, para obtener el carbono orgánico del suelo se estimó mediante la siguiente fórmula según IPCC (2006):

$$COS = \sum_{\text{horizonte}-1}^{\text{horizonte}-n} COS_{\text{horizonte}} \sum_{\text{horizonte}-1}^{\text{horizonte}-n} ([COS] * Da * P * 10)_{\text{horizonte}}$$

Donde:

COS: carbono orgánico del suelo (tC/ha)

COS<sub>horizonte</sub>: contenido de carbono para un horizonte (tC/ha)

[COS]: concentración de carbono para masa de suelo (gC/kg)

Da: densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)

P: profundidad del suelo (cm)

### 3.2.3. Aspectos metodológicos

#### 3.2.3.1. Enfoque de investigación

El estudio tuvo un enfoque cuantitativo, dado que se vinculó a conteos numéricos de las variables seleccionadas para este trabajo. Esta metodología fue adecuada para evaluar la influencia de la *I. edulis* en la recuperación y regulación de los servicios ecosistémicos en suelo degradado, y permitió contrastar la hipótesis propuesta (Hernández y Mendoza, 2018).

#### 3.2.3.2. Tipo de investigación

El estudio fue de tipo básico debido a que su finalidad fue que se amplie el conocimiento científico y teórico respecto los servicios ecosistémicos en un suelo degradado con plantación de *I. edulis*, sin que se tenga en cuenta su aplicación práctica inmediata (Cruz, 2020). Además, según el criterio de intervención del investigador y considerando que la recolección de datos lo realizó la tesista a propósito del estudio, el tipo de investigación fue con intervención. Atendiendo al número de mediciones de la variable en

estudio fue longitudinal porque según las variables dependiente se midió en dos momentos, al inicio y a la segunda evaluación del estudio (Supo y Zacarías, 2020).

### **3.2.3.3. Nivel de investigación**

Con respecto al nivel de investigación de acuerdo con el grado de profundidad fue de nivel explicativo (Supo y Zacarías, 2020) debido a que planteó relaciones de causalidad (*I. edulis* influye en servicios de regulación), además requirió manipulación que fue el establecimiento de la Mimosaceae en el suelo degradado y control como las partes de la parcela donde se mantiene la vegetación de suelo degradado.

### **3.2.3.4. Diseño de investigación**

Corresponde a un diseño de investigación cuasi experimental (Hernández et al., 2014), debido a que las unidades de estudio no se asignan al azar porque ya se encontraban establecidos antes del experimento, siendo un claro ejemplo las plantas de *I. edulis*.

### **3.2.3.5. Variables de investigación**

Variable independiente. Las plantas de *I. edulis*

Variable dependiente: La recuperación de servicios ecosistémicos donde los indicadores fueron la textura, temperatura del suelo, humedad del suelo, densidad aparente, porosidad, profundidad efectiva, compactación, infiltración del agua, pH, macroelementos (N, P y K), CIC, materia orgánica, abundancia de lombrices y biomasa de lombrices.

Además, otra variable dependiente fue la regulación de servicios ecosistémicos que abarcó a los indicadores de humedad ambiental, temperatura ambiental, carbono almacenado sobre el suelo y carbono almacenado bajo el suelo.

### **3.2.3.6. Población, muestra y muestreo**

La población del estudio abarcó la totalidad del área de la plantación de *I. edulis* (0,54 ha). La muestra se conformó por dos parcelas de 100 m<sup>2</sup> cada una, seleccionadas mediante un muestreo no probabilístico en el caso de escoger la ubicación de las parcelas.

### **3.2.3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

La técnica fue la observación participante a razón que la tesista se encargó de la recolección de datos para ello utilizó instrumentos mecánicos de medición como el datalogger, penetrómetro, infiltrómetro y de formatos para anotar la información pertinente.

### 3.2.3.8. Técnicas de análisis de datos

Previamente a los análisis de los datos se clasificó y agrupó la información relacionada con la variable de estudio para su posterior análisis de estos, a través de la estadística descriptiva e inferencial considerando en la hoja de cálculo Excel que permitió plasmar y tabular los resultados.

Para el contraste de la hipótesis, fue necesario utilizar la prueba t para muestras independientes (para humedad y temperatura), donde los grupos a contrastar estuvieron conformados por la *I. edulis* y el área donde no contó con la influencia de la Mimosaceae establecida. En el caso de las propiedades físicas, químicas, biológicas y el carbono almacenado se utilizó la prueba t para muestras relacionadas comparando la evaluación inicial con la evaluación final.

$$t = \frac{X_1 - X_2}{S_{X_1X_2} * \sqrt{\frac{2}{n}}}$$

Donde:

$$S_{X_1X_2} = \sqrt{\frac{2}{n} (S^2X_1 + S^2X_2)}$$

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Recuperación del suelo a través de sus características físicas, químicas y biológicas del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva

#### 4.1.1. Características físicas del suelo degradado

Para ambas evaluaciones, no se registró mejoras en la textura del suelo que se clasificaba texturalmente como franco arenoso (**Tabla 2**), siendo una característica que difícilmente suele tener cambios, pero esta especie posee la capacidad de crecer en otras clases texturales; Calixto (2018) lo estableció en suelo de textura arcillosa y creció favorablemente y Román et al. (2022) estableció en suelo de pastos donde la textura fue franco arenoso, ratificando que la especie garantiza su crecimiento en distintos suelos.

**Tabla 2.** Textura del suelo degradado con plantación de *I. edulis*.

Evaluación	Referencia	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Clase textural
Inicial	Muestra 1	65,91	17,28	16,81	Franco Arenoso
	Muestra 2	65,89	19,34	14,77	Franco Arenoso
Final	Muestra 1	59,00	18,00	23,00	Franco Arenoso
	Muestra 2	67,00	14,00	19,00	Franco Arenoso

Respecto a la profundidad efectiva se le considera como suelo muy profundo (**Tabla 3**) debido a que se registró un valor superior a los 1,5 m de profundidad tomando como referencia la parte superior de una carretera antigua que se encuentra dentro de la parcela de *I. edulis*.

En relación con la humedad del suelo, se observó una disminución en los valores medios a lo largo de los diferentes estratos. En la capa de 0 a 10 cm, la humedad pasó de 40,85 % en la evaluación inicial a 36,21 % en la final; en 10 a 20 cm, de 35,75 % a 31,20 %; y en 20 a 30 cm, de 37,30 % a 34,78 %. Si bien en cada profundidad las diferencias no fueron estadísticamente significativas, en el promedio general de 0 a 30 cm se registró una reducción significativa, pasando de 37,97 % a 34,06 % (**Tabla 3**). Esto indica que, tras dos años de la plantación, el suelo presentó una ligera disminución en su capacidad de retención hídrica, posiblemente atribuida a la cantidad de precipitación ocurrida días previo a las evaluaciones, resultados similares reportó Calixto (2018), al muestrear los suelos al final de su evaluación determinando que la humedad del suelo se encontraba de 34,62% hasta 49,25%.

La temperatura superficial del suelo también mostró una reducción, pasando de un valor medio inicial de 28,29 °C a 26,14 °C en la evaluación final (**Tabla 3**). La diferencia fue significativa ( $p < 0,05$ ), lo cual refleja un posible efecto de la cobertura de *I. edulis*, que contribuye a la regulación térmica del suelo al reducir la incidencia directa de la radiación solar, comportamiento similar es registrado en el reporte de Oré et al. (2022) donde evaluaron este indicador y encontraron que mientras un medio se encuentra menos intervenido la humedad es más baja, tal es el caso de que un sistema agroforestal con 10 años de establecido posee 26,20 °C, la parcela con cultivo de *E. coca* cuya edad fue de ocho años de establecida presentó ligera superioridad de la temperatura edáfica con 26,50 °C, mientras que en ese mismo periodo de tiempo al entrar en un bosque secundario con 15 años de edad se registró solamente en promedio una temperatura de 23,20 °C.

En cuanto a la densidad aparente ( $D_a$ ), los valores disminuyeron en todas las profundidades evaluadas. En la capa de 0 a 10 cm, se pasó de 1,05 a 0,95 g/cm<sup>3</sup>; en 10 a 20 cm, de 1,14 a 1,06 g/cm<sup>3</sup>; y en 20 a 30 cm, de 1,13 a 1,03 g/cm<sup>3</sup>. De manera general, el promedio de 0 a 30 cm se redujo de 1,11 a 1,02 g/cm<sup>3</sup> (**Tabla 3**). No obstante, estos cambios no fueron estadísticamente significativos ( $p > 0,05$ ). La disminución de la densidad aparente indica una ligera mejora en la estructura del suelo, posiblemente asociada a la incorporación de materia orgánica por la hojarasca y raíces finas de la plantación.

La porosidad total mostró una tendencia al incremento en todas las profundidades. En la capa de 0 a 10 cm, los valores pasaron de 60,47 % a 63,98 %; en 10 a 20 cm, de 56,98 % a 60,00 %; y en 20 a 30 cm, de 57,45 % a 60,97 %. En el promedio general de 0 a 30 cm, la porosidad aumentó de 58,30 % a 61,65 % (**Tabla 3**). Si bien las diferencias no fueron significativas ( $p > 0,05$ ), el incremento de porosidad guarda relación con la disminución de la densidad aparente y refleja un suelo con mayor capacidad de aireación e infiltración.

La compactación superficial se redujo de 1,52 kg/cm<sup>2</sup> en la evaluación inicial a 1,31 g/cm<sup>2</sup> en la final (**Tabla 3**), aunque sin diferencias significativas ( $p > 0,05$ ). Esta ligera disminución sugiere que el establecimiento de *I. edulis* contribuye a mitigar la compactación en la superficie del suelo, favoreciendo condiciones físicas más adecuadas para el crecimiento radicular y la infiltración de agua, pero se tiene que pasar más tiempo para que se registre significancia estadística ya que Lojka et al. (2012) al estudiar a la misma especie tampoco observaron mejoras significativas en fertilidad tras cerca de tres años, lo que sugiere que los componentes físicos del suelo (incluyendo compactación) pueden tardar mucho más tiempo para que se observen cambios significativos.

**Tabla 3.** Características físicas del suelo degradado con plantación de *I. edulis*.

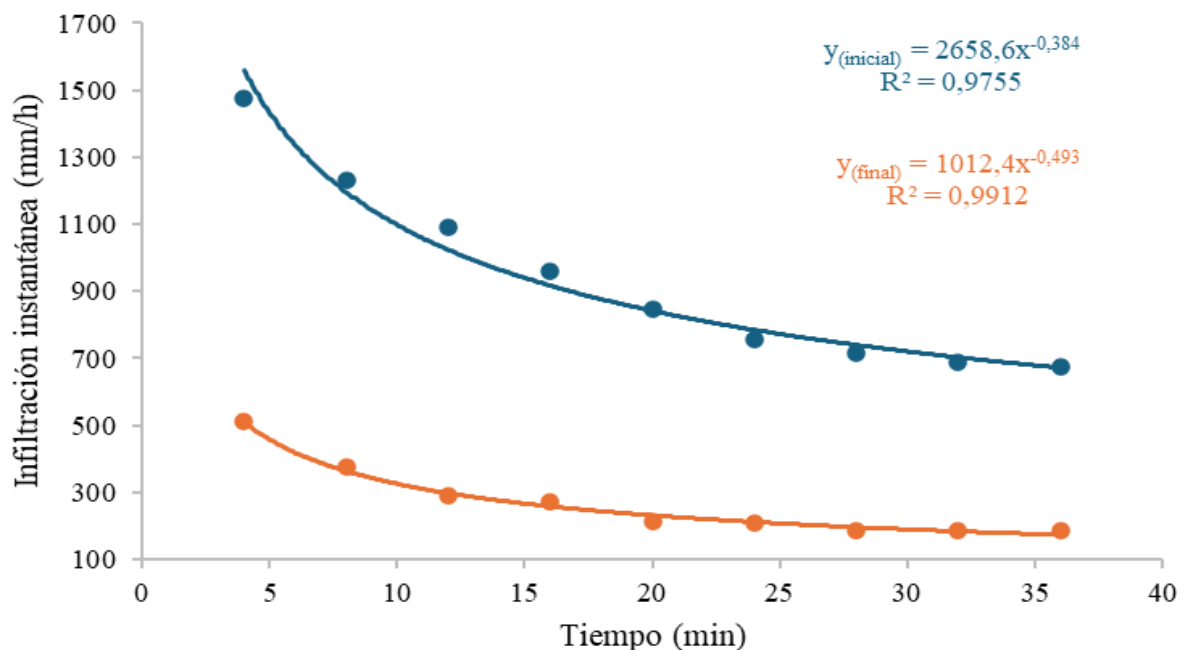
Indicador	Profundidad	Eval.	N	Mínimo	Máximo	Media	t	gl	Sig. (bil.)
Profundidad	>150 cm								Suelo muy profundo
Humedad (%)	0 a 10 cm	Inicial	4	32,87	49,89	40,85	1,803	3	0,169 <sup>ns</sup>
		Final	4	28,85	44,96	36,21			
	10 a 20 cm	Inicial	4	29,51	42,79	35,75	1,913	3	0,152 <sup>ns</sup>
		Final	4	25,91	35,68	31,20			
	20 a 30 cm	Inicial	4	31,56	41,47	37,30	1,321	3	0,278 <sup>ns</sup>
		Final	4	26,19	40,67	34,78			
	0 a 30 cm	Inicial	4	32,04	44,18	37,97	3,413	3	0,042*
		Final	4	26,98	40,44	34,06			
Temperatura (°C)	Superficial	Inicial	7	27,00	30,00	28,29	2,585	6	0,041*
		Final	7	25,00	29,00	26,14			
Da (g/cm <sup>3</sup> )	0 a 10 cm	Inicial	4	0,92	1,18	1,05	1,093	3	0,354 <sup>ns</sup>
		Final	4	0,86	1,17	0,95			
	10 a 20 cm	Inicial	4	1,12	1,17	1,14	1,734	3	0,181 <sup>ns</sup>
		Final	4	0,96	1,18	1,06			
	20 a 30 cm	Inicial	4	1,08	1,19	1,13	1,314	3	0,280 <sup>ns</sup>
		Final	4	0,95	1,14	1,03			
	0 a 30 cm	Inicial	4	1,08	1,13	1,11	1,963	3	0,144 <sup>ns</sup>
		Final	4	0,93	1,14	1,02			
Porosidad (%)	0 a 10 cm	Inicial	4	55,47	65,28	60,47	-1,093	3	0,354 <sup>ns</sup>
		Final	4	55,81	67,58	63,98			
	10 a 20 cm	Inicial	4	55,85	57,74	56,98	-1,734	3	0,181 <sup>ns</sup>
		Final	4	55,51	63,89	60,00			
	20 a 30 cm	Inicial	4	55,09	59,25	57,45	-1,314	3	0,280 <sup>ns</sup>
		Final	4	56,98	64,19	60,97			
	0 a 30 cm	Inicial	4	57,23	59,25	58,30	-1,963	3	0,144 <sup>ns</sup>
		Final	4	56,92	64,88	61,65			
Compactación (kg/cm <sup>2</sup> )	Superficial	Inicial	7	1,06	1,99	1,52	1,859	6	0,112 <sup>ns</sup>
		Final	7	1,00	1,84	1,31			

Inicial: Valor promedio en la evaluación inicial; Final: Valor promedio en la evaluación final (12 meses posteriores); ns: no existe diferencias estadísticas significativas; \*: existen diferencias estadísticas significativas. GL = n - 1 para prueba t en muestras relacionadas, n: 4 ó 7 datos en base a cada variable evaluada.

La velocidad de infiltración del agua fue mayor durante la primera evaluación, correspondiente al primer año de establecida la plantación de *I. edulis*, mientras

que al segundo año se registró una reducción notable y una tendencia a la estabilización más temprana de la curva de infiltración (**Figura 8**). Este comportamiento sugiere que, en las etapas iniciales de desarrollo de la especie, las condiciones físicas del suelo (particularmente la estructura y porosidad) aún conservaban una mayor permeabilidad superficial, posiblemente asociada a la escasa compactación y al efecto de las raíces jóvenes que generan canales preferenciales de infiltración. De manera similar, Pereira et al. (2022) indicaron que las mejoras en la infiltración inducidas por raíces jóvenes suelen ser transitorias y tienden a estabilizarse con el tiempo, una vez que los agregados del suelo se consolidan y la materia orgánica se distribuye más uniformemente. En concordancia, Kalhor et al. (2018) demostraron que las tasas de infiltración tienden a incrementarse significativamente solo después de varios años de restauración vegetal (9, 15 y 25 años), lo que evidencia que los procesos de mejora estructural del suelo requieren un periodo prolongado de recuperación.

Por otro lado, Revell et al. (2022) mencionan que la velocidad de infiltración también está influenciada por la proximidad al árbol, la densidad de raíces finas y la porosidad del suelo; sin embargo, no siempre existe una correlación directa con la edad de las plantas de *I. edulis*, lo cual podría explicar la reducción observada en la segunda evaluación, pese al crecimiento de la cobertura vegetal. Esto podría ser debido a una compactación progresiva del horizonte superficial por la caída de hojarasca y el pisoteo ocasional, así como a una redistribución del sistema radicular en profundidad.



**Figura 8.** Comportamiento de la velocidad de infiltración en suelo degradado con plantación de *I. edulis*.

#### 4.1.2. Características químicas del suelo degradado

En el presente estudio, el pH del suelo en la capa superficial mostró una ligera disminución de 5,04 a 4,52 durante el periodo de evaluación, aunque sin diferencias estadísticas significativas (**Tabla 4**). Este comportamiento indica que la acidez del suelo se mantuvo dentro del rango característico de la zona, lo cual sugiere que el establecimiento de *I. edulis* no generó mejoras marcadas en la reacción del suelo durante los dos primeros años de crecimiento. Resultados similares fueron reportados por Calixto (2018), quien observó una reducción del pH de 4,5 a 4,3 en un suelo excocal cultivado con la misma especie; el autor atribuyó esta disminución a la descomposición de la hojarasca y a la liberación de ácidos orgánicos provenientes de la materia orgánica en descomposición. De manera coincidente, Lojka et al. (2012) registraron descensos del pH en los primeros 10 cm del suelo (de 4,80 a 4,65) de los sistemas agroforestales con *I. edulis*, lo que contrasta que los residuos orgánicos producidos por *I. edulis* influye en que el suelo sea más ácido.

Sin embargo, Freitas et al. (2020) reportaron un comportamiento opuesto en sistemas silvopastoriles, donde el pH aumentó de 4,8 a 5,6, atribuyendo este efecto a la incorporación de materia orgánica que favorece la liberación de cationes básicos y la neutralización de la acidez. Por su parte, Román et al. (2022) registraron valores notablemente mayores ( $8,77 \pm 0,28$ ) en el suelo de pastos asociados con *I. edulis*, lo que podría deberse a condiciones edáficas diferentes y a la mayor edad de los árboles, que permitieron una mayor acumulación de biomasa y reciclaje de nutrientes.

Los resultados sugieren que la leve disminución registrada del pH en el suelo degradado podría relacionarse con la liberación de ácidos orgánicos durante la descomposición de la hojarasca, tal como lo plantean Zhang et al. (2024), aunque la magnitud del cambio no fue suficiente para modificar significativamente la acidez natural del suelo del BRUNAS.

Los resultados obtenidos muestran que el contenido de nitrógeno total se incrementó en el suelo con *I. edulis*, especialmente en los estratos de 10 a 20 cm y 20 a 30 cm, donde se observaron aumentos del promedio estadísticamente significativos (**Tabla 4**). Este comportamiento indica que la especie contribuye de manera positiva a la mejora de la fertilidad edáfica, donde favoreció al nivel de nitrógeno en los horizontes subsuperficiales, posiblemente debido a la descomposición de la hojarasca y la actividad de sus raíces fijadoras de nitrógeno. De manera similar, Lojka et al. (2012) reportaron un incremento del nitrógeno total en el suelo de 0,12 % a 0,24 % tras tres años de establecimiento de *I. edulis* en sistemas agroforestales, destacando su capacidad para mejorar las propiedades químicas del suelo

mediante la fijación biológica y el reciclaje de nutrientes. Asimismo, Román et al. (2022) evidenciaron una alta producción de biomasa foliar (17,0 a 8,0 t/ha/año) en sistemas silvopastoriles con *I. edulis*, lo que se traduce en un aporte significativo de nitrógeno a través de la descomposición de hojarascas, en concordancia con el ligero incremento observado en la capa superficial del presente estudio.

Por otro lado, Pineda et al. (2017) determinaron que *I. edulis* bajo un sistema agroforestal con *Theobroma cacao* aporta aproximadamente 156 kg N/ha/año mediante la caída de hojarascas y ramas podadas, lo cual confirma el potencial de la especie como fuente natural de nitrógeno y refuerza los resultados obtenidos en el BRUNAS. Las diferencias en la magnitud del incremento podrían deberse al tiempo de establecimiento de las plantaciones, a la densidad de siembra y a las condiciones climáticas locales que influyen en la tasa de descomposición y mineralización. Estos resultados confirman que *I. edulis* desempeña un papel clave en la recuperación del suelo degradado, promoviendo el enriquecimiento gradual de nitrógeno en el perfil del suelo.

El contenido de fósforo disponible en el horizonte superficial del suelo mostró un incremento significativo ( $p < 0,05$ ), pasando de 1,97 a 4,73 mg/kg después de dos años del establecimiento de *I. edulis* (**Tabla 4**). Este resultado evidencia una mejora en la disponibilidad de fósforo, lo que sugiere que la especie contribuye de manera positiva a la recuperación de la fertilidad en el suelo degradado. El aumento podría asociarse con la acumulación y descomposición de hojarascas, así como con la liberación gradual de nutrientes provenientes de la materia orgánica, procesos que favorecen la mineralización y la movilización del fósforo en la capa superficial del suelo. De manera coincidente, Pineda et al. (2017) reportaron que *I. edulis*, bajo un sistema agroforestal con *Theobroma cacao*, aporta aproximadamente 24 kg/ha de fósforo anualmente a través de la caída de hojarascas y ramas podadas. Esto refuerza la hipótesis de que la dinámica de la materia orgánica desempeña un papel central en la disponibilidad de este nutriente. Sin embargo, resultados contrastantes fueron observados por Lojka et al. (2012), quienes registraron una disminución del fósforo en los primeros 10 cm del suelo (de 4,48 a 1,95 ppm) y en capas más profundas (de 2,13 a 0,85 ppm) tras dos años de establecimiento de *I. edulis*. Estos autores atribuyeron dicha disminución a la rápida absorción del fósforo por las raíces jóvenes y al proceso de inmovilización microbiana en el suelo de baja fertilidad.

Asimismo, Calixto (2018) observó un comportamiento similar al de Lojka et al., con una disminución de 6,49 a 3,82 ppm en el suelo degradado, lo que podría explicarse por diferencias en las condiciones edáficas, el tiempo de establecimiento y la

densidad de plantación. Los resultados reflejan que *I. edulis* favorece la recuperación del fósforo en el suelo degradado del BRUNAS, especialmente en las etapas iniciales de desarrollo del sistema, destacando su potencial como especie mejoradora de la fertilidad del suelo.

El contenido de potasio (K) intercambiable en el horizonte superficial del suelo mostró una disminución significativa ( $p < 0,05$ ), pasando de 0,17 a 0,11 cmol/kg durante el periodo de evaluación. De manera similar, el contenido de óxido de potasio ( $K_2O$ ) disminuyó de 125,95 a 55,44 mg/kg, aunque sin diferencias estadísticas significativas (**Tabla 4**). Estos resultados evidencian una tendencia al agotamiento de este elemento, posiblemente atribuible a la absorción del potasio por las plantas de *I. edulis* durante su etapa de crecimiento activo, así como a la limitada reposición del nutriente en suelos degradados con baja fertilidad inicial. Un comportamiento diferente fue reportado por Calixto (2018), quien observó un incremento del potasio en el suelo degradado cultivado con *I. edulis*, pasando de 0,28 a 0,35 ppm después de 2,5 años de establecido. Este aumento podría ser debido a una mayor acumulación de hojarasca y su posterior descomposición, lo que libera potasio de forma gradual hacia el suelo. De igual manera, Román et al. (2022) registraron valores de  $34,58 \pm 19,61$  mg/kg en el suelo con *I. edulis* asociado a pastos, superiores a los  $12,10 \pm 5,28$  mg/kg en el suelo solo con pastos, lo que demuestra la influencia positiva de esta especie sobre el reciclaje del potasio en sistemas silvopastoriles.

Por su parte, Pineda et al. (2017) señalaron que *I. edulis* en asociación con *Theobroma cacao* aporta alrededor de 98 kg/ha de potasio por año a través de la caída de hojarasca y ramas podadas, evidenciando su capacidad de enriquecer el suelo con este macronutriente. Las diferencias observadas podrían explicarse por factores como la edad de las plantaciones, la cantidad y composición de la biomasa depositada, y las condiciones edáficas locales. Estos resultados sugieren que, en las etapas iniciales de establecimiento, *I. edulis* puede absorber más potasio del que retorna al suelo, reflejando una fase de alta demanda nutricional previa a la estabilización del sistema agroforestal.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo mostró una ligera disminución en el horizonte superficial, pasando de 6,11 a 5,19 cmol(+)/kg, sin diferencias estadísticas significativas (**Tabla 4**). Este resultado indica que, durante los dos primeros años de establecimiento de *I. edulis*, la capacidad del suelo para retener y suministrar cationes intercambiables se mantuvo estable, lo que sugiere un proceso inicial de adaptación del sistema radicular y de formación de materia orgánica. La estabilidad observada puede estar relacionada con el corto tiempo de evaluación, insuficiente aún para evidenciar cambios

notorios en las propiedades de retención de cargas del suelo. En contraste, Calixto (2018) reportó un incremento de la CIC de 6,19 a 8,46 cmol(+)/kg en el suelo degradado cultivado con la misma especie después de 2,5 años, lo que evidencia que el mejoramiento de esta propiedad ocurre de manera gradual a medida que aumenta la incorporación de hojarasca y la descomposición de residuos orgánicos.

De manera similar, Freitas et al. (2020) encontraron un incremento significativo de la CIC de 6,2 a 10,4 cmol(+)/kg en un sistema silvopastoril con *I. edulis*, atribuyendo este efecto a la acumulación de materia orgánica y a la liberación de cationes provenientes de la mineralización de la biomasa arbórea. Asimismo, Román et al. (2022) registraron valores promedio más altos ( $10,04 \pm 1,83$  cmol(+)/kg) en el suelo con *I. edulis* establecida desde hace cinco años, en comparación con el suelo exclusivamente de pastos ( $9,10 \pm 1,69$  cmol(+)/kg), confirmando la influencia positiva de esta especie en la mejora de la fertilidad del suelo a largo plazo. Las diferencias observadas podrían explicarse por el tiempo de establecimiento, la densidad de siembra y las características edáficas iniciales del sitio. Estos resultados sugieren que *I. edulis* mantiene la estabilidad de la CIC en las etapas tempranas del sistema, y que su efecto positivo sobre la capacidad de retención de nutrientes podría manifestarse de forma más evidente en periodos de crecimiento más prolongados.

Los resultados obtenidos evidencian un incremento generalizado de la materia orgánica del suelo en la plantación de *I. edulis*, tanto en el horizonte superficial como en los subsuperficiales. En la capa de 0–10 cm, la M.O. aumentó desde 1,85 % que es “bajo” hasta 2,80 % que es un nivel “medio”, mientras que en las profundidades de 10–20 cm y 20–30 cm los incrementos fueron significativos ( $p < 0,05$ ), pasando de 1,18 % que fue “bajo” hasta 2,17 % que refiere a un nivel “medio” y de 0,94 % hasta 1,39 % que fueron de niveles bajos, respectivamente (**Tabla 4**). Este comportamiento sugiere que el sistema radicular de *I. edulis* y la incorporación de material orgánico vía hojarasca contribuyen progresivamente a la acumulación de carbono orgánico en el perfil edáfico. Muy similar, Calixto (2018) reportó un aumento de la M.O. de 1,86 % a 3,14 % luego de 2,5 años del establecimiento de *I. edulis* en el suelo degradado, corroborando la capacidad de esta especie para mejorar la calidad orgánica del suelo con el tiempo. Resultados coincidentes fueron observados por Freitas et al. (2020), quienes evidenciaron un incremento de 1,8 % a 3,2 % en un sistema silvopastoril, atribuido a la caída de hojas, ramas y raíces finas que enriquecen la capa superficial. En la misma línea, Román et al. (2022) registraron contenidos medios de  $1,60 \pm 0,56$  % en sistemas de pastos asociado a *I. edulis*, superiores a los observados en el suelo con pasturas puras ( $1,29 \pm 0,44$  %), destacando el papel de esta Mimosaceae en la recuperación de la materia orgánica.

**Tabla 4.** Características químicas del suelo degradado con plantación de *I. edulis*.

Variable	Profundidad (cm)	Eval.	N	Mínimo	Máximo	Media	t	gl	Sig. (bil.)
pH	Superficial	Inicial	2	5,03	5,05	5,04	11,667	1	0,054 <sup>ns</sup>
		Final	2	4,48	4,55	4,52			
N	0 a 10	Inicial	4	0,06	0,11	0,09	2,494	3	0,088 <sup>ns</sup>
		Final	4	0,11	0,17	0,14			
	10 a 20	Inicial	4	0,05	0,07	0,06	-5,114	3	0,014*
		Final	4	0,08	0,12	0,11			
	20 a 30	Inicial	4	0,03	0,06	0,05	-7,462	3	0,005*
		Final	4	0,06	0,09	0,07			
	0 a 30	Inicial	4	0,05	0,08	0,07	-4,754	3	0,018*
		Final	4	0,08	0,12	0,11			
P	Superficial	Inicial	2	1,83	2,10	1,97	-15,729	1	0,040*
		Final	2	4,69	4,77	4,73			
K	Superficial	Inicial	2	0,17	0,18	0,17	14,556	1	0,044*
		Final	2	0,11	0,11	0,11			
K <sub>2</sub> O	Superficial	Inicial	2	123,49	128,42	125,95	9,079	1	0,070 <sup>ns</sup>
		Final	2	50,13	60,74	55,44			
CIC	Superficial	Inicial	2	6,04	6,17	6,11	1,420	1	0,391 <sup>ns</sup>
		Final	2	4,61	5,77	5,19			
M.O.	0 a 10	Inicial	4	1,25	2,56	1,85	-2,543	3	0,084 <sup>ns</sup>
		Final	4	2,14	3,43	2,80			
	10 a 20	Inicial	4	0,98	1,38	1,18	-5,173	3	0,014*
		Final	4	1,50	2,46	2,17			
	20 a 30	Inicial	4	0,66	1,11	0,94	-7,157	3	0,006*
		Final	4	1,12	1,71	1,39			
	0 a 30	Inicial	4	0,98	1,64	1,32	-4,830	3	0,017*
		Final	4	1,59	2,46	2,12			

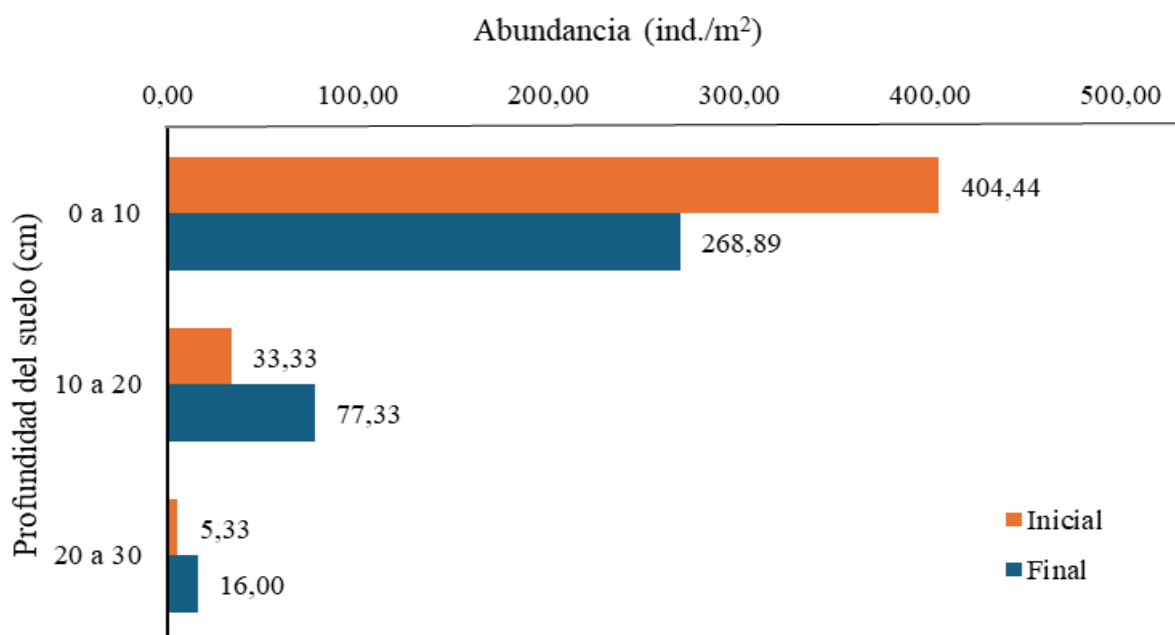
Inicial: Valor promedio en la evaluación inicial; Final: Valor promedio en la evaluación final (12 meses posteriores); ns: no existe diferencias estadísticas significativas; \*: existen diferencias estadísticas significativas. GL = n - 1 para prueba t en muestras relacionadas, n: 2 ó 4 datos de acuerdo a la variable evaluada.

Por otro lado, Alegría (2021) encontró aumentos notables en sistemas agroforestales de *I. edulis* y *T. cacao* entre los dos y seis años de edad, alcanzando valores de hasta 4,32 %, lo que sugiere que la acumulación de materia orgánica se intensifica conforme madura el sistema. De igual manera, Lojka et al. (2012) documentaron incrementos desde

1,83 % hasta 2,25 % en los primeros 10 cm y desde 0,90 % hasta 1,13 % entre 10 y 40 cm después de dos años, resultados muy próximos a los observados en este estudio. Las diferencias entre estudios podrían atribuirse al tiempo de establecimiento, densidad de plantación, condiciones climáticas y estado inicial de degradación del suelo. En conjunto, estos hallazgos confirman que *I. edulis* favorece la recuperación de la materia orgánica incluso en etapas tempranas, desempeñando un papel clave en la restauración del suelo degradado del trópico húmedo.

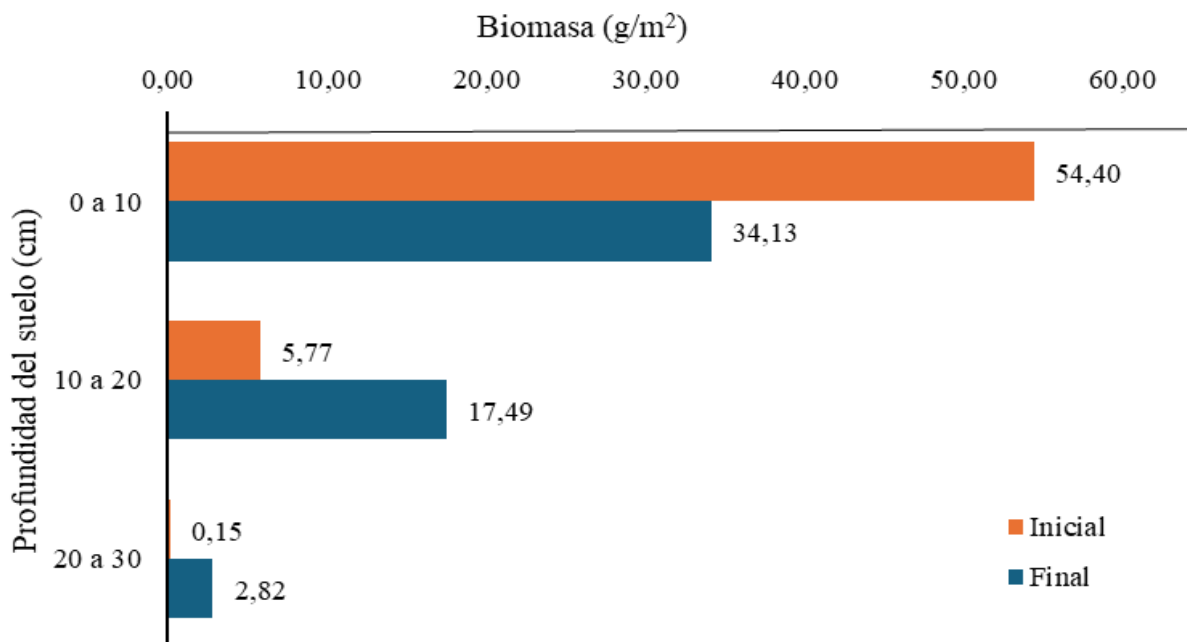
#### 4.1.3. Características biológicas (macrofauna) del suelo

Se observa una mayor concentración de individuos en los primeros centímetros del perfil, particularmente en la capa superficial (**Figura 9**), lo que indica una preferencia por los estratos con mayor disponibilidad de materia orgánica y mejores condiciones de humedad y aireación. Conforme aumenta la profundidad, la abundancia de *L. terrestris* tiende a disminuir de manera progresiva, reflejando la menor presencia de nutrientes y el mayor grado de compactación del suelo en niveles inferiores. Esta distribución evidencia la influencia positiva de *I. edulis* en la mejora de las condiciones edáficas superficiales, favoreciendo el establecimiento de comunidades de macrofauna benéfica como la *L. terrestris*.



**Figura 9.** Distribución de la abundancia de *L. terrestris* en las profundidades de muestreo del suelo degradado donde se estableció *I. edulis*.

Al igual que con la abundancia, la mayor biomasa se concentra en la capa superficial de 0–10 cm (**Figura 10**), lo cual se relaciona con la disponibilidad de restos vegetales en descomposición, mayor contenido de materia orgánica y condiciones más favorables de humedad y oxigenación. A medida que se incrementa la profundidad, la biomasa disminuye de forma notoria, reflejando la reducción de recursos alimenticios y el aumento de la compactación del suelo en estratos inferiores. Esta tendencia confirma que la presencia de *I. edulis* favorece la acumulación de biomasa de *L. terrestris* en la superficie, mejorando la dinámica de la materia orgánica y contribuyendo a la recuperación de la calidad biológica del suelo. A pesar de los beneficios de esta especie vegetal al establecerlo en suelo degradado, mejores condiciones encontraron Castillo y Ñique (2019) en el sistema nativo con 25 años de edad donde se instaló las plantas de *T. cacao* dejando la mayoría de los árboles maderables, encontraron una biomasa media para la *L. terrestris* de 98,5 g/m<sup>2</sup>, mientras que en el sistema tradicional donde se realizó la tala, la quema para recién instalar *T. cacao* asociado a *I. edulis*, donde se encontró una media de 65,2 g/m<sup>2</sup>., estos resultados ratifican la variación de biomasa respecto al grado de alteración de un determinado medio.



**Figura 10.** Distribución de la biomasa de *L. terrestris* en las profundidades de muestreo del suelo degradado donde se estableció *I. edulis*.

En cuanto a la abundancia de *L. terrestris*, se observa que en la capa superficial (0–10 cm) la densidad disminuyó de 404,44 a 268,89 ind./m<sup>2</sup>; sin embargo, en las

capas más profundas (10–20 cm y 20–30 cm) se registró un ligero incremento, pasando de 33,33 a 77,33 ind./m<sup>2</sup> y de 5,33 a 16,00 ind./m<sup>2</sup> respectivamente (**Tabla 5**). A nivel general, tanto en 0–20 cm como en 0–30 cm, la abundancia presentó una reducción, aunque sin diferencias estadísticas significativas ( $p > 0,05$ ). Esto indica que con el crecimiento de *I. edulis*, la *L. terrestris* tendieron a distribuirse más hacia estratos inferiores, posiblemente debido a la mayor protección y cambios microambientales en el suelo.

Respecto a la biomasa de *L. terrestris*, en la capa superficial (0–10 cm) se redujo desde 54,40 hasta 34,13 g/m<sup>2</sup>, pero al igual que con la abundancia, en profundidades entre 10 a 20 cm y 20 a 30 cm se evidenció un incremento, de 5,77 a 17,49 g/m<sup>2</sup> y de 0,15 a 2,82 g/m<sup>2</sup>, respectivamente. En los estratos integrados (0–20 cm y 0–30 cm), la biomasa disminuyó levemente en la evaluación final, aunque sin significancia estadística (**Tabla 5**).

**Tabla 5.** Influencia del establecimiento de *I. edulis* sobre la abundancia y biomasa de *L. terrestris* en el suelo degradado.

Variables	Profundidad (cm)	Evaluación inicial	Evaluación final	t	p-valor
Abundancia (ind./m <sup>2</sup> )	0 a 10	404,44	268,89	1,16	0,279 <sup>ns</sup>
	10 a 20	33,33	77,33	-0,93	0,381 <sup>ns</sup>
	20 a 30	5,33	16,00	-1,35	0,235 <sup>ns</sup>
	0 a 20	437,78	346,22	0,99	0,350 <sup>ns</sup>
	0 a 30	576,00	517,33	0,41	0,699 <sup>ns</sup>
Biomasa (g/m <sup>2</sup> )	0 a 10	54,40	34,13	0,97	0,362 <sup>ns</sup>
	10 a 20	5,77	17,49	-1,36	0,212 <sup>ns</sup>
	20 a 30	0,15	2,82	-1,16	0,300 <sup>ns</sup>
	0 a 20	60,16	51,62	0,58	0,576 <sup>ns</sup>
	0 a 30	81,42	76,16	0,22	0,833 <sup>ns</sup>

Inicio: Valor promedio en la evaluación inicial; Final: Valor promedio en la evaluación final (12 meses posteriores); ns: no existe diferencias estadísticas significativas.

En la evaluación inicial, la abundancia mostró variaciones entre profundidades, con un valor de  $F_c = 3,194$  y un nivel de significancia de  $p = 0,062$  (**Tabla 6**), lo cual indica que las diferencias no fueron estadísticamente significativas, aunque se observa una tendencia a la concentración de individuos en los estratos superficiales. En cuanto a la biomasa, los resultados también reflejaron diferencias no significativas ( $p = 0,192$ ), con valores

relativamente mayores en las capas superiores respecto a las más profundas, lo que es consistente con la mayor disponibilidad de materia orgánica en la superficie.

En la evaluación final, después de 12 meses de establecido el cultivo de *I. edulis*, la abundancia de *L. terrestris* presentó un  $F_c = 2,379$  con  $p=0,117$ , sin diferencias estadísticas significativas, aunque se mantuvo la tendencia a la mayor presencia de individuos en la capa superficial. Para la biomasa, el análisis también arrojó ausencia de diferencias significativas con un  $p=0,305$  (**Tabla 6**), confirmando que la distribución de *L. terrestris*, tanto en número como en peso, no presentó cambios marcados entre las diferentes profundidades de muestreo, este comportamiento se pudo atribuir a que en algunos puntos de muestreo como el primer monolito (**Tabla 16** y **Figura 34** del Anexo) las tres capas muestreadas presentaron un elevado contenido de materia orgánica debido a la cantidad elevada de hojarasca existentes, razón por la cual *L. terrestris* se observaron en las tres profundidades muestreadas, pero en el monolito cinco se registró solamente un individuo en la parte más superficial (**Tabla 16** del Anexo), este comportamiento de los datos hizo que la significancia estadística fuera ausente.

**Tabla 6.** Comparación de la abundancia y biomasa de *L. terrestris* en las distintas profundidades de muestreo del suelo degradado donde se estableció *I. edulis*.

Periodo	Variables	FV	SC	GL	CM	Fc	Sig.
Inicial	Abundancia (ind./m <sup>2</sup> )	Profundidades	824982,444	2	412491,222	3,194	0,062 <sup>ns</sup>
		Error aleatorio	2712067,556	21	129146,074		
		Total	3537050,000	23			
	Biomasa (g/m <sup>2</sup> )	Profundidades	14672,097	2	7336,048	1,788	0,192 <sup>ns</sup>
		Error aleatorio	86149,511	21	4102,358		
		Total	100821,608	23			
Final	Abundancia (ind./m <sup>2</sup> )	Profundidades	276198,444	2	138099,222	2,379	0,117 <sup>ns</sup>
		Error aleatorio	1219256,889	21	58059,852		
		Total	1495455,333	23			
	Biomasa (g/m <sup>2</sup> )	Profundidades	3625,283	2	1812,641	1,257	0,305 <sup>ns</sup>
		Error aleatorio	30282,814	21	1442,039		
		Total	33908,096	23			

Inicio: Valor promedio en la evaluación inicial; Final: Valor promedio en la evaluación final (12 meses posteriores); ns: no existe diferencias estadísticas significativas. GL para un DCA desbalanceado, las profundidades fueron 3, entonces  $k - 1 = 2$ , el error aleatorio será  $N - k$ , donde  $N$  es el número total de observaciones con datos ( $6p * 3pr + 3p * 2pr$ ), donde  $p$  es punto de muestreo y  $pr$  es la cantidad de profundidad, sería  $24 - 3 = 21$ , y GL total es  $N - 1: 24 - 1 = 23$ .

#### **4.2. Regulación del microclima generado por la sombra de una plantación de *I. edulis* establecida en suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva**

Los resultados obtenidos muestran que la cobertura de *I. edulis* influye moderadamente en la temperatura y la humedad ambiental, dicha influencia es dependiente de las condiciones climáticas diarias. Durante los días lluviosos, la humedad relativa se mantuvo elevada en ambos ambientes, tanto bajo dosel como en espacio abierto, con valores superiores al 90 %, sin diferencias significativas ( $p > 0,05$ ). Este comportamiento sugiere que, en condiciones de alta saturación atmosférica, el efecto microclimático del dosel es menos notorio, ya que la humedad ambiental tiende a homogeneizarse. En contraste, durante los días soleados, las diferencias se hicieron evidentes: el dosel de *I. edulis* mantuvo niveles de humedad relativa significativamente mayores ( $p < 0,01$ ) entre las 08:00 y 13:00 h, al mismo tiempo que redujo las temperaturas máximas en comparación con el espacio abierto (**Tabla 7 y 8, Figuras 11 y 12**), alcanzando un efecto regulador térmico claro durante las horas de máxima radiación. Estos hallazgos concuerdan con lo descrito por Renaud y Rebetez (2009), quienes señalan que las copas de los árboles reflejan y absorben parte de la radiación solar, reduciendo el calentamiento del aire bajo el dosel durante el día y limitando el enfriamiento nocturno, lo cual suaviza las amplitudes térmicas diarias. En este estudio, se observó que la temperatura máxima en EA alcanzó los 45,9 °C, mientras que bajo el dosel de *I. edulis* no superó los 37,4 °C, lo que confirma el efecto de atenuación térmica reportado por los autores. Asimismo, el incremento de la humedad relativa bajo el dosel durante el mediodía coincide con la descripción de Renaud y Rebetez (2009) y Arx et al. (2012), quienes sostienen que la evaporación del suelo y la transpiración de las hojas incrementan la humedad del aire, al tiempo que el dosel limita el intercambio con la atmósfera abierta, creando un microclima más húmedo.

De manera similar, Ma et al. (2010) observaron que la magnitud de este efecto suavizador del dosel es más pronunciada en días soleados y en coberturas densas, lo que concuerda con el patrón observado en la plantación de *I. edulis*, donde el microclima bajo sombra presentó menores fluctuaciones térmicas diarias y una recuperación más rápida de la humedad durante las horas vespertinas. Por su parte, Niinemets (2010) enfatiza que este tipo de regulación microclimática favorece el desarrollo de plántulas y organismos del sotobosque al reducir el estrés térmico y conservar la humedad ambiental, lo que podría ser particularmente relevante en contextos de restauración ecológica, como el del suelo degradado del BRUNAS.

**Tabla 7.** Comparación de la humedad relativa mediante la regulación del microclima generado por la sombra de una plantación de *I. edulis*.

Horas	Punto	n	Día lluvioso					Día soleado				
			Media	DE	t	GL	Sig.	Media	DE	t	GL	Sig.
00:00	BD	5	94,64	3,77	1,488	8	0,175 <sup>ns</sup>	87,52	2,90	-1,262	8	0,242 <sup>ns</sup>
	EA	5	91,66	2,41				90,20	3,75			
01:00	BD	5	95,24	4,12	0,999	8	0,347 <sup>ns</sup>	88,20	3,17	-0,956	8	0,367 <sup>ns</sup>
	EA	5	93,14	2,25				90,36	3,93			
02:00	BD	5	95,84	3,19	1,418	8	0,194 <sup>ns</sup>	88,60	3,21	-1,420	8	0,193 <sup>ns</sup>
	EA	5	93,62	1,44				91,48	3,20			
03:00	BD	5	96,16	3,77	1,233	8	0,253 <sup>ns</sup>	89,10	2,75	-1,774	8	0,114 <sup>ns</sup>
	EA	5	93,90	1,61				91,98	2,37			
04:00	BD	5	96,64	2,93	1,229	8	0,254 <sup>ns</sup>	89,30	2,95	-1,623	8	0,143 <sup>ns</sup>
	EA	5	94,78	1,69				92,18	2,65			
05:00	BD	5	96,78	3,16	1,236	8	0,251 <sup>ns</sup>	89,88	2,20	-2,672	8	0,028*
	EA	5	94,76	1,83				93,16	1,64			
06:00	BD	5	96,76	3,63	1,015	8	0,340 <sup>ns</sup>	90,56	1,79	-3,276	8	0,011*
	EA	5	94,88	1,99				93,78	1,27			
07:00	BD	5	96,32	3,73	1,593	8	0,150 <sup>ns</sup>	88,44	2,00	0,212	8	0,838 <sup>ns</sup>
	EA	5	92,42	4,01				88,06	3,48			
08:00	BD	5	93,98	4,56	1,572	8	0,154 <sup>ns</sup>	80,74	2,27	5,434	8	0,001**
	EA	5	84,56	12,60				71,76	2,92			
09:00	BD	5	91,34	7,56	1,127	8	0,293 <sup>ns</sup>	66,44	3,08	4,084	8	0,004**
	EA	5	79,90	21,41				56,14	4,73			
10:00	BD	5	86,16	12,34	0,945	8	0,372 <sup>ns</sup>	56,06	4,82	6,055	8	<0,001**
	EA	5	74,22	25,41				39,48	3,78			
11:00	BD	5	80,20	14,14	1,046	8	0,326 <sup>ns</sup>	46,46	4,20	6,511	8	<0,001**
	EA	5	66,74	25,07				32,62	2,23			
12:00	BD	5	75,06	14,21	1,055	8	0,322 <sup>ns</sup>	42,70	3,49	6,610	8	<0,001**
	EA	5	60,76	26,77				30,16	2,42			
13:00	BD	5	68,56	15,12	0,735	8	0,484 <sup>ns</sup>	38,74	3,06	5,103	8	0,001**
	EA	5	59,64	22,55				30,18	2,17			
14:00	BD	5	66,84	10,83	0,621	8	0,552 <sup>ns</sup>	37,90	4,69	2,125	8	0,066 <sup>ns</sup>
	EA	5	60,68	19,36				31,54	4,77			

Horas	Punto	n	Día lluvioso					Día soleado				
			Media	DE	t	GL	Sig.	Media	DE	t	GL	Sig.
15:00	BD	5	69,86	9,12	0,921	8	0,384 <sup>ns</sup>	39,12	7,07	1,360	8	0,211 <sup>ns</sup>
	EA	5	61,34	18,56				32,88	7,43			
16:00	BD	5	63,50	11,82	0,219	8	0,832 <sup>ns</sup>	43,70	2,87	0,661	8	0,527 <sup>ns</sup>
	EA	5	61,40	17,84				42,26	3,93			
17:00	BD	5	73,64	9,51	0,460	8	0,658 <sup>ns</sup>	51,72	3,80	-0,040	8	0,969 <sup>ns</sup>
	EA	5	69,80	16,08				51,82	4,04			
18:00	BD	5	82,76	6,61	0,239	8	0,817 <sup>ns</sup>	62,52	5,65	-0,848	8	0,421 <sup>ns</sup>
	EA	5	81,80	6,08				65,40	5,08			
19:00	BD	5	88,10	5,01	0,668	8	0,523 <sup>ns</sup>	67,24	4,11	-1,460	8	0,182 <sup>ns</sup>
	EA	5	86,18	4,02				71,46	4,99			
20:00	BD	5	89,96	4,73	0,978	8	0,357 <sup>ns</sup>	72,00	6,05	-0,691	8	0,509 <sup>ns</sup>
	EA	5	87,44	3,29				74,52	5,46			
21:00	BD	5	92,48	4,65	0,947	8	0,371 <sup>ns</sup>	75,16	6,53	-0,515	8	0,621 <sup>ns</sup>
	EA	5	90,20	2,71				77,22	6,12			
22:00	BD	5	94,14	4,70	1,612	6,14	0,157 <sup>s</sup>	79,36	6,33	-0,595	8	0,568 <sup>ns</sup>
	EA	4	90,25	2,38				81,72	6,22			
23:00	BD	5	96,06	3,23	2,191	7	0,065 <sup>ns</sup>	81,46	6,43	-0,714	8	0,495 <sup>ns</sup>
	EA	4	92,23	1,39				84,28	6,05			
24:00	BD	5	96,14	3,61	1,644	7	0,144 <sup>ns</sup>	82,42	5,42	-0,760	8	0,469 <sup>ns</sup>
	EA	4	92,85	1,83				85,26	6,36			

BD: Bajo dosel; EA: Espacio abierto; DE: Desviación estándar; ns: no existen diferencias estadísticas; \*: significativo al 95% de confiabilidad; \*\*: significativo el 99% de confiabilidad. GL =  $(n_1 + n_2) - 2$  para prueba t en muestras independientes,  $n_1$ : 5 y  $n_2$ : 5 datos.

Las diferencias respecto a otros sistemas forestales con mayor densidad de plantación son atribuidas a que la plantación fue de  $3 \times 4$  m y a su estado joven de estas plantas por tener solo dos años de establecido, que aún no conforman un dosel completamente cerrado (**Tabla 7 y 8, Figuras 11 y 12**). Según Arx et al. (2012), la capacidad de un rodal para modificar el microclima depende de la estructura vertical del dosel, la presencia de tallos y ramas, así como de las condiciones fisiográficas locales (pendiente, humedad del suelo y radiación incidente). En este caso, el dosel parcial de *I. edulis* permitió una moderación significativa de la temperatura y la humedad durante las horas críticas, pero sin alcanzar los contrastes microclimáticos típicos de bosques maduros o sistemas agroforestales más densos.

**Tabla 8.** Comparación de la temperatura ambiental mediante la regulación del microclima generado por la sombra de una plantación de *I. edulis*.

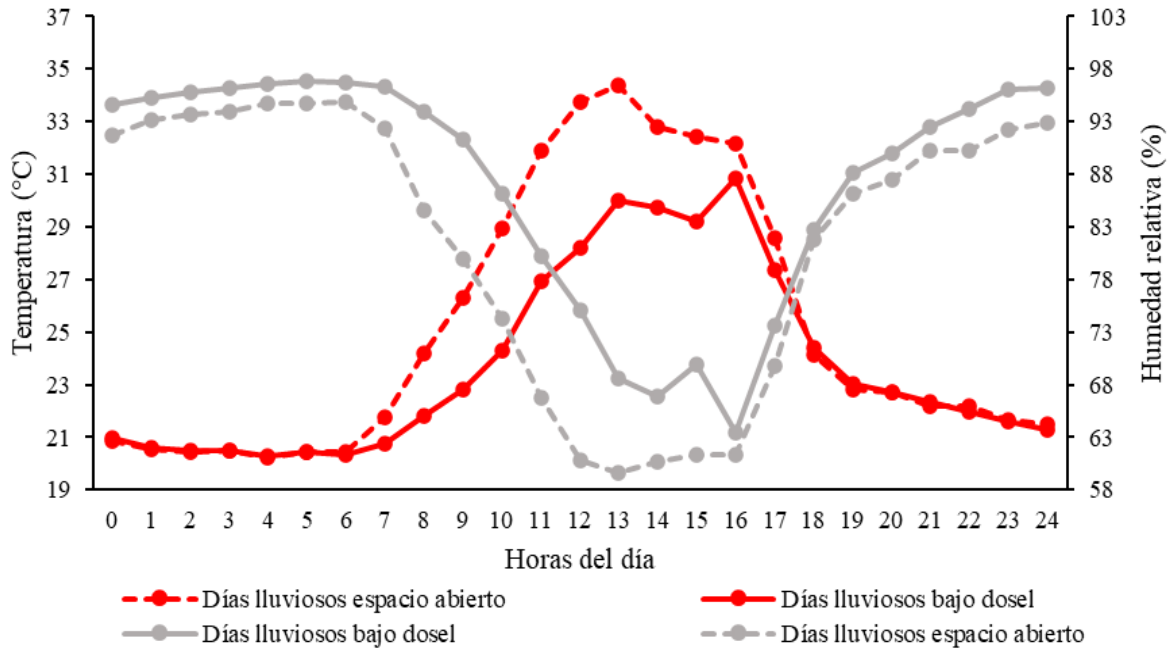
Horas	Punto	n	Día lluvioso					Día soleado				
			Media	DE	t	GL	Sig.	Media	DE	t	GL	Sig.
00:00	BD	5	20,96	1,11	0,112	8	0,914 <sup>ns</sup>	21,06	0,62	0,461	8	0,657 <sup>ns</sup>
	EA	5	20,88	1,15				20,86	0,74			
01:00	BD	5	20,62	1,11	0,086	8	0,934 <sup>ns</sup>	20,74	0,75	0,331	8	0,749 <sup>ns</sup>
	EA	5	20,56	1,11				20,58	0,78			
02:00	BD	5	20,50	0,98	0,097	8	0,925 <sup>ns</sup>	20,40	0,75	0,841	8	0,425 <sup>ns</sup>
	EA	5	20,44	0,98				20,00	0,75			
03:00	BD	5	20,50	0,86	0,000	8	1,000 <sup>ns</sup>	20,10	0,66	0,847	8	0,422 <sup>ns</sup>
	EA	5	20,50	0,75				19,72	0,76			
04:00	BD	5	20,30	0,81	0,111	8	0,914 <sup>ns</sup>	19,96	0,62	0,569	8	0,585 <sup>ns</sup>
	EA	5	20,24	0,89				19,72	0,71			
05:00	BD	5	20,42	0,71	-0,047	8	0,964 <sup>ns</sup>	19,50	0,48	1,432	8	0,190 <sup>ns</sup>
	EA	5	20,44	0,63				19,10	0,39			
06:00	BD	5	20,36	0,72	-0,133	8	0,898 <sup>ns</sup>	19,22	0,72	0,387	8	0,709 <sup>ns</sup>
	EA	5	20,42	0,71				19,02	0,90			
07:00	BD	5	20,78	0,68	-2,214	8	0,058 <sup>ns</sup>	20,54	0,74	-1,865	8	0,099 <sup>ns</sup>
	EA	5	21,74	0,69				21,58	1,00			
08:00	BD	5	21,84	0,53	-1,865	8	0,099 <sup>ns</sup>	23,12	0,88	-6,115	8	<0,001**
	EA	5	24,20	2,78				27,04	1,13			
09:00	BD	5	22,82	1,45	-1,272	8	0,239 <sup>ns</sup>	27,22	0,90	-7,889	8	<0,001**
	EA	5	26,30	5,94				32,64	1,24			
10:00	BD	5	24,32	2,67	-1,301	8	0,229 <sup>ns</sup>	30,62	1,18	-9,645	8	<0,001**
	EA	5	28,92	7,44				39,88	1,80			
11:00	BD	5	26,96	2,38	-1,500	8	0,172 <sup>ns</sup>	33,94	1,49	-10,432	8	<0,001**
	EA	5	31,90	6,97				43,62	1,45			
12:00	BD	5	28,22	3,32	-1,460	8	0,183 <sup>ns</sup>	36,04	1,58	-9,435	8	<0,001**
	EA	5	33,72	7,74				45,38	1,55			
13:00	BD	5	30,00	3,70	-1,338	8	0,218 <sup>ns</sup>	37,40	1,16	-13,646	8	<0,001**
	EA	5	34,36	6,28				45,90	0,78			
14:00	BD	5	29,74	2,84	-0,902	8	0,393 <sup>ns</sup>	37,36	2,13	-3,193	8	0,013*
	EA	5	32,78	6,98				42,88	3,23			

Horas	Punto	n	Día lluvioso					Día soleado				
			Media	DE	t	GL	Sig.	Media	DE	t	GL	Sig.
15:00	BD	5	29,20	2,34	-1,161	8	0,279 <sup>ns</sup>	36,90	1,72	-2,837	5,42	0,033*
	EA	5	32,44	5,78				42,44	4,01			
16:00	BD	5	30,86	4,15	-0,382	8	0,713 <sup>ns</sup>	34,44	1,30	-1,699	8	0,128 <sup>ns</sup>
	EA	5	32,16	6,39				36,46	2,32			
17:00	BD	5	27,36	2,18	-0,491	8	0,637 <sup>ns</sup>	30,96	1,93	-0,474	8	0,648 <sup>ns</sup>
	EA	5	28,56	5,01				31,56	2,07			
18:00	BD	5	24,42	0,70	0,442	8	0,670 <sup>ns</sup>	26,82	1,14	0,499	8	0,631 <sup>ns</sup>
	EA	5	24,14	1,23				26,50	0,87			
19:00	BD	5	23,02	0,18	1,072	8	0,315 <sup>ns</sup>	25,14	0,63	1,379	8	0,205 <sup>ns</sup>
	EA	5	22,82	0,38				24,54	0,74			
20:00	BD	5	22,72	0,55	0,051	8	0,961 <sup>ns</sup>	24,06	0,24	2,665	8	0,029*
	EA	5	22,70	0,68				23,56	0,34			
21:00	BD	5	22,32	0,33	0,530	8	0,610 <sup>ns</sup>	23,40	0,64	0,627	8	0,548 <sup>ns</sup>
	EA	5	22,16	0,59				23,16	0,57			
22:00	BD	5	21,98	0,20	-0,897	7	0,400 <sup>ns</sup>	22,44	0,54	0,767	8	0,465 <sup>ns</sup>
	EA	4	22,18	0,43				22,18	0,53			
23:00	BD	5	21,62	0,40	-0,220	7	0,832 <sup>ns</sup>	21,98	0,60	0,953	8	0,369 <sup>ns</sup>
	EA	4	21,68	0,33				21,62	0,60			
24:00	BD	5	21,28	0,55	-0,512	7	0,624 <sup>ns</sup>	21,66	0,52	1,164	8	0,278 <sup>ns</sup>
	EA	4	21,48	0,59				21,30	0,45			

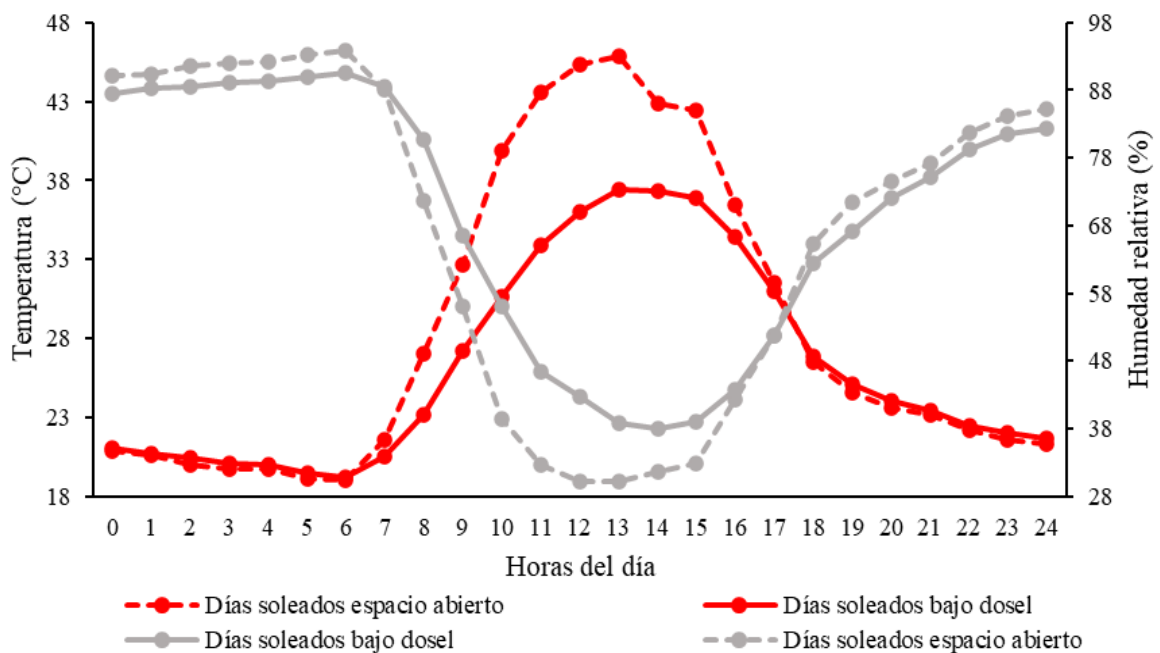
BD: Bajo dosel; EA: Espacio abierto; DE: Desviación estándar; ns: no existen diferencias estadísticas; \*: significativo al 95% de confiabilidad; \*\*: significativo el 99% de confiabilidad. GL =  $(n_1 + n_2) - 2$  para prueba t en muestras independientes,  $n_1$ : 5 y  $n_2$ : 5 datos.

A parte del comportamiento que es generado por la sombra generada en base a la magnitud de su área de copa y la cantidad de hojas que contiene, *I. edulis* también se va adaptando a cada condición donde se encuentra establecida, en este caso fue a un medio del suelo degradado, además de la elevada temperatura así como la alta pluviosidad, estos factores hacen que la especie presente características propias como la que se observó, la presencia de flores, esto es concordante al estudio realizado en Quindío-Colombia por parte de Marín-Gómez et al. (2012) donde estudiaron a esta especie asociada a *Guadua angustifolia* y otra parcela asociada al café, entre los resultados encontraron que, *I. edulis* presenta un patrón fenológico caracterizado por dos periodos de floración, fructificación y brotación

constantes, y ausencia de caída marcada de follaje. La coincidencia de algunas fenofases con la precipitación y las diferencias respecto a otros estudios sugieren variación fenológica influenciada por condiciones locales y distribución geográfica.



**Figura 11.** Comportamiento de la temperatura ambiental y humedad relativa en días lluviosos como parte de la regulación del microclima.



**Figura 12.** Comportamiento de la temperatura ambiental y humedad relativa en días soleados como parte de la regulación del microclima.

### 4.3. Captura de carbono en una plantación de *I. edulis* establecida en el suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva

#### 4.3.1. Carbono sobre el suelo en una plantación de *I. edulis*

Al comparar el aporte del carbono aéreo en cada componente en ambas evaluaciones realizadas, se tiene que el componente herbáceo, las hojarascas ni el componente total aéreo no registraron diferencias estadísticas significativas (**Tabla 9**). De manera similar, Rueda (2014) reportó valores de carbono en biomasa aérea de *I. edulis* entre 4,48 y 6,26 tC/ha en plantaciones jóvenes establecidas a distancias de  $3 \times 3$  m y  $3 \times 4$  m, lo que concuerda con los valores obtenidos en el presente estudio, considerando la edad y espaciamiento de la plantación. Sin embargo, en el suelo con pH más ácido y bajo contenido de materia orgánica, el crecimiento inicial de *I. edulis* podría estar limitado, reduciendo el ritmo de acumulación de biomasa y, por ende, del carbono aéreo, lo que explicaría la similitud de resultados.

Por otro lado, Java (2024) encontró valores de carbono en necromasa de árboles de *I. edulis* de 3,74 t/ha/año a los dos años de edad, disminuyendo a 2,18 t/ha/año en plantaciones de seis años. Este comportamiento podría relacionarse con una mayor inversión energética del árbol en crecimiento estructural en etapas tempranas, seguida de una estabilización en etapas más avanzadas, fenómeno compatible con la tendencia observada en el presente estudio, donde el carbono aéreo total mostró una leve mejora entre el primer y segundo año.

Asimismo, Alegría (2021) evidenció incrementos significativos en el carbono de hojarascas en sistemas agroforestales con *I. edulis* y *Theobroma cacao*, donde los valores se incrementaron de 7,13 a 11,57 t/ha entre los dos y seis años de establecimiento. A diferencia del presente estudio, que no registró diferencias significativas en el carbono de las hojarascas, esto podría ser debido al periodo corto de tiempo del estudio, al menor desarrollo del dosel y a la baja tasa de acumulación de biomasa foliar propia de los primeros años de crecimiento. Además, Lojka et al. (2012) demostraron que *I. edulis* reduce la biomasa herbácea en un 60 % debido al efecto de sombra de su follaje. Este fenómeno coincide con lo observado en el presente trabajo, donde el componente herbáceo no mostró incremento notable de carbono, lo que sugiere que el sombreado del dosel limita el desarrollo de la vegetación baja, reduciendo su aporte a la biomasa aérea total.

La disminución de los promedios del componente herbáceo entre las dos evaluaciones registradas (**Tabla 9**) pudo estar vinculado con el aporte de hojarascas de parte de *I. edulis*, ya que para (Powell, 1996) esta especie se usa en control de malezas, ya que sus hojas son de lenta descomposición y la capa de hojarasca previene la germinación de semillas

de malezas. Además, Ferrari & Wall (2004), el mantillo de hojarasca es eficiente para controlar malezas mientras permanece en el suelo sin descomponerse ya que previene la germinación de semillas de malezas anuales, este tipo de control no sería efectivo para malezas propagadas vegetativamente.

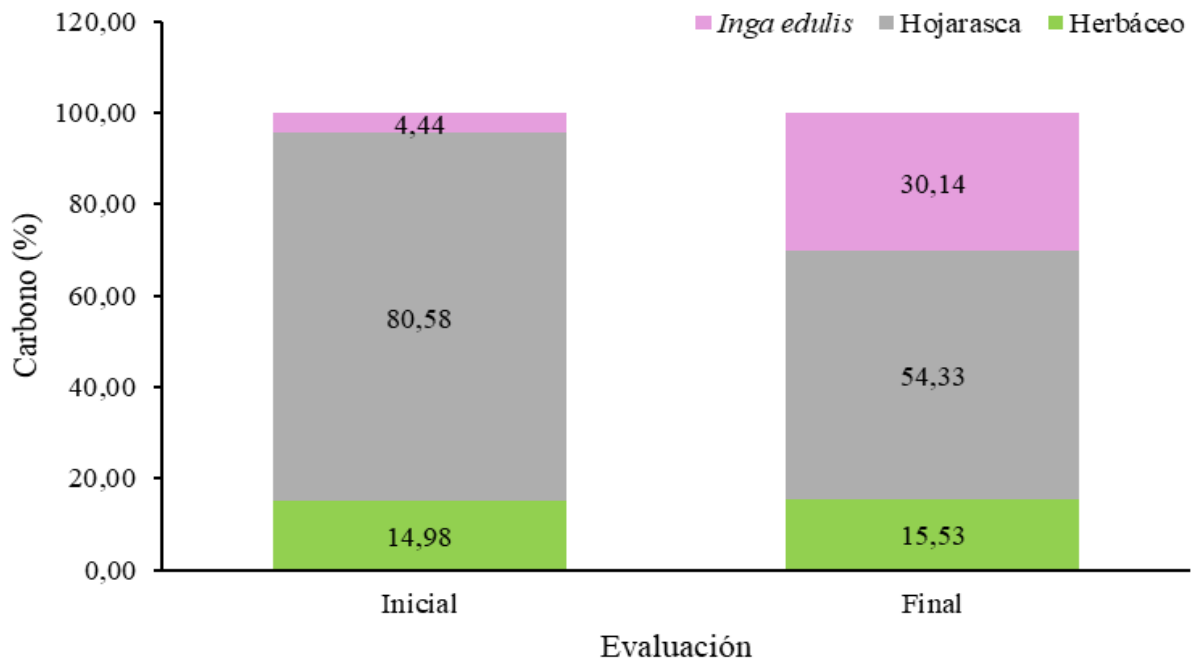
Además, el carbono almacenado se vio incrementado en la totalidad de las plantas de *I. edulis*, debido a que al inicio solamente almacenaba 0,39 t/ha y al final del estudio llega almacenar 2,23 t/ha (**Tabla 9**), aunque fue inferior a lo reportado por Román et al. (2022) quienes registraron una media de 13,73 tC/ha al encontrarse en sistemas silvopastoriles en donde las plantas presentaban desde los dos hasta los cinco años de establecido, diferencias atribuidas a la edad de las plantas y al grado de degradación del suelo ya que el antecedente en mención del suelo fue más fértil.

**Tabla 9.** Contenido de carbono aéreo total en una plantación de *I. edulis* establecido en suelo degradado.

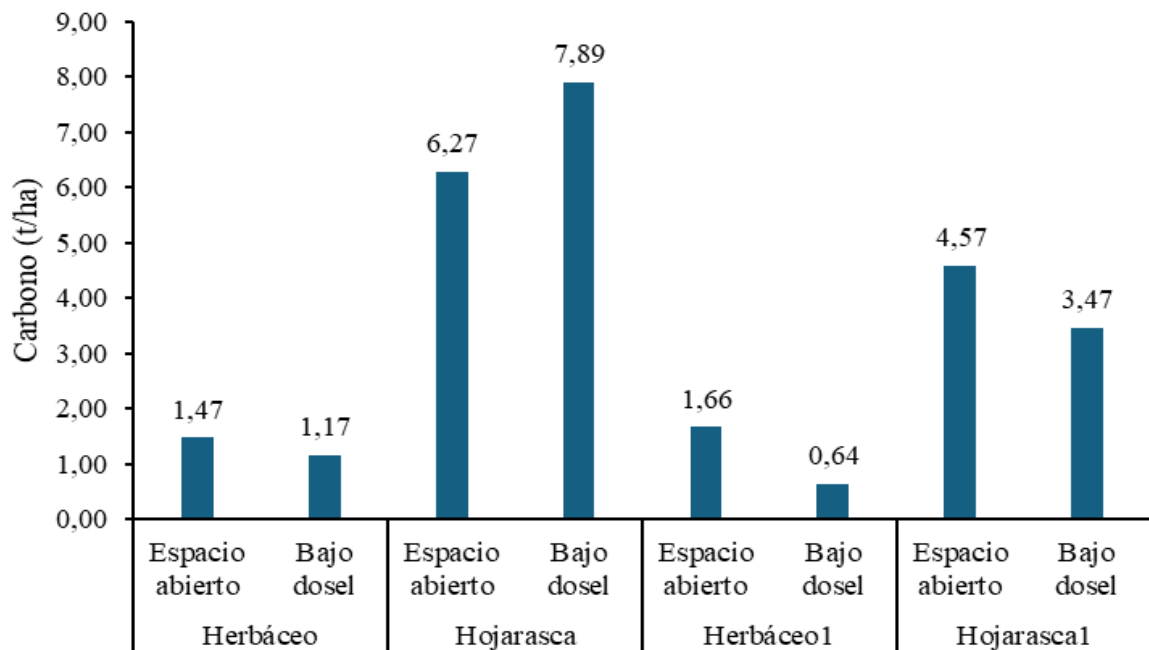
Componente aéreo	n	Mínimo	Máximo	Media (tC/ha)	DE	t	gl	Sig. (bilateral)
Herbáceo	4	0,77	1,56	1,32	0,37	0,412	3	0,708 <sup>ns</sup>
Herbáceo1	4	0,38	2,16	1,15	0,75			
Hojarasca	4	4,23	11,56	7,08	3,17	2,299	3	0,105 <sup>ns</sup>
Hojarasca1	4	1,93	6,64	4,02	2,20			
<i>Inga edulis</i>	1	0,39	0,39	0,39	0,00	---	---	---
<i>Inga edulis</i> 1	1	2,23	2,23	2,23	0,00			
Total	4	6,17	12,72	8,78	2,80	0,955	3	0,410 <sup>ns</sup>
Total1	4	4,55	11,03	7,40	2,83			

1: Corresponde a la variable medida al final de la investigación; DE: Desviación estándar; ns: No registró diferencias estadísticas.

El carbono aéreo total también registró variaciones respecto a la proporción de almacenamiento por parte de sus componentes, siendo más notorio el almacenamiento por las plantas de *I. edulis* y la disminución representativa por parte de las hojarascas (**Figura 13**), aun así, esta última proporción sigue siendo superior a lo determinado por Silva y Olaya (2019) en sistemas agroforestales de *C. arabica* variedad Catimor asociado a *I. edulis* que registró una proporción de las hojarascas correspondientes a 21,76% del total de carbono aéreo almacenado, esto debido a que las plantas de estos sistemas agroforestales tenían mayor edad y registraron más carbono almacenado en sus tallos, ramas y hojas, mientras que el aporte por las hojarascas se mantenían casi constantes.



**Figura 13.** Proporción del contenido de carbono aéreo en un medio degradado con plantación de *I. edulis*.



1: Corresponde a la variable medida al final de la investigación.

**Figura 14.** Distribución del contenido de carbono aéreo en espacio abierto y bajo dosel de las plantas de *I. edulis*.

El componente herbáceo bajo dosel al inicio era superior respecto a los que se ubicaban bajo dosel, luego transcurrido los 12 meses del periodo de ejecución se

encontró que se elevó el valor en espacio abierto, pero disminuyó más cuando se encontraban bajo dosel; en el caso de las hojarascas, al inicio superó cuando se encontraba bajo el dosel y luego al final se encontró un valor más bajo de las hojarascas cuando se realizó el muestreo bajo el dosel (**Figura 14**).

#### 4.3.2. Carbono bajo el suelo en una plantación de *I. edulis*

El carbono orgánico del suelo, el carbono en las raíces y el carbono total en el suelo no registró diferencias estadísticas significativas entre ambas evaluaciones al muestrear suelos a una profundidad entre 0 a 10 cm; comportamiento similar estadísticamente se encontró en las comparaciones a la profundidad de 20 a 30 cm; pero en el caso de la profundidad de 10 a 20 cm se registró diferencias en el contenido de carbono orgánico del suelo entre las dos evaluaciones realizadas (**Tabla 10**).

En el caso del carbono orgánico del suelo (COS) se evidencian un incremento de 29,58 a 37,37 t/ha tras dos años de establecimiento de *I. edulis* (**Tabla 10**), lo cual refleja una mejora progresiva en la acumulación de materia orgánica. Este aumento sugiere que la especie contribuye a la recuperación del carbono en el suelo degradado mediante la incorporación de hojarascas, raíces finas y exudados radiculares que favorecen la actividad microbiana y la estabilización del carbono en el suelo. De manera similar, Alegría (2021) registró valores ascendentes de carbono del suelo en sistemas agroforestales con *I. edulis* y *Theobroma cacao*, con incrementos desde 36,95 t/ha a los dos años hasta 46,16 t/ha a los cuatro años de establecido. La coincidencia en la tendencia creciente podría explicarse por la capacidad de *I. edulis* para fijar nitrógeno y mejorar la estructura del suelo, lo que favorece la retención de carbono orgánico. Las diferencias entre ambos estudios pueden resultar debido a la composición de especies asociadas, la edad de las plantaciones y las condiciones iniciales del suelo. Los resultados confirman que *I. edulis* promueve la recuperación del carbono edáfico en etapas tempranas de restauración, consolidándose como una especie clave para la rehabilitación del suelo amazónico degradado.

Los resultados obtenidos mostraron una ligera disminución del carbono en las raíces de *I. edulis*, pasando de 10,58 t/ha en la primera evaluación a 8,95 t/ha en la segunda (**Tabla 10**). Esta reducción sugiere un posible reajuste en la asignación de biomasa radicular conforme la especie avanza en su desarrollo, priorizando el crecimiento aéreo y la producción foliar sobre la expansión subterránea. En etapas iniciales, las plantas jóvenes tienden a invertir más carbono en las raíces para asegurar el anclaje y la captación de agua y nutrientes; sin embargo, conforme el dosel se cierra y mejora la disponibilidad edáfica, la inversión radicular puede estabilizarse o incluso disminuir. De manera similar, Java (2024)

reportó una tendencia decreciente en el carbono almacenado en raíces de *I. edulis*, con valores que pasaron de 20,42 t/ha en plantaciones de dos años a 14,69 t/ha en plantaciones de seis años. Este comportamiento coincide con la dinámica observada en el presente estudio, indicando que la reducción del carbono radicular puede asociarse a una redistribución del carbono hacia el componente aéreo conforme la especie madura.

**Tabla 10.** Distribución del contenido de carbono bajo el suelo degradado con una plantación de *I. edulis*.

Prof. (cm)	Variable	n	Mínimo	Máximo	Media (tC/ha)	DE	t	gl	Sig. (bilat.)
0 a 10 cm	COS	4	7,58	15,69	11,20	4,09	-2,095	3	0,127 <sup>ns</sup>
	COS1	4	12,84	18,40	15,25	2,32			
	Raíz	4	6,06	7,44	6,79	0,60	0,947	3	0,413 <sup>ns</sup>
	Raíz1	4	4,72	8,96	6,02	1,97			
	Suelo	4	14,96	22,31	18,00	3,63	-1,418	3	0,251 <sup>ns</sup>
	Suelo1	4	18,01	24,16	21,26	3,08			
10 a 20 cm	COS	4	6,67	9,10	7,79	1,23	-4,295	3	0,023*
	COS1	4	10,25	15,84	13,18	2,31			
	Raíz	4	2,83	5,00	3,79	0,91	1,677	3	0,192 <sup>ns</sup>
	Raíz1	4	2,67	3,56	2,93	0,42			
	Suelo	4	9,64	12,93	11,58	1,40	-2,797	3	0,068 <sup>ns</sup>
	Suelo1	4	12,91	18,61	16,11	2,36			
20 a 30 cm	COS	4	4,10	7,24	6,12	1,42	-2,593	3	0,081 <sup>ns</sup>
	COS1	4	7,01	11,32	8,38	1,98			
	Raíz	4	0,33	3,33	1,76	1,23	1,252	3	0,299 <sup>ns</sup>
	Raíz1	4	0,22	2,44	1,31	1,16			
	Suelo	4	6,50	8,85	7,89	1,12	-1,555	3	0,218 <sup>ns</sup>
	Suelo1	4	7,88	13,49	9,69	2,63			
0 a 30 cm	Total	4	31,17	43,99	37,46	5,88	-2,598	3	0,080 <sup>ns</sup>
	Total1	4	41,63	53,64	47,07	6,00			

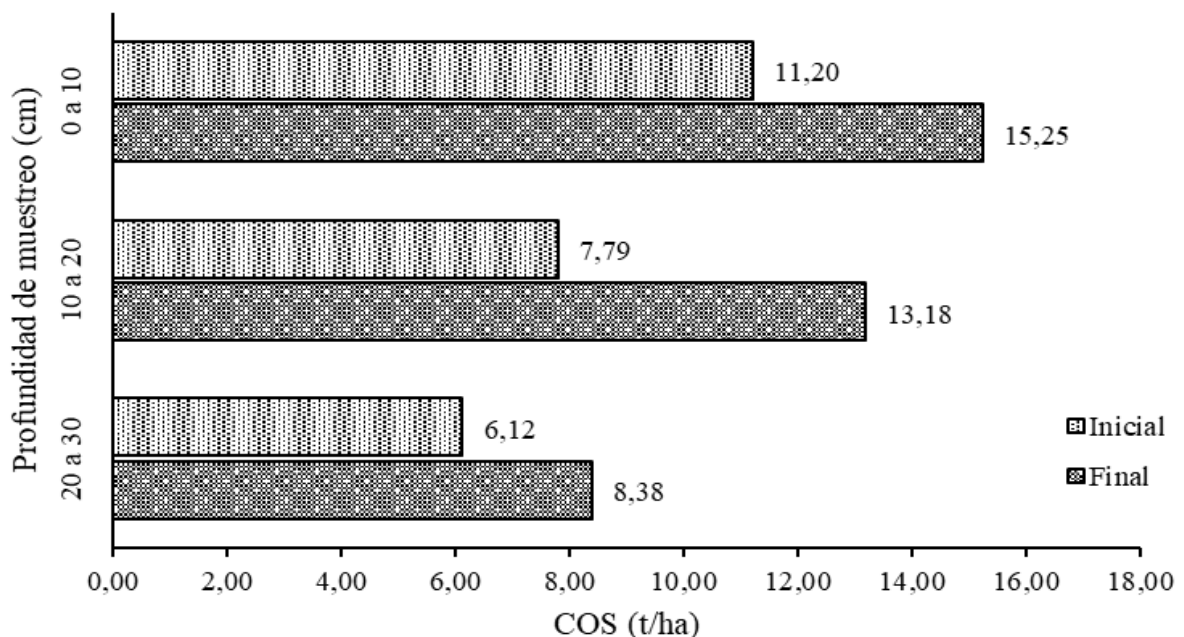
1: Corresponde a la variable medida al final de la investigación; DE: Desviación estándar; ns: No registró diferencias estadísticas significativas; \*: presentó diferencias estadísticas significativas.

A diferencia de lo encontrado por Alegría (2021), quien reportó incrementos graduales del carbono radicular con la edad de los sistemas agroforestales, las

diferencias podrían explicarse por el tipo de manejo, la asociación con *Theobroma cacao* y las condiciones del suelo, que influyen directamente en la tasa de crecimiento radicular. En conjunto, los resultados confirman que *I. edulis* mantiene un aporte significativo de carbono subterráneo, incluso bajo condiciones del suelo degradado, contribuyendo a la estabilización del carbono edáfico y a la mejora de la estructura del suelo.

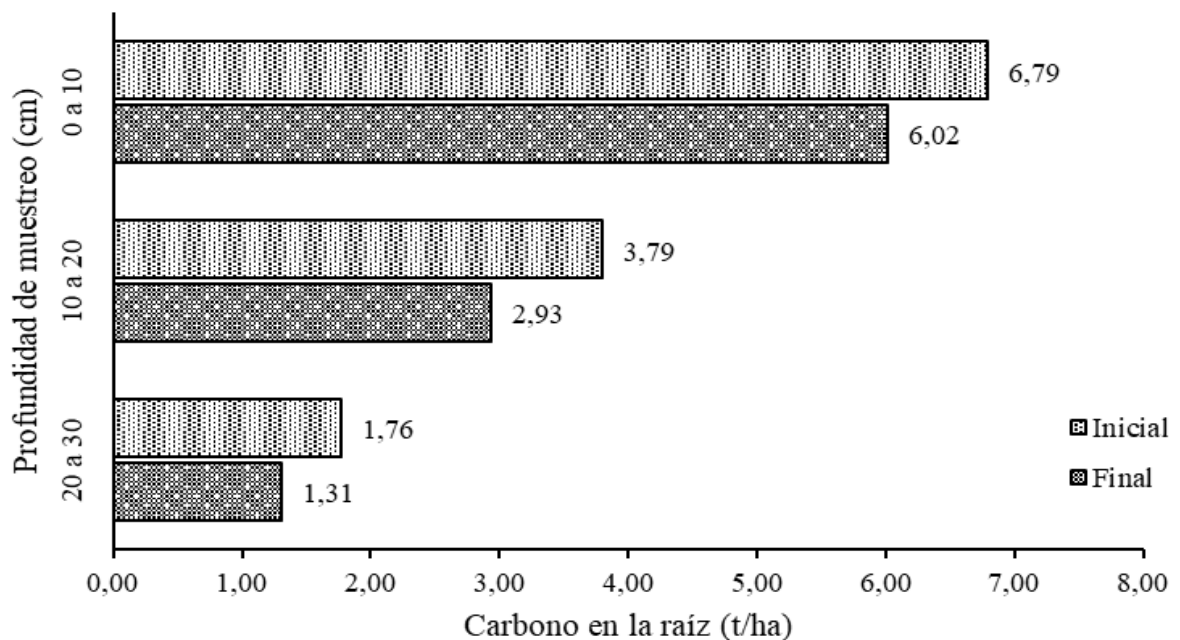
Se registró un incremento de contenido de carbono bajo el suelo, siendo al inicio 37,46 t/ha y se elevó hasta los 47,07 t/ha al final del estudio, aunque fue carente de significancia estadística (**Tabla 10**), resultado inferior a lo reportado por Silva y Olaya (2019) que estudiaron sistemas agroforestales de *C. arabica* variedad Catimor asociado a *I. edulis*, al muestrear el suelo obtuvieron una media de 104,13 t/ha, esto se debe a que los sistemas agroforestales tenían más edad y el suelo donde se instaló el cultivo agrícola no es muy deficiente nutricionalmente, aun así la parcela en estudio estuvo favorecido en cierta medida por el establecimiento de *I. edulis*, aunque resultados más alentadores se obtuvo cuando lograron las plantas alcanzar la madurez con mayores dimensiones con las cuales aportaron hojarascas y ramas para que se quede como carbono almacenado en el suelo.

Se registró una disminución del contenido de carbono orgánico del suelo respecto a la profundidad de muestreo, estos valores fueron superiores cuando se realizó la segunda evaluación de la parcela (**Figura 15**).



**Figura 15.** Distribución del contenido de carbono orgánico del suelo en un medio degradado con una plantación de *I. edulis*.

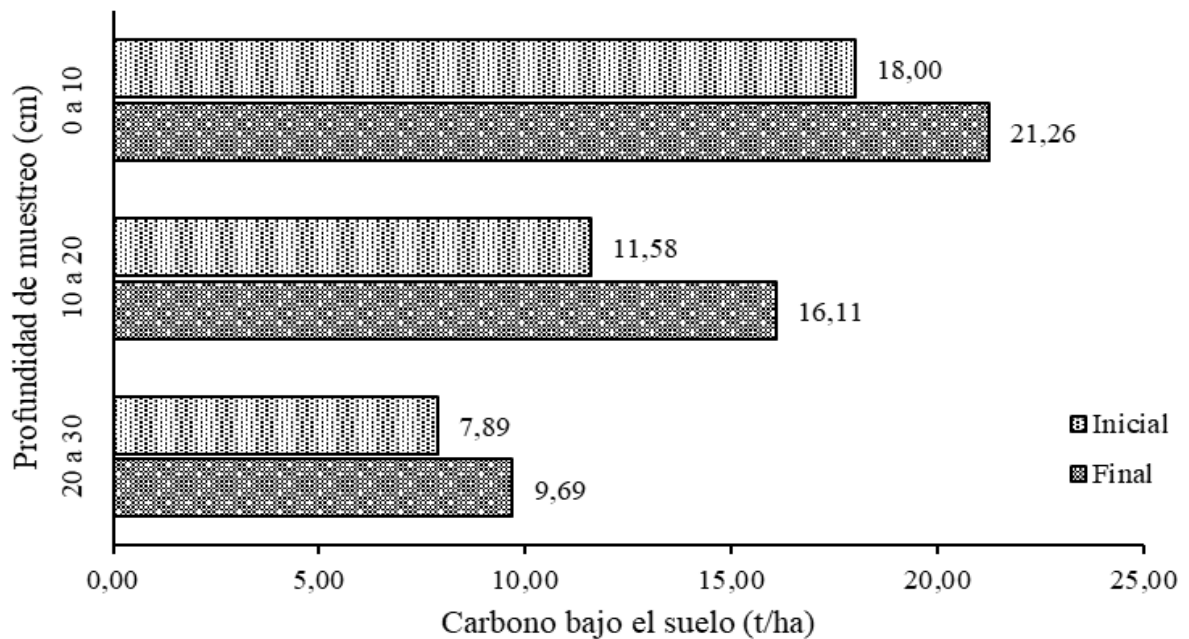
Se registró una disminución del contenido de carbono de la raíz respecto a la profundidad del muestreo, estos valores fueron superiores cuando se realizó la primera evaluación de la parcela (**Figura 16**), resultado que difiere a lo encontrado por Chávez (2018) al muestrear el suelo hasta los 50 cm de profundidad, determinando para *I. edulis* una media de 22,025 kg/ha de raíces finas, de las cuales el 23% de estas raíces se encuentran entre los 0 a 20 cm de profundidad, lo cual debería elevar el valor de la biomasa en la capa más superficial del suelo, pero este comportamiento pudo atribuirse porque al culminar el estudio la vegetación existente como *P. aquilinum* se encontraban en menor densidad a consecuencia de que las plantas de *I. edulis* generaban más sombra y la especie vegetal en mención es poco tolerable a las sombras, siendo su componente radicular donde almacena una cantidad considerable de carbono que con el tiempo llegó a descomponerse y convertirse en CO<sub>2</sub>.



**Figura 16.** Distribución del contenido de carbono radicular en suelo degradado con una plantación de *I. edulis*.

Se registró una disminución del contenido de carbono bajo el suelo respecto a la profundidad del muestreo, estos valores fueron superiores cuando se realizó la segunda evaluación de la parcela (**Figura 17**), este comportamiento es favorable debido a que la especie en estudio tiene buen comportamiento en el suelo degradado, esto lo corroboró Calixto (2018), al establecer *I. edulis* en medios similares y evaluar su sobrevivencia registrando que hasta una edad de 2,5 años de establecido se observó que el 90,10% de las plantas se encontraban vivas con tamaños que abarcaron un rango desde 1,88 m hasta los 1,98

m, siendo la media de 1,93 m, para el caso del diámetro se registró promedios de 1,50 cm al inicio y 13,80 cm al final, estas características hacen que la planta aporte carbono al suelo, siendo superior en la capa superficial debido principalmente a la caída de las hojas y ramas pequeñas y la parte más profundo se ve favorecida por el sistema de raíces.



**Figura 17.** Distribución del contenido de carbono bajo el suelo degradado en una plantación de *I. edulis*.

#### 4.3.3. Carbono total en la plantación de *I. edulis* en suelo degradado

El contenido de carbono almacenado se incrementó en 8,31 t/ha, siendo más notorio el almacenamiento en el componente suelo (**Tabla 11**).

**Tabla 11.** Carbono almacenado total en la plantación de *I. edulis* establecido en suelo degradado.

Componente	Inicial		Final	
	Promedio (tC/ha)	Proporción (%)	Promedio (tC/ha)	Proporción (%)
Aéreo	8,79	19,00	7,40	13,58
Suelo	37,46	81,00	47,07	86,42
Total	46,25	100,00	54,46	100,00

## V. CONCLUSIONES

1. La especie *I. edulis* influyó de manera significativa en la recuperación y regulación de servicios ecosistémicos en un suelo degradado en Tingo María.
2. La plantación de *I. edulis* tras dos años del establecimiento favoreció en el incremento de la porosidad del suelo, y disminuyendo el contenido de humedad, la compactación y la densidad aparente. En las características químicas, se mejora el nivel de nitrógeno, fósforo y materia orgánica; mientras que disminuyó en el contenido de potasio. Respecto a las características biológicas, hubo una redistribución tanto en la abundancia como en la biomasa de *L. terrestris*, con una tendencia a concentrarse en la parte superficial.
3. Las plantas de *I. edulis* contribuyen a la creación de un microclima más estable, reduciendo la temperatura media y un aumento de la humedad relativa durante las horas de mayor insolación; este efecto se traduce en la reducción del estrés térmico, mejorando las condiciones para la actividad microbiana y favoreciendo la regeneración de la cobertura vegetal.
4. La plantación de *I. edulis* registró incrementos en el carbono almacenado para la totalidad del componente aéreo, así como las plantas de *I. edulis*, mientras que en los componentes herbáceo y en las hojarascas se registró disminución de los valores. En el caso del carbono bajo el suelo, el COS se incrementó en las tres profundidades del muestreo, mientras que el carbono radicular disminuyó, pero de manera general se incrementó el carbono almacenado en el suelo.

## **VI. PROPUESTAS A FUTURO**

1. Continuar con las evaluaciones de la plantación de *I. edulis* con fines de fortalecer la información generada a través del tiempo.
2. Realizar estudios donde se consideren a la fauna silvestre en la plantación de *I. edulis*, debido a que se observó la presencia de animales cuando la especie en estudio se encontraba en fases de floración y fructificación.
3. Considerar estudios donde se recolecten datos sobre la diversidad y abundancia de la regeneración natural a consecuencia de las condiciones microclimáticas que se generó por el dosel de las plantas de *I. edulis* para considerar como aspectos técnicos para la restauración de medios degradados.
4. Realizar estudios similares donde se establezcan otras especies para generar un paquete tecnológico de estos sistemas en suelo degradado que enriquecen dicho medio mediante la incorporación de especies forestales pertenecientes a la misma familia para que pueda acumular en el futuro su valor económico con fines maderables.

## VII. REFERENCIAS

- Alegría, A. (2021). *Incorporación y almacenamiento de carbono en el suelo en un sistema agroforestal instalado en áreas degradadas en Ricardo Palma – Tingo María 2019* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/5ff14f9d-54ef-47fc-a28a-2d93cac98c5a/content>
- Anderson, J., & Ingram, J. (eds). (1993). *Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods*. CAB International, Wallingford.
- Arévalo, L., Alegre, J. y Palm, C. (2003). *Manual de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra en Perú*.
- Arx, G., Dobbertin, M., & Rebetez, M. (2012). Spatio-temporal effects of forest canopy on understory microclimate in a long-term experiment in Switzerland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 166–167(15), 144-155. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.07.018>
- Bernal, M. (2018). Técnicas biológicas de recuperación de suelos. *Sociedad Española de la Ciencia del Suelo*. <https://www.secs.com.es/calendario/2018.pdf>
- Blake, G. R., y Hartge, K. H. (1986). Bulk density. In: A Klute (ed). *Methods of soil analysis*. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Pp. 363- 375. Am. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>
- Calixto, M. (2018). *Aporte del Inga edulis a la fertilidad del suelo degradado por el cultivo de coca (Erythroxylum coca) en el caserío de Buenos aires, distrito Rupa Rupa, provincia Leoncio Prado, departamento Huánuco – 2018*. [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]. Repositorio Institucional UDH. <http://repositorio.udh.edu.pe/handle/123456789/1460?show=full>
- Camargo, E., Carreño, J., y Barón, E. (2012). Los servicios ecosistémicos de regulación: Tendencias e impacto en el bienestar humano. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 3(1), 77-83. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/936/934>
- Cartes, G. (2013). *Degradación de suelos agrícolas y el SIRD-SD*. ODEPA. <https://www.odepa.gob.cl/wpcontent/uploads/2013/10/SueloAgricola201310.pdf>

- Castillo, S. y Ñique, M. (2019). Macrofauna del suelo como indicador biológico del estado de conservación en sistemas agroforestales del sector El Choclo en San Martín – Perú. *Revista Tayacaja*, 2(2), 45–53. <https://doi.org/10.46908/rict.v2i2.49>
- Centro Internacional de Investigación Agroforestal [ICRAF]. (2009). Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. ICRAF. [http://www.katoombagroup.org/documents/tools/ICRAF\\_GuiaDeterminacionCarbono\\_esp.pdf](http://www.katoombagroup.org/documents/tools/ICRAF_GuiaDeterminacionCarbono_esp.pdf)
- Chávez, C. (2018). *Distribución de raíces finas de Inga edulis y Theobroma cacao en el suelo de un sistema agroforestal orgánico* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio institucional UNAS. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2420>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO]. (2012). *Sistema de Clasificación de Cronquist*. CONABIO. <https://reinaldolozano.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/10/cronquist1980.pdf>
- Cruz, P. (2020). *Modelos epistemológicos de la medicina moderna*. Instituto de Estudios Superiores de Chiapas.
- Decreto Supremo N° 017-2009-AG. (2009). *Reglamento de clasificación de tierra por su capacidad de uso mayor*. Ministerio de Agricultura. <https://www.senace.gob.pe/wp-content/uploads/filebase/senacenormativa/NAT-3-7-01-DS-017-2009-AG.pdf>
- Derecho, Ambiente y Recursos Naturales [DAR]. (5 de octubre de 2021). *Perú perdió más de 200 mil hectáreas de bosque solo en el 2020: la tasa más alta de los últimos 20 años*. <https://dar.org.pe/peru-perdio-mas-de-200-mil-hectareas-de-bosque-solo-en-el-2020-la-tasa-mas-alta-de-los-ultimos-20-anos/>
- Díaz, E. (2015). *Relación entre el contenido de materia orgánica y nitrógeno total de los suelos de la provincia de Leoncio Prado* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. <http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/173/AGR628.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad. (2010). *Una guía rápida: La Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad para Diseñadores de Políticas Locales y Regionales*. TEEB. [http://www.teebweb.org/media/2010/09/TEEBD2-Local-and-Regional-Quick-guide\\_Spanish.pdf](http://www.teebweb.org/media/2010/09/TEEBD2-Local-and-Regional-Quick-guide_Spanish.pdf)
- Ferrari, A. E., & Wall, L. G. (2004). Utilization of nitrogen fixing trees for revegetation of degraded soils. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 105(2), 63-87.

- [https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/15679/Documento\\_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/15679/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ferreira, R. (2016). Agua disponible del suelo. *Agrosmart*. <http://suporte.cultivo inteligente.com.br/es/articles/3763370-agua-disponible-del-suelo>
- Ferrez, J., Davison, A. C., & Rebetz, M. (2011). Extreme temperature analysis under forest cover compared to an open field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(7), 992-1001. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.03.005>
- Fonseca, W., Alice, F., y Rey Benayas, J. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*, 30 (1), 36-47.
- Freitas, R. M. O., Souza, H. N., Carvalho, G. J., Oliveira, T. S., & Silva, M. L. N. (2020). Influence of *Inga edulis* on soil quality and forage yield in a silvopastoral system. *Agroforestry Systems*, 94(2), 455–467. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00423-3>
- García, L. (2017). *Metodologías de campo para determinar profundidad, densidad aparente, materia orgánica, infiltración del agua, textura y pH en el suelo*. Universidad Nacional de Apicultores y Ganaderos. <https://cenida.una.edu.ni/documentos/NP33G216m.pdf>
- Gelman, F., Binstock, R., & Halicz, L. (2011). *Application of the Walkley-Black titration for organic carbon quantification in organic rich sedimentary rocks*. The Ministry National Infrastructures. [http://www.gsi.gov.il/\\_Uploads/ftp/GsiReport/2011/Gelman-Faina-GSI-132011.pdf](http://www.gsi.gov.il/_Uploads/ftp/GsiReport/2011/Gelman-Faina-GSI-132011.pdf)
- Guerra, J., Oré, L., Loarte, W., y Oré, J. (2022). Sembrío de *Inga edulis* (guaba) y aporte de macronutrientes en suelos degradados excocales. *FitoVida*, 1(2), 02-05. <https://revistas.unid.edu.pe/index.php/FitoVida/article/view/8/8>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). Interamericana Editores, S.A.
- Hernández, R., y Mendoza C. P. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (1ra ed.). Mc Graw Hill.
- Holdridge, L. (1987). *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2008). NTC 5298 - Calidad de suelo. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico. Bogotá.

- Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales y Universidad Nacional de Colombia. (2018). Variabilidad y cambio climáticos en Colombia. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales y Universidad Nacional de Colombia.
- Intergovernmental Technical Panel in Soils. (2020). *Towards a definition of soil health*. Global Soil Partnership. <https://www.fao.org/3/cb1110en/cb1110en.pdf>
- Ismaeel, A., Tai, A. P. K., Santos, E. G., Maraia, H., Aalto, I., Altman, H., Doležal, J., Lembrechts, J. J., Camargo, J. L., Aalto, J., Sam, K., Avelino, L. C., Kopecký, M., Svátek, M., Nunes, M. H., Matula, R., Plichta, R., Abera, T., & Maeda, E. E. (2024). Patterns of tropical forest understory temperatures. *Nat Commun*, 15(549), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44734-0>
- Jandl, R. y Rubio, A. (2005). Sostenibilidad del secuestro de carbono en ecosistemas forestales. *Sociedad española de ciencias forestales*, 20(2), 259-269.
- Java, A. (2024). *Carbono almacenado en suelo y carbono en necromasa de árboles de Inga edulis “guaba” en varillal seco, Nina Rumi, Loreto-Perú* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. Repositorio UNAP. <https://hdl.handle.net/20.500.12737/10023>
- Kalhor, S., Ding, K., Zhang, B., Chen, W., Hua, R., Shar, A., & Xu, X. (2018). Soil infiltration rate of forestland and grassland over different vegetation restoration periods at Loess Plateau in northern hilly areas of China. *Landscape and Ecological Engineering*, 1, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s11355-018-0363-0>
- Kitamura, A., Cristina, M., Sanches, L. y Paz, A. (2008). Recuperação de um solo degradado com Aplicação de adubos verdes e lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 32, 405-416.
- Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología, y Universidad Nacional Agraria de la Selva (LASAE y UNAS). (2024). *Resultados de análisis de suelos*. LASAE y UNAS.
- Lince-Salazar, L., Castro, A., y Castaño, W. (2020). Estabilidad de agregados de suelos de la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé*, 71(2), 73-91. <https://doi.org/10.38141/10778/71206>
- Lojka, B., Preininger, D., Van Damme, P., Rollo, A., y Banout, J. (2012). Use of the Amazonian tree species *Inga edulis* for soil regeneration and weed control. *Journal of Tropical Forest Science*, 24(1), 89–101. <https://www.jstor.org/stable/23616700>
- Ma, S., Concilio, A., Oakley, B., North, M., & Chen, J. (2010). Spatial variability in microclimate in a mixed-conifer forest before and after thinning and burning

- treatments. *Forest Ecology and Management*, 259(5), 904-915. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.11.030>.
- MacDicken, K. G. (1997). *A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects*. Forest Carbon Monitoring Program.
- Magallanes, F. (2021). *Supervivencia y crecimiento inicial de cinco especies del género Inga en condiciones de suelos pobres; Rodríguez de Mendoza – Amazonas* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio LAMOLINA. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4914>
- Marín-Gómez, O. H., Castaño-González, A. F., y Gómez-Marín, G. D. (2012). Fenología del guamo *Inga edulis* (Fabales: Mimosoideae) en dos agroecosistemas del Quindío, Colombia. *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, 23(2), 127–133. <https://doi.org/10.33975/riuq.vol23n2.412>
- Martini, A., Biondi, D., & Batista, A. C. (2017). Urban forest components influencing microclimate and cooling potential. *Revista Árvore*, 41(6), e410603. doi: 10.1590/1806-90882017000600003
- McKenzie, R. (2010). *Agricultural Soil Compaction: Causes and Management*. Alberta. [https://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/agdex13331/\\$file/510-1.pdf?OpenElement](https://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/agdex13331/$file/510-1.pdf?OpenElement)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia [MADS]. (2012). *Política nacional para la gestión integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos – PNGIBSE*. MADS.
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2016). *Lineamientos para la valoración económica de la diversidad forestal y fauna silvestre*. MINAM. [https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/lineamientos\\_de\\_vedffs.pdf:contentReference\[oaicite:21\]{index=21}](https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/lineamientos_de_vedffs.pdf:contentReference[oaicite:21]{index=21})
- Mora, V. V. (2025). *Análisis comparativo del desarrollo vegetativo de seis especies nativas arbóreas en la Reserva Nacional Tambopata, Madre de Dios, 2023-2024* [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio institucional CONTINENTAL. [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/17203/1/IV\\_FIN\\_107\\_TE\\_Mora\\_Lopez\\_Valeria\\_Claudia\\_2025.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/17203/1/IV_FIN_107_TE_Mora_Lopez_Valeria_Claudia_2025.pdf)
- Murillo, J., G. Rodríguez, G., Roncallo, B., Amparo, L. y Rebeca, R. (2014). Efecto de la aplicación de prácticas sostenibles en las características físicas, químicas y microbiológicas de suelos degradados. *Pastos y Forrajes*, 37(3), 270-278. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0864-03942014000300003](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0864-03942014000300003)

- Niinemets, Ü. (2010). Responses of forest trees to single and multiple environmental stresses from seedlings to mature plants: Past stress history, stress interactions, tolerance and acclimation. *Forest Ecology and Management*, 260(10), 1623-1639. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.054>.
- Oliva, D. (2009). *Determinación de la acidez intercambiable (Al+3+H+) a partir del pH para la estimación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua* [Tesis de pregrado, Universidad Zamorano]. <https://bdigital.zamorano.edu/items/f91e694d-8d89-4016-bef3-fbc5f741e6de>
- Oré, L., Huamán, J., Rengifo, J., Loarte, W., y Oré J. (2022). Evaluación de la calidad de suelo en sistemas de uso: agroforestal, cultivos de coca y Bosque Secundario en el sector Cora Cora - Leoncio Prado, 2022. *Revista Científica y Tecnológica FitoVida*, 1(1), 24-32. <https://revistas.unid.edu.pe/index.php/FitoVida>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2007). *Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)*. Portal de Suelos de la FAO. FAO. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2021). *Degradación del suelo*. Portal de Suelos de la FAO. FAO. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2020). *Documento de posición sobre “restauración ecosistémica” de los ecosistemas productivos, en el contexto de la ONU década de restauración de ecosistema 2021-2030*. FAO. <https://www.fao.org/3/nd651en/nd651en.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2015). *Los suelos almacenan y filtran el agua, mejorando la seguridad alimentaria y nuestra resiliencia a las inundaciones y sequías*. FAO. <https://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/326296/>
- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático [IPCC]. (2000). *Land use, land use change, and forestry special report*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srl-en-1.pdf>
- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático [IPCC]. (2003). *Good practice guidance for land use, land use change and forestry*. IGES. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/GPG\\_LULUCF\\_FULLEN.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/GPG_LULUCF_FULLEN.pdf)

- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático [IPCC]. (2007). *Mitigación del cambio climático*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/02/ar4-wg3-sum-vol-sp.pdf>
- Panel Técnico Intergubernamental sobre Suelos [ITPS]. (2020). *Towards a definition of soil health*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/ffb5feaf-8388-4e2f-b319-2260a9a6f5a2/content>
- Pereira, L., Balbinot, L., Nnadi, E., Mosleh, M., & Tonello, K. (2022). Effects of Cerrado restoration on seasonal soil hydrological properties and insights on impacts of deforestation and climate change scenarios. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.882551>
- Pérez, J. (2022). *Estudio comparativo de captura de carbono mediante el cálculo de la biomasa aérea total entre plantaciones de Inga edulis C. Martius “guaba” en suelos ex cicales en Tingo María* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/13991ba6-1ddc-48f4-ba5d-00a3eae3b0f5>
- Pesantes, W. (2015). *Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea de una plantación de cedro rosado (Acrocarpus fraxinifolius), en la parroquia río blanco, Cantón Morona* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja]. Repositorio UNL. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/9969/1/TESIS%20FINAL.pdf>
- Pineda, A., Vásquez, S., Chávez, J., & Cueva, M. (2017). Biomass production and nutrient contribution of *Inga edulis* in cacao-based agroforestry systems in the Amazon region of Ecuador. *Agroforestería en las Américas*, 51(2), 25–33. <https://doi.org/10.18845/rea.v51i2.3081>
- Piscitelli, M. (2016). Degradación de los suelos. Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires. <https://www.unicen.edu.ar/content/degradaci%C3%B3n-de-los-suelos>
- Powell, M. H. (1996). Species tolerant of acid soils (Appendix A: Nitrogen fixing tree highlights). En: *Nitrogen fixing trees for acid soils- A field manual*. Ed. Winrock International, Morrilton, pp. 51-91.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2019, 1 de marzo). *Nueva Década de la ONU para la Restauración de los Ecosistemas, una gran oportunidad para la seguridad alimentaria y la acción climática*. [Comunicado de prensa]. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/nueva-decada-de-la-onu-para-la-restauracion-de-los>

- Pulgar, J. (1987). *Geografía del Perú* (9ª ed.). Inca, S.A.
- Quijia-Quijia, M., Castillo-Torres, S., Vasquez-Castillo, W. y Racines-Oliva, M. (2020). Fenología floral de la guaba (*Inga edulis*) en un valle interandino del Ecuador. *Enfoque UTE*, 11(3), 25-34. <https://doi.org/10.29019/enfoque.v11n3.526>
- Ramalho, P. 2014. *Especies Arbóreas Brasileira*. EMBRAPA
- Renaud, V., & Rebetez, M. (2009). Comparison between open-site and below-canopy climatic conditions in Switzerland during the exceptionally hot summer of 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(5), 873-880. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.11.006>.
- Revell, N., Lashford, C., Rubinato, M., & Blackett, M. (2022). The impact of tree planting on infiltration dependent on tree proximity and maturity at a clay site in Warwickshire, England. *Water*, 14(6), 892. <https://doi.org/10.3390/w14060892>
- Reynel, C., Pennington, R., Pennington, T., Flores, C. y Daza, A. (2003). Árboles útiles de la Amazonía peruana y sus usos: Un manual con apuntes de identificación, ecología y propagación de las especies. ICRAF. Lima, PE. 537 p.
- Rodríguez, A. (2022). Brasil y Bolivia concentran el 90% de la deforestación y degradación de la Amazonia. El país. <https://elpais.com/america-futura/2022-09-05/brasil-y-bolivia-concentran-el-90-de-la-deforestacion-y-degradacion-de-la-amazonia.html>
- Rodríguez, L. (2017). Las condiciones microclimáticas en algunos espacios exteriores cubiertos. II Encuentro Latino-Americano Europeo sobre Edificaciones y Comunidades Sostenibles: Euro Elecs 2017, São Leopoldo/Rs.
- Román, W., Martínez, A., Benítez, M., Gutiérrez, M., y Morejón, M. (2022). Servicios ambientales de tres sistemas silvopastoriles introducidos en la provincia de Cotopaxi, Ecuador. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 10(2), 262-277. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2310-34692022000200262](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2310-34692022000200262)
- Rueda, C. (2014). *Estimación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de una plantación de Inga edulis en Campo Verde, Ucayali* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Molina]. Repositorio institucional La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/2361>
- Sahagún-Sánchez, F. y Reyes-Hernández, H. (2018). Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental, México. *Ciencia UAT*, 12(2), 6-21. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-78582018000100006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-78582018000100006&lng=es&tlng=es).

- Sanz, I. (2013). La captura y almacenamiento de carbono: una novedosa técnica de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero regulada por la Unión Europea. *Revista de la Facultad de Derecho*, 70, 165-186.
- Segura, M. (1999). *Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados en el Área de Conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica* [Tesis de Maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio Institucional del CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/4298>
- Segura, M., Kanninen, M., & Suárez, D. (2006). Modelos alométricos para estimar la biomasa aérea de árboles de sombra y cafetos cultivados juntos. *Agroforestry Systems*, 68(2), 143-150. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10457-006-9005-x>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia. (s.f.). *Manual práctico de terminología meteorológica e hidrológica para la difusión masiva del dato y su uso en la gestión de riesgo*. [https://www.senamhi.gob.bo/publicaciones/Manuales/Manual\\_de\\_terminologia/Manual\\_de\\_terminologia.pdf](https://www.senamhi.gob.bo/publicaciones/Manuales/Manual_de_terminologia/Manual_de_terminologia.pdf)
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI]. (2024). *Datos Hidrometeorológicos a nivel nacional. Estación: Tingo María*. SENAMHI. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>
- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre [SERFOR]. (2018). *Orientaciones para la restauración de ecosistemas forestales y otros ecosistemas de vegetación silvestre*. SERFOR.
- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre [SERFOR]. (2021). *Evaluación de resultados año 2020 plan estratégico institucional (PEI) 2019-2024*. SERFOR.
- Silva, J., y Olaya, L. (2019). *Cuantificación de carbono almacenado en un sistema agroforestal de café (Coffea arabica L.), asociado con guaba (Inga edulis sp.), distrito Jaén – Cajamarca*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Jaén]. Archivo digital. [http://repositorio.unj.edu.pe/bitstream/UNJ/133/1/Silva\\_LJC\\_Olaya\\_SL.pdf](http://repositorio.unj.edu.pe/bitstream/UNJ/133/1/Silva_LJC_Olaya_SL.pdf)
- Supo, J., y Zacarías, H. (2020). *Metodología de la investigación científica*. Bioestadístico EEDU EIRL.
- Tondoh, E. J., & Lavelle, P. (2005). Population dynamics of *Hyperiodrilus africanus* (Oligochaeta, Eudrilidae) in Ivory Coast. *Journal of Tropical Ecology*, 21, 493-500.
- United States Department of Agriculture. (1996). *Soil survey laboratory methods manual. Soil Survey Investigations. Versión 3*. Department of Agriculture, Washington.

- Vanegas, M. (2016). Manual de mejores prácticas de restauración de ecosistemas degradados, utilizando para reforestación solo especies nativas en zonas prioritarias. CONAFOR, CONABIO, GEF-PNUD.
- Vargas, Y. y Valdivia, L. (2005). Recuperación, mediante leguminosas rastreras, de suelos degradados (ex cocales) en la Selva Alta del Perú. *Mosaico científico*, 2(2), 78-83.
- Vargas-Gálvez, C., Yurrita, C., Bustamante-Catillo, M. y Barrios-Izás, M. (2018). Análisis del uso de los bienes y servicios ecosistémicos de una comunidad rural del oriente de Guatemala. *Perspectivas rurales*, 17(33), 132-152.
- Vásquez, J. L. (2015). Estimación del contenido de carbono aéreo almacenado en un sistema agroforestal cacao (*Theobroma cacao*) – guaba (*Inga edulis*) y el suelo en Tulumayo UNAS. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/1099>
- Villagaray, S. (2014). Recuperación de terrenos degradados por el cultivo de coca (*Erythroxylon coca*) En VRAEM, Perú, con aplicación de Tecnología Agroforestal. *ActaNova*, 6(3), 210-224. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1683-07892014000100004](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892014000100004)
- Villasanti, C. y Roman, P. (2013). El manejo del suelo en la producción de hortalizas con buenas prácticas agrícolas. FAO. <https://www.fao.org/3/i3361s/i3361s.pdf>
- Walkley, A. y Black, IA (1934) Un examen del método Degtjareff para determinar el carbono orgánico en los suelos: efecto de las variaciones en las condiciones de digestión y de los componentes inorgánicos del suelo. *Ciencia del suelo*, 63, 251-263. <https://doi.org/10.1097/00010694-194704000-00001>
- Zamudio, A., Carrascal, C., Pulido, J., Gallardo, E., Avila, M., Vargas, A., y Vera, D. (2006). *Métodos analíticos de laboratorio de suelos* (6ª ed.). Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- Zhang, Y., Zhou, J., Lei, Z., Ren, H., & Chen, H. (2024). Effect of acid production from forest litter on the availability of heavy metals in soil. *Forests*, 15(12), 2097. <https://doi.org/10.3390/f15122097>

## **Anexos**

**Tabla 12.** Matriz de consistencia.

Título: Influencia de <i>Inga edulis</i> (guaba) en la recuperación y regulación de servicios ecosistémicos en un suelo degradado en Tingo María, Perú											
Problema general	Objetivos	Hipótesis	Variables	Subvariables	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida	Aspectos metodológicos			
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Recuperación de servicios ecosistémicos	Recuperación del suelo	Características físicas	Textura-	%	<b>Enfoque de investigación:</b> Cuantitativo, porque la recolección de datos será con base en la medición numérica de las variables (Hernández et al., 2014).			
¿Cómo influye la <i>I. edulis</i> en la recuperación y regulación de los servicios ecosistémicos en un suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María?	Evaluar la influencia de la <i>I. edulis</i> en la recuperación y regulación de los servicios ecosistémicos en un suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María.	La especie <i>I. edulis</i> influye favorablemente en la recuperación y regulación de los servicios ecosistémicos en un suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María.				Temperatura y H° del suelo	°C y %		Densidad aparente	g/cm <sup>3</sup>	<b>Tipo de investigación:</b> Según el número de ocasiones en que se medirá las variables de estudio será longitudinal (Supo, 2014).
						Porosidad efectiva	m	Compactación	kg/cm <sup>2</sup>		
						Infiltración del agua	cm/h			<b>Nivel de investigación:</b> Descriptivo porque se buscará especificar las características físicas, químicas y biológicas, elementos del clima y secuestro de carbono atmosférico (Hernández et al., 2014).	
Problemas específicos	Objetivos específicos:	Hipótesis específicas						Características químicas	pH	Adimensional	<b>Diseño de la investigación:</b> No experimental porque no se manipulará las variables en estudio (Hurtado, 2012).
¿Qué influencia tendrá la <i>I. edulis</i> en la recuperación de un suelo degradado en relación a sus características físicas, químicas y biológicas del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva?	Determinar la influencia de la <i>I. edulis</i> en la recuperación de un suelo degradado en relación a sus características físicas, químicas y biológicas del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva	La <i>I. edulis</i> permite favorablemente la recuperación de un suelo degradado en relación a sus características físicas, químicas y biológicas del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva				Macroelementos (N, P y K)	%		CIC	(cmol (+) / kg) ó mEq/100 g	
					Materia orgánica	%				<b>Muestra:</b> Se tomará en el marco de los protocolos y procedimientos que existen de acuerdo a los indicadores previstos para el estudio.	
¿Cómo influye la sombra de la <i>I. edulis</i> en la regulación del microclima en relación a la humedad y temperatura ambiental en un suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva?	Determinar la influencia de la sombra de <i>I. edulis</i> en la regulación del microclima en relación a la humedad y temperatura ambiental en un suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.	La <i>I. edulis</i> posibilita la regulación del microclima en relación a la humedad y temperatura ambiental en un suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva				Regulación del microclima	Elementos del microclima	Abundancia de lombrices	Individuos/m <sup>2</sup> y por ha.	<b>Muestreo:</b> Probabilístico	
								Biomasa de lombrices	g/m <sup>2</sup> y g/ha	<b>Técnicas e instrumentos de recolección de datos:</b>	
								Humedad ambiental	%	<b>Técnica:</b> Observación no experimental	
						Temperatura ambiental	°C	<b>Instrumento:</b> Instrumentos mecánicos de medición (Muestreador de suelos, penetrómetro, infiltrómetro, etc.).			
¿Cómo influye la <i>I. edulis</i> en la regulación del clima con respecto al secuestro de carbono atmosférico en un suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva?	Estimar la influencia de la <i>I. edulis</i> en la regulación del clima con respecto al secuestro de carbono atmosférico en un suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.	La <i>I. edulis</i> contribuye en la regulación del clima con respecto al secuestro de carbono atmosférico en un suelo degradado del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.	Regulación de servicios ecosistémicos	Regulación del clima	Secuestro de carbono atmosférico	Almacenamiento de carbono sobre el suelo	t/ha	<b>Técnicas de análisis de datos:</b>			
							Almacenamiento de carbono bajo el suelo	t/ha	Estadística descriptiva e inferencial		



Registro para determinar carbono radicular

**Almacenamiento de carbono en la plantación de *I. edulis***

Fecha:

GPS:

Evaluador:

<b>BIOMASA RADICULAR</b>							<b>CR</b>
<b>Campo</b>		<b>Gabinete</b>					
Subparcela/profundidad		Peso Fresco MV(g)	Peso Submuestra MV (g)	Peso seco Submuestra MS (g)	Peso seco m <sup>2</sup> (Kg)	Peso seco MS t ha <sup>-1</sup>	t ha <sup>-1</sup>
A	0 - 10						
	10 - 20						
	20 - 30						
B	0 - 10						
	10 - 20						
	20 - 30						
C	0 - 10						
	10 - 20						
	20 - 30						
D	0 - 10						
	10 - 20						
	20 - 30						

Registro para determinar carbono orgánico del suelo

**Almacenamiento de carbono en la plantación de *I. edulis***

Fecha:

GPS:

Evaluador:

Subparcela/profundidad	<b>Densidad aparente</b>			<b>Materia orgánica</b>			<b>COS</b> (t ha <sup>-1</sup> )
	Peso Húmedo (g)	Peso Seco a la estufa (g)	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Peso submuestra de suelo (g)	%MO	%CO	
A	0 - 10						
	10 - 20						
	20 - 30						
B	0 - 10						
	10 - 20						
	20 - 30						
C	0 - 10						
	10 - 20						
	20 - 30						
D	0 - 10						
	10 - 20						
	20 - 30						



# ANÁLISIS DE SUELOS



SOLICITANTE: DOLORES TINED GERLY NAOMI  
 PROCEDENCIA: TINGO MARIA - HUANUCO

FECHA DE REPORTE: 25/01/2024  
 RECIBO N°: 34218

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS		ANÁLISIS MECÁNICO			ANÁLISIS FÍSICO		ANÁLISIS QUÍMICO							ANÁLISIS QUÍMICO											
			Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural	Humedad	Densidad Aparente	pH	CE	Materia Orgánica	N	C	P	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiables	Acidez Cambiable	Saturación de Aluminio	
			Ao	Arc	Lo		H°	Da		dS/m	M.O.	total	Orgánico	disponible	Calcio		Magnesio	Potasio	Sodio	Aluminio	Hidrógeno					
			CODIGO DEL LAB.	REFERENCIA	%	%	%	%	g/cm <sup>3</sup>	1:1	1:1	%	%	%	ppm	ppm	CAMBIABLES			Cmol(+)/kg			%	%	%	
1	S0018-1-2024	M 01	65.91	17.28	16.81	Franco Arenoso	7.58	0.81	5.03	0.041	2.96	0.148	1.718	1.832	123.489	---	1.830	0.296	0.172	0.074	2.630	1.170	6.172	38.429	61.571	42.613
2	S0018-2-2024	M 02	65.89	19.34	14.77	Franco Arenoso	9.22	0.87	5.05	0.043	3.12	0.156	1.810	2.100	128.418	---	1.870	0.314	0.175	0.084	2.310	1.290	6.043	40.425	59.575	38.227

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.  
 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 María  
 DR. HUBO ALBERTO ROSALES YUPANQUI  
 Director del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
 Tingo María  
 ING. GILMER MELIZA NEIRA TRUJILLO  
 Profesional del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

Figura 18. Resultado del ensayo en las muestras de suelos del año 2024.



# ANALISIS DE SUELOS



SOLICITANTE:	DOLORES TINEO GERLLY NAOMI	FECHA DE MUESTREO:	26/02/2024
PROCEDENCIA:	BRUNAS - TINGO MARIA - RUPA RUPA - LEONCIO PRADO - HUANUCO	FECHA DE RECEPCIÓN:	26/02/2024
CULTIVO:	---	FECHA DE REPORTE:	29/02/2023
REFERENCIA:	--	RECIBO N°:	37706

## RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS		ANÁLISIS FÍSICO		ANÁLISIS QUÍMICO		
			Húmedad	Densidad Aparente	Materia Orgánica	N	C
			H°	Ds	M.O.	total	Orgánico
CODIGO DEL LAB.	CODIGO DEL SOLICITANTE	%	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%	
1	S334	P1-M1 0-10	35.06	1.04	1.31	0.066	0.760
2	S335	P1-M1 10-20	29.51	1.17	0.98	0.049	0.570
3	S336	P1-M1 20-30	31.56	1.08	0.66	0.033	0.380
4	S337	P1-M2 0-10	32.87	1.18	2.29	0.116	1.330
5	S338	P1-M2 10-20	29.51	1.14	1.38	0.069	0.798
6	S339	P1-M2 20-30	37.72	1.08	1.11	0.058	0.646
7	S340	P2-M1 0-10	45.58	1.05	1.25	0.062	0.722
8	S341	P2-M1 10-20	42.79	1.12	1.05	0.052	0.608
9	S342	P2-M1 20-30	38.48	1.16	0.92	0.046	0.532
10	S343	P2-M2 0-10	49.89	0.92	2.56	0.128	1.482
11	S344	P2-M2 10-20	41.18	1.13	1.31	0.066	0.760
12	S345	P2-M2 20-30	41.47	1.19	1.05	0.052	0.608

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.  
 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 María

*[Firma]*  
Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI  
Jefe del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
Tingo María

*[Firma]*  
Ing° GILMER NELSON NEIRA TINJILLO  
Profesional del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - CELULAR 944407531

Figura 19. Resultados del ensayo en las muestras de suelo del año 2024.



# ANALISIS DE SUELOS



SOLICITANTE:	GERILLY NAOMI DOLORES TINED	FECHA DE REPORTE:	29/01/2025
PROCEDENCIA:	Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BUUNAS)	TIPO DE MUESTRA:	SUELO
REFERENCIA:	TINGO MARIA	MUESTREADO POR:	SOLICITANTE

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS		ANALISIS FISICO					ANALISIS QUIMICO																	
			HUMEDAD HR	Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural	CE dS/m	pH	Materia Orgánica	N total	C Orgánico	P disponible	K <sub>2</sub> O	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICs	Bases Cambiables %	Acidez Cambiable %	Saturación de Aluminio %
				Ar	Ar	Lo				M.O.						Calcio	Magnesio	Potasio	Sodio	Aluminio	Hidrogeno				
			CODIGO DEL LABORATORIO	REP	%	%	%	%	1:1	1:1	%	%	%	ppm	ppm										
1	S-1469-1	M 1	27.33	59	18	23	Franco Arenoso	0.02	4.55	2.28	0.113	1.310	4.768	60.738	—	2.460	0.308	0.111	0.076	1.575	0.075	4.665	64.170	35.630	34.202
2	S-1469-2	M 2	26.26	67	14	19	Franco Arenoso	0.02	4.48	2.72	0.136	1.579	4.665	50.133	—	1.770	0.232	0.105	0.065	2.965	0.615	5.771	37.621	62.379	51.723

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LAGAS.  
 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 María

*[Firma]*

Dr. HUGO ALFREDO HUASMANI TUPANCHE  
 Jefe Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



Figura 20. Resultados del ensayo en las muestras de suelo del año 2025.



# ANÁLISIS DE SUELOS



SOLICITANTE:	GERLLY NAOMI DOLORES TINEO	FECHA DE REPORTE:	29/01/2025
PROCEDENCIA:	Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva	TIPO DE MUESTRA:	SUELO
REFERENCIA:	TINGO MARIA	MUESTREADO POR:	EL SOLICITANTE

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS		RESULTADOS					
			Materia Orgánica	N	C	D aparente	Porosidad	HUMEDAD
	CODIGO DEL LABORATORIO	CODIGO DEL SOLICITANTE	M.O. %	total %	Orgánico %	g/cm <sup>3</sup>	%	%
1	S-1470-1	P1M1 ( 0-10)	2.14	0.107	1.242	1.171	55.808	28.850
2	S-1470-2	P1M1 ( 0-20)	1.50	0.075	0.869	1.179	55.522	25.911
3	S-1470-3	P1M1 ( 0-30)	1.12	0.056	0.652	1.075	59.432	26.186
4	S-1470-4	P1M2 ( 0-10)	3.43	0.171	1.987	0.926	65.065	35.291
5	S-1470-5	P1M2 ( 0-20)	2.25	0.112	1.304	0.995	62.445	30.705
6	S-1470-6	P1M2 ( 0-30)	1.71	0.086	0.993	1.140	56.969	31.777
7	S-1470-7	P2M1 ( 0-10)	3.05	0.153	1.770	0.859	67.567	35.729
8	S-1470-8	P2M1 ( 0-20)	2.46	0.123	1.428	1.109	58.163	32.487
9	S-1470-9	P2M1 ( 0-30)	1.39	0.070	0.807	0.949	64.189	40.500
10	S-1470-10	P2M2 ( 0-10)	2.57	0.128	1.490	0.862	67.479	44.956
11	S-1470-11	P2M2 ( 0-20)	2.46	0.123	1.428	0.957	63.889	35.684
12	S-1470-12	P2M2 ( 0-30)	1.34	0.067	0.776	0.973	63.275	40.674

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.  
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

*[Handwritten Signature]*  
Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI  
Jefe Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



Figura 21. Resultados del ensayo en las muestras de suelo del año 2025.

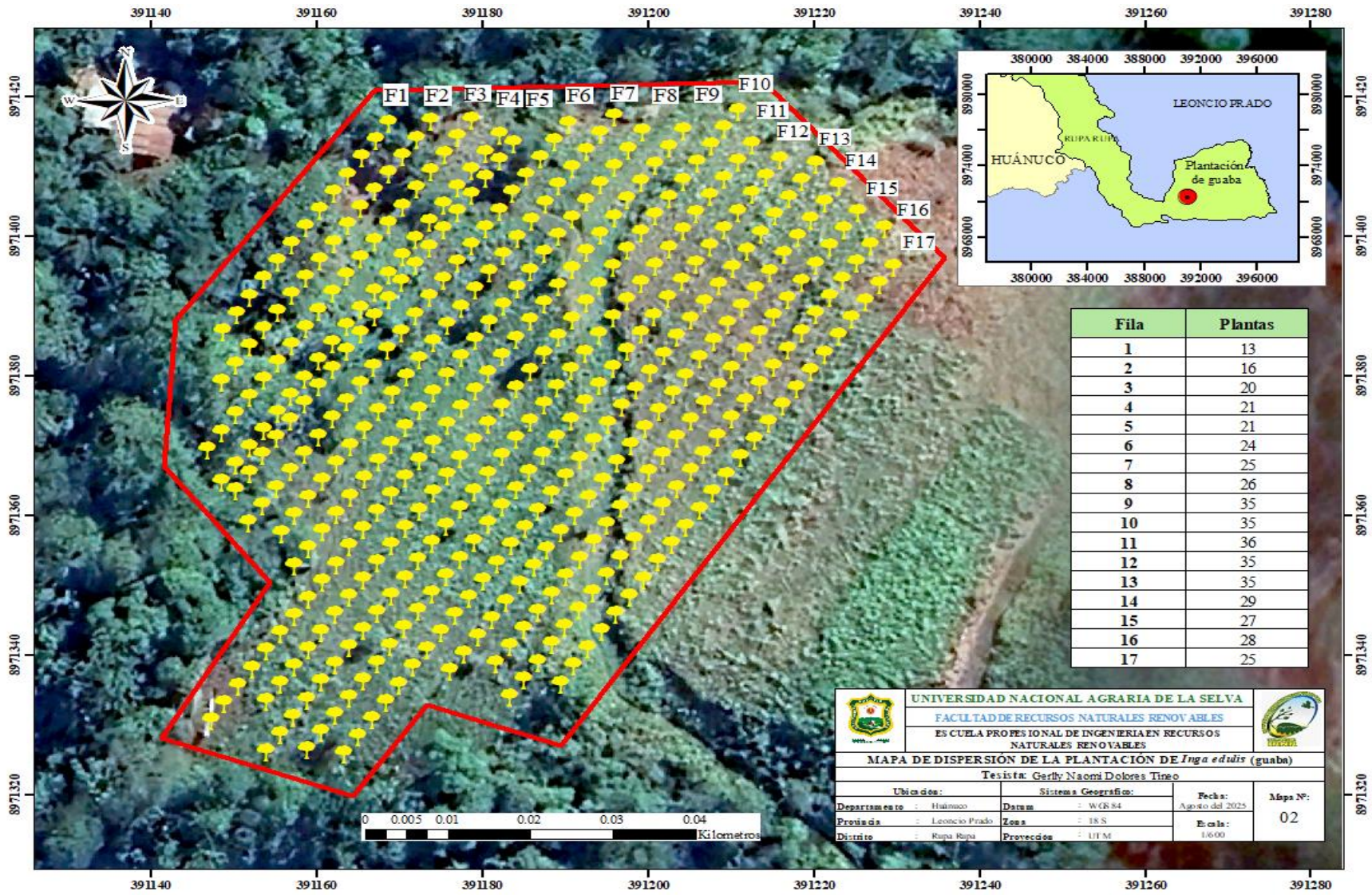


Figura 22. Mapa de dispersión de la plantación de *I. edulis*.

**Tabla 13.** Contenido de humedad en distintas profundidades del suelo degradado con plantación de *I. edulis*.

Puntos de muestreo	Profundidad (cm)	Media inicial (%)	Media final (%)
1	0 a 10	35,06	28,85
1	10 a 20	29,51	25,91
1	20 a 30	31,56	26,19
1	0 a 10	32,87	35,29
1	10 a 20	29,51	30,71
1	20 a 30	37,72	31,78
2	0 a 10	45,58	35,73
2	10 a 20	42,79	32,49
2	20 a 30	38,46	40,50
2	0 a 10	49,89	44,96
2	10 a 20	41,18	35,68
2	20 a 30	41,47	40,67

**Tabla 14.** Nivel de densidad aparente en distintas profundidades del suelo degradado con plantación de *I. edulis*.

Punto	Profundidad (cm)	Media inicial (g/cm <sup>3</sup> )	Media final (g/cm <sup>3</sup> )
1	0 a 10	1,04	1,17
1	10 a 20	1,17	1,18
1	20 a 30	1,08	1,08
1	0 a 10	1,18	0,93
1	10 a 20	1,14	1,00
1	20 a 30	1,08	1,14
2	0 a 10	1,05	0,86
2	10 a 20	1,12	1,11
2	20 a 30	1,16	0,95
2	0 a 10	0,92	0,86
2	10 a 20	1,13	0,96
2	20 a 30	1,19	0,97

**Tabla 15.** Contenido de la porosidad en distintas profundidades del suelo degradado con plantación de *I. edulis*.

<b>Punto</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Media inicial (%)</b>	<b>Media final (%)</b>
1	0 a 10	60,75	55,81
1	10 a 20	55,85	55,51
1	20 a 30	59,25	59,43
1	0 a 10	55,47	65,06
1	10 a 20	56,98	62,45
1	20 a 30	59,25	56,98
2	0 a 10	60,38	67,58
2	10 a 20	57,74	58,15
2	20 a 30	56,23	64,19
2	0 a 10	65,28	67,47
2	10 a 20	57,36	63,89
2	20 a 30	55,09	63,28

**Tabla 16.** Nivel de compactación y temperatura del suelo degradado con plantación de *I. edulis*.

<b>Punto</b>	<b>Compactación</b>	<b>Compactación final</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Temperatura final (°C)</b>
1	1,67	1,53	27	29
2	1,27	1,38	28	27
3	1,78	1,00	28	26
4	1,69	1,25	29	25
5	1,19	1,13	29	25
6	1,99	1,84	30	26
7	1,06	1,05	27	25

**Tabla 17.** Cantidad y peso de *L. terrestris* encontradas en el suelo de una plantación de *I. edulis* al inicio de la investigación.

Monolito	Profundidad (cm)	<i>L. terrestris</i> adultas	Huevos	Total	Peso (g)
1	0 a 10	110	10	120	20,4244
1	10 a 20	8	3	11	2,573
1	20 a 30		1	1	0,0290
2	0 a 10	8		8	0,9872
2	10 a 20			0	
2	20 a 30			0	
3	0 a 10	11		11	0,5156
3	10 a 20	1		1	0,1613
3	20 a 30			0	
4	0 a 10	29	1	30	3,0868
4	10 a 20	4		4	0,3582
4	20 a 30		1	1	0,0290
5	0 a 10	15	3	18	1,4923
5	10 a 20	1		1	0,0773
5	20 a 30			0	
6	0 a 10	9		9	0,8146
6	10 a 20	1		1	0,0414
6	20 a 30			0	
7	0 a 10	49		49	6,1725
7	10 a 20			0	
8	0 a 10	27		27	2,1051
8	10 a 20			0	
9	0 a 10	50		50	4,8305
9	10 a 20	3	1	4	0,1299

Monolitos 7 8 y 9 corresponden a los monolitos de 50 cm x 50 cm y 20 cm de profundidad

**Tabla 18.** Cantidad y peso de *L. terrestris* encontradas en el suelo de una plantación de *I. edulis* a 12 meses de iniciada la investigación.

Monolito	Profundidad (cm)	<i>L. terrestris</i> adultas	Huevos	Total	Peso (g)
1	0 a 10	35	31	66	9,468
1	10 a 20	16	21	37	7,4985
1	20 a 30	1		1	0,1018
2	0 a 10	28	2	30	2,2924
2	10 a 20	2		2	0,8286
2	20 a 30			0	
3	0 a 10	21	3	24	3,4817
3	10 a 20		3	3	0,894
3	20 a 30		3	3	0,885
4	0 a 10	9	1	10	1,5236
4	10 a 20			0	
4	20 a 30	1	1	2	0,0713
5	0 a 10	1	2	3	0,2284
5	10 a 20			0	
5	20 a 30			0	
6	0 a 10	13		13	1,2874
6	10 a 20			0	
6	20 a 30			0	
7	0 a 10	1		1	0,0452
7	10 a 20	1	1	2	0,1000
8	0 a 10	13		13	2,3038
8	10 a 20	1		1	0,906
9	0 a 10	7	3	10	1,3261
9	10 a 20	4	12	16	1,4518

Monolitos 7 8 y 9 corresponden a los monolitos de 50 cm x 50 cm y 20 cm de profundidad

**Tabla 19.** Temperatura y humedad ambiental registrados bajo dosel de *I. edulis* y en espacio abierto.

Estado	Fecha	Hora	Temp. BD (°C)	HR BD (%)	Temp. EA (°C)	HR EA (%)
Lluvia	6/07/2024	00:00	20,3	93,9	20,2	93,6
Lluvia	6/07/2024	01:00	19,8	94,9	19,9	95,4
Lluvia	6/07/2024	02:00	19,9	95,1	20	95,3
Lluvia	6/07/2024	03:00	20	95,3	20	95,5
Lluvia	6/07/2024	04:00	19,6	95,8	19,6	96,4
Lluvia	6/07/2024	05:00	19,8	95,8	19,8	96,4
Lluvia	6/07/2024	06:00	19,8	96,3	19,7	96,6
Lluvia	6/07/2024	07:00	20	95	21,2	92,2
Lluvia	6/07/2024	08:00	21,4	93,1	28,7	64,1
Lluvia	6/07/2024	09:00	24,4	82,4	36,2	45,4
Lluvia	6/07/2024	10:00	27,3	68,5	41	33,8
Lluvia	6/07/2024	11:00	29	62,9	43,2	28,8
Lluvia	6/07/2024	12:00	30,8	58,7	44,8	27
Lluvia	6/07/2024	13:00	32,8	54,9	44	29,6
Lluvia	6/07/2024	14:00	32	58,6	45	28,8
Lluvia	6/07/2024	15:00	31,7	57,8	41,4	30,9
Lluvia	6/07/2024	16:00	31,3	56,9	42	33,5
Lluvia	6/07/2024	17:00	29,3	64,4	37,2	42,2
Lluvia	6/07/2024	18:00	25,4	74,2	26,1	71,7
Lluvia	6/07/2024	19:00	23,2	81,8	23,4	79,4
Lluvia	6/07/2024	20:00	23,1	83,5	23,7	82,1
Lluvia	6/07/2024	21:00	22,5	87,6	23,2	85,5
Lluvia	6/07/2024	22:00	22,3	89,3	22,8	87,2
Lluvia	6/07/2024	23:00	21,2	96,1	21,2	93,4
Lluvia	6/07/2024	24:00	20,6	97,1	20,6	95,5
Lluvia	15/09/2024	00:00	21,8	89,7	21,5	93,8
Lluvia	15/09/2024	01:00	21,4	88,4	20,8	94,5
Lluvia	15/09/2024	02:00	20,9	90,7	20,3	94,7
Lluvia	15/09/2024	03:00	20,7	90,3	20,4	94
Lluvia	15/09/2024	04:00	20	92,4	19,5	95,5

<b>Estado</b>	<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Temp. BD (°C)</b>	<b>HR BD (%)</b>	<b>Temp. EA (°C)</b>	<b>HR EA (%)</b>
Lluvia	15/09/2024	05:00	20,4	91,8	20,1	94,5
Lluvia	15/09/2024	06:00	20,5	90,7	20,3	92,5
Lluvia	15/09/2024	07:00	21,2	90,5	21,8	92,7
Lluvia	15/09/2024	08:00	21,6	88,2	21,9	90,4
Lluvia	15/09/2024	09:00	20,7	93,2	21,1	96,7
Lluvia	15/09/2024	10:00	20,5	93,7	21,2	95,9
Lluvia	15/09/2024	11:00	23	91	25,2	91,6
Lluvia	15/09/2024	12:00	22,8	89,6	24,1	92,7
Lluvia	15/09/2024	13:00	24,1	88,7	27,3	87,4
Lluvia	15/09/2024	14:00	25,8	83,8	30,3	80,1
Lluvia	15/09/2024	15:00	28,9	67,2	35	56,5
Lluvia	15/09/2024	16:00	30,3	64,1	34,7	56,4
Lluvia	15/09/2024	17:00	26,2	79,1	27	77,3
Lluvia	15/09/2024	18:00	24,2	79,7	23,6	82,2
Lluvia	15/09/2024	19:00	23,2	83,8	22,8	86,7
Lluvia	15/09/2024	20:00	22,4	87,6	22,4	89,1
Lluvia	15/09/2024	21:00	22,2	87,5	22	91,5
Lluvia	15/09/2024	22:00	22	88,9	21,8	93
Lluvia	15/09/2024	23:00	22	90,7	21,9	93,3
Lluvia	15/09/2024	24:00	21,9	89,9	21,8	91,4
Lluvia	22/12/2024	00:00	22,1	93	22	87,8
Lluvia	22/12/2024	01:00	21,6	96,2	21,7	90
Lluvia	22/12/2024	02:00	21,5	96,6	21,5	92,1
Lluvia	22/12/2024	03:00	21,5	96,4	21,4	91,5
Lluvia	22/12/2024	04:00	21,4	96,3	21,4	92,2
Lluvia	22/12/2024	05:00	21,4	97,9	21,3	92,5
Lluvia	22/12/2024	06:00	21,5	98,3	21,6	93,6
Lluvia	22/12/2024	07:00	21,7	98,5	22,5	93,7
Lluvia	22/12/2024	08:00	22,7	96,8	23,7	91,8
Lluvia	22/12/2024	09:00	23	96,8	24	90,4
Lluvia	22/12/2024	10:00	23,8	93	27,9	84,7
Lluvia	22/12/2024	11:00	27,9	82,3	32,7	64,7

<b>Estado</b>	<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Temp. BD (°C)</b>	<b>HR BD (%)</b>	<b>Temp. EA (°C)</b>	<b>HR EA (%)</b>
Lluvia	22/12/2024	12:00	29,8	79,1	36,1	54,6
Lluvia	22/12/2024	13:00	31,6	68,4	34,2	58,6
Lluvia	22/12/2024	14:00	32,6	59	31,6	63,9
Lluvia	22/12/2024	15:00	29	71,3	27,4	71,9
Lluvia	22/12/2024	16:00	25,5	81	25,6	80,6
Lluvia	22/12/2024	17:00	24,3	85,9	24,3	83,4
Lluvia	22/12/2024	18:00	23,5	92,2	22,9	87,8
Lluvia	22/12/2024	19:00	22,9	93,4	22,6	89,3
Lluvia	22/12/2024	20:00	23,1	93	22,5	89
Lluvia	22/12/2024	21:00	22,1	96,3	21,8	91,2
Lluvia	22/12/2024	22:00	22	96,1	22,1	90,2
Lluvia	22/12/2024	23:00	22	96,4	21,7	91,7
Lluvia	22/12/2024	24:00	21,6	97	21,7	92,6
Lluvia	28/12/2024	00:00	19,4	97,2	19,2	91,7
Lluvia	28/12/2024	01:00	19,1	97,7	19	94,2
Lluvia	28/12/2024	02:00	19,1	98,4	19,1	93,8
Lluvia	28/12/2024	03:00	19,3	98,8	19,6	93,3
Lluvia	28/12/2024	04:00	19,6	98,7	19,7	94
Lluvia	28/12/2024	05:00	19,7	98,4	20,1	93,6
Lluvia	28/12/2024	06:00	19,7	98,5	20,1	94,5
Lluvia	28/12/2024	07:00	20,3	97,6	22,3	86,2
Lluvia	28/12/2024	08:00	22	91,8	24,7	81,1
Lluvia	28/12/2024	09:00	23,8	84,6	27,1	72,9
Lluvia	28/12/2024	10:00	26,4	78,1	29,4	65,4
Lluvia	28/12/2024	11:00	28,3	68,8	31	61,3
Lluvia	28/12/2024	12:00	30,4	61,5	34,2	46,9
Lluvia	28/12/2024	13:00	32,8	53,1	35,6	48
Lluvia	28/12/2024	14:00	30,3	61,3	29,3	60,2
Lluvia	28/12/2024	15:00	25,6	83,2	29,7	76
Lluvia	28/12/2024	16:00	30,1	66,2	29	66,3
Lluvia	28/12/2024	17:00	27,5	74,9	26,4	75,3
Lluvia	28/12/2024	18:00	24,7	83,2	23,6	84,8

<b>Estado</b>	<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Temp. BD (°C)</b>	<b>HR BD (%)</b>	<b>Temp. EA (°C)</b>	<b>HR EA (%)</b>
Lluvia	28/12/2024	19:00	23	90,4	22,9	86,4
Lluvia	28/12/2024	20:00	23,1	90	23	86,6
Lluvia	28/12/2024	21:00	22,8	93,9	21,8	90,5
Lluvia	28/12/2024	22:00	21,8	98,7		
Lluvia	28/12/2024	23:00	21,2	99,1		
Lluvia	28/12/2024	24:00	20,8	99,3		
Lluvia	1/07/2025	00:00	21,2	99,4	21,5	91,4
Lluvia	1/07/2025	01:00	21,2	99	21,4	91,6
Lluvia	1/07/2025	02:00	21,1	98,4	21,3	92,2
Lluvia	1/07/2025	03:00	21	100	21,1	95,2
Lluvia	1/07/2025	04:00	20,9	100	21	95,8
Lluvia	1/07/2025	05:00	20,8	100	20,9	96,8
Lluvia	1/07/2025	06:00	20,3	100	20,4	97,2
Lluvia	1/07/2025	07:00	20,7	100	20,9	97,3
Lluvia	1/07/2025	08:00	21,5	100	22	95,4
Lluvia	1/07/2025	09:00	22,2	99,7	23,1	94,1
Lluvia	1/07/2025	10:00	23,6	97,5	25,1	91,3
Lluvia	1/07/2025	11:00	26,6	96	27,4	87,3
Lluvia	1/07/2025	12:00	27,3	86,4	29,4	82,6
Lluvia	1/07/2025	13:00	28,7	77,7	30,7	74,6
Lluvia	1/07/2025	14:00	28	71,5	27,7	70,4
Lluvia	1/07/2025	15:00	30,8	69,8	28,7	71,4
Lluvia	1/07/2025	16:00	37,1	49,3	29,5	70,2
Lluvia	1/07/2025	17:00	29,5	63,9	27,9	70,8
Lluvia	1/07/2025	18:00	24,3	84,5	24,5	82,5
Lluvia	1/07/2025	19:00	22,8	91,1	22,4	89,1
Lluvia	1/07/2025	20:00	21,9	95,7	21,9	90,4
Lluvia	1/07/2025	21:00	22	97,1	22	92,3
Lluvia	1/07/2025	22:00	21,8	97,7	22	90,6
Lluvia	1/07/2025	23:00	21,7	98	21,9	90,5
Lluvia	1/07/2025	24:00	21,5	97,4	21,8	91,9
Sol	12/09/2024	00:00	21,9	84,2	22	84,6

<b>Estado</b>	<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Temp. BD (°C)</b>	<b>HR BD (%)</b>	<b>Temp. EA (°C)</b>	<b>HR EA (%)</b>
Sol	12/09/2024	01:00	21,6	85,8	21,6	85,7
Sol	12/09/2024	02:00	21,5	85,7	21,2	87,6
Sol	12/09/2024	03:00	21	87,2	20,8	89
Sol	12/09/2024	04:00	20,8	87,7	20,5	89,8
Sol	12/09/2024	05:00	20,1	89,9	19,6	93,5
Sol	12/09/2024	06:00	19,8	91,3	19,7	93,2
Sol	12/09/2024	07:00	20,7	89,6	21,6	90,5
Sol	12/09/2024	08:00	23	83,4	27,3	70,6
Sol	12/09/2024	09:00	26,3	68,7	34,2	52,8
Sol	12/09/2024	10:00	29,8	57,9	41,1	37,9
Sol	12/09/2024	11:00	33,2	47,7	42,7	32,2
Sol	12/09/2024	12:00	35,7	42,5	45,5	27,9
Sol	12/09/2024	13:00	37,7	37,9	45,6	28,5
Sol	12/09/2024	14:00	38,2	36,7	45,9	27,2
Sol	12/09/2024	15:00	36,3	39,8	39,2	36,8
Sol	12/09/2024	16:00	34,9	44,3	36,7	40,9
Sol	12/09/2024	17:00	32,5	47,6	32,8	47,9
Sol	12/09/2024	18:00	27,9	60,2	27	65,7
Sol	12/09/2024	19:00	25,9	66,4	25,1	71
Sol	12/09/2024	20:00	24,2	74,5	23,9	74,5
Sol	12/09/2024	21:00	23,3	78,9	23,4	77,9
Sol	12/09/2024	22:00	22,3	82,2	22,2	84,4
Sol	12/09/2024	23:00	21,8	85,2	21,5	87,2
Sol	12/09/2024	24:00	21,5	86,3	21,1	88,1
Sol	25/09/2024	00:00	20,5	86,7	20,1	89,6
Sol	25/09/2024	01:00	20,2	85,8	20,2	87,3
Sol	25/09/2024	02:00	19,8	86,6	19,5	88,8
Sol	25/09/2024	03:00	19,6	87,3	19,1	90,9
Sol	25/09/2024	04:00	19,2	88	18,6	92,7
Sol	25/09/2024	05:00	18,8	88	18,5	90,9
Sol	25/09/2024	06:00	18,4	89,6	18	94
Sol	25/09/2024	07:00	20,1	88,9	21,3	87,9

<b>Estado</b>	<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Temp. BD (°C)</b>	<b>HR BD (%)</b>	<b>Temp. EA (°C)</b>	<b>HR EA (%)</b>
Sol	25/09/2024	08:00	22,9	78,9	26,2	73
Sol	25/09/2024	09:00	28,1	61,9	31,4	52,5
Sol	25/09/2024	10:00	30,8	53,5	40,3	37,1
Sol	25/09/2024	11:00	34,5	43,5	45,7	29,3
Sol	25/09/2024	12:00	36,5	41,6	47,8	27,8
Sol	25/09/2024	13:00	37,7	35,9	46,2	27,3
Sol	25/09/2024	14:00	38,3	34,2	45,3	28,9
Sol	25/09/2024	15:00	39,4	29,6	45,2	24,1
Sol	25/09/2024	16:00	32,2	43,8	33,3	43,1
Sol	25/09/2024	17:00	30,2	54	31	53,1
Sol	25/09/2024	18:00	26,2	66,5	26,1	69,2
Sol	25/09/2024	19:00	25	70,8	24,3	74,4
Sol	25/09/2024	20:00	23,8	74,9	23,3	76,7
Sol	25/09/2024	21:00	22,9	77,3	22,5	79,1
Sol	25/09/2024	22:00	22,1	80,9	21,6	83,5
Sol	25/09/2024	23:00	21,3	83	20,8	86,2
Sol	25/09/2024	24:00	21,2	82,7	21	85,1
Sol	7/10/2024	00:00	21,5	87,2	21	91,8
Sol	7/10/2024	01:00	21,5	87,1	21,2	91,2
Sol	7/10/2024	02:00	20,8	86,8	20,2	92,2
Sol	7/10/2024	03:00	20,5	87,1	20	91,6
Sol	7/10/2024	04:00	20,3	86,3	20,1	89,2
Sol	7/10/2024	05:00	19,7	87,4	19,2	92,2
Sol	7/10/2024	06:00	19,5	87,9	19,4	92
Sol	7/10/2024	07:00	21,3	84,9	22,8	82,1
Sol	7/10/2024	08:00	24,3	78	27,4	70,3
Sol	7/10/2024	09:00	28,2	64,6	32,2	60,8
Sol	7/10/2024	10:00	32,6	48,9	41,2	35,9
Sol	7/10/2024	11:00	36,3	41,1	43,7	32,4
Sol	7/10/2024	12:00	38,5	39,1	44,6	33,6
Sol	7/10/2024	13:00	39	36,3	45,1	32,4
Sol	7/10/2024	14:00	38,8	36,5	41	34,1

<b>Estado</b>	<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Temp. BD (°C)</b>	<b>HR BD (%)</b>	<b>Temp. EA (°C)</b>	<b>HR EA (%)</b>
Sol	7/10/2024	15:00	35	49,2	37,1	43,4
Sol	7/10/2024	16:00	35,4	47,2	39,1	47,2
Sol	7/10/2024	17:00	33,3	48,2	34	47,6
Sol	7/10/2024	18:00	27,8	63,4	27,6	64,2
Sol	7/10/2024	19:00	25,6	67,4	25,4	71
Sol	7/10/2024	20:00	24,2	74,2	23,8	76,1
Sol	7/10/2024	21:00	23,9	76,9	23,7	79,4
Sol	7/10/2024	22:00	23	81,7	22,8	83,5
Sol	7/10/2024	23:00	22,7	83	22,3	86,8
Sol	7/10/2024	24:00	22,5	82,7	22	86,5
Sol	18/09/2024	00:00	20,9	87,3	20,9	90,1
Sol	18/09/2024	01:00	20,4	88,9	20,1	92
Sol	18/09/2024	02:00	20,2	90,7	19,8	93,6
Sol	18/09/2024	03:00	20	90,7	19,8	93,1
Sol	18/09/2024	04:00	19,9	90,8	19,8	93,7
Sol	18/09/2024	05:00	19,6	91,7	19,1	94,1
Sol	18/09/2024	06:00	19,9	91,7	19,9	94,3
Sol	18/09/2024	07:00	21,1	89,5	22,1	90,2
Sol	18/09/2024	08:00	23,5	82,3	28,6	68,7
Sol	18/09/2024	09:00	27,1	68,9	33,7	52,8
Sol	18/09/2024	10:00	30	59,4	40	41,3
Sol	18/09/2024	11:00	33	51,8	41,9	34
Sol	18/09/2024	12:00	34,4	48,5	45,4	30,5
Sol	18/09/2024	13:00	36	43,2	47,1	31,6
Sol	18/09/2024	14:00	33,6	46,1	38,2	38,7
Sol	18/09/2024	15:00	36	40,3	46	29,1
Sol	18/09/2024	16:00	35,2	39,2	38,1	36,5
Sol	18/09/2024	17:00	28,5	56,5	28,5	57,1
Sol	18/09/2024	18:00	25,2	68,4	25,3	70,4
Sol	18/09/2024	19:00	24,3	70,8	23,5	77,1
Sol	18/09/2024	20:00	23,8	75,2	23,1	79,9
Sol	18/09/2024	21:00	22,7	79,1	22,6	82,9

<b>Estado</b>	<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Temp. BD (°C)</b>	<b>HR BD (%)</b>	<b>Temp. EA (°C)</b>	<b>HR EA (%)</b>
Sol	18/09/2024	22:00	21,8	83,8	21,7	86,4
Sol	18/09/2024	23:00	21,6	85,9	21,4	87,7
Sol	18/09/2024	24:00	21,3	87	20,9	91,8
Sol	23/09/2024	00:00	20,5	92,2	20,3	94,9
Sol	23/09/2024	01:00	20	93,4	19,8	95,6
Sol	23/09/2024	02:00	19,7	93,2	19,3	95,2
Sol	23/09/2024	03:00	19,4	93,2	18,9	95,3
Sol	23/09/2024	04:00	19,6	93,7	19,6	95,5
Sol	23/09/2024	05:00	19,3	92,4	19,1	95,1
Sol	23/09/2024	06:00	18,5	92,3	18,1	95,4
Sol	23/09/2024	07:00	19,5	89,3	20,1	89,6
Sol	23/09/2024	08:00	21,9	81,1	25,7	76,2
Sol	23/09/2024	09:00	26,4	68,1	31,7	61,8
Sol	23/09/2024	10:00	29,9	60,6	36,8	45,2
Sol	23/09/2024	11:00	32,7	48,2	44,1	35,2
Sol	23/09/2024	12:00	35,1	41,8	43,6	31
Sol	23/09/2024	13:00	36,6	40,4	45,5	31,1
Sol	23/09/2024	14:00	37,9	36	44	28,8
Sol	23/09/2024	15:00	37,8	36,7	44,7	31
Sol	23/09/2024	16:00	34,5	44	35,1	43,6
Sol	23/09/2024	17:00	30,3	52,3	31,5	53,4
Sol	23/09/2024	18:00	27	54,1	26,5	57,5
Sol	23/09/2024	19:00	24,9	60,8	24,4	63,8
Sol	23/09/2024	20:00	24,3	61,2	23,7	65,4
Sol	23/09/2024	21:00	24,2	63,6	23,6	66,8
Sol	23/09/2024	22:00	23	68,2	22,6	70,8
Sol	23/09/2024	23:00	22,5	70,2	22,1	73,5
Sol	23/09/2024	24:00	21,8	73,4	21,5	74,8

BD: Bajo dosel; HR: Humedad relativa; EA: Espacio abierto.

Anexo C. Panel de fotografías



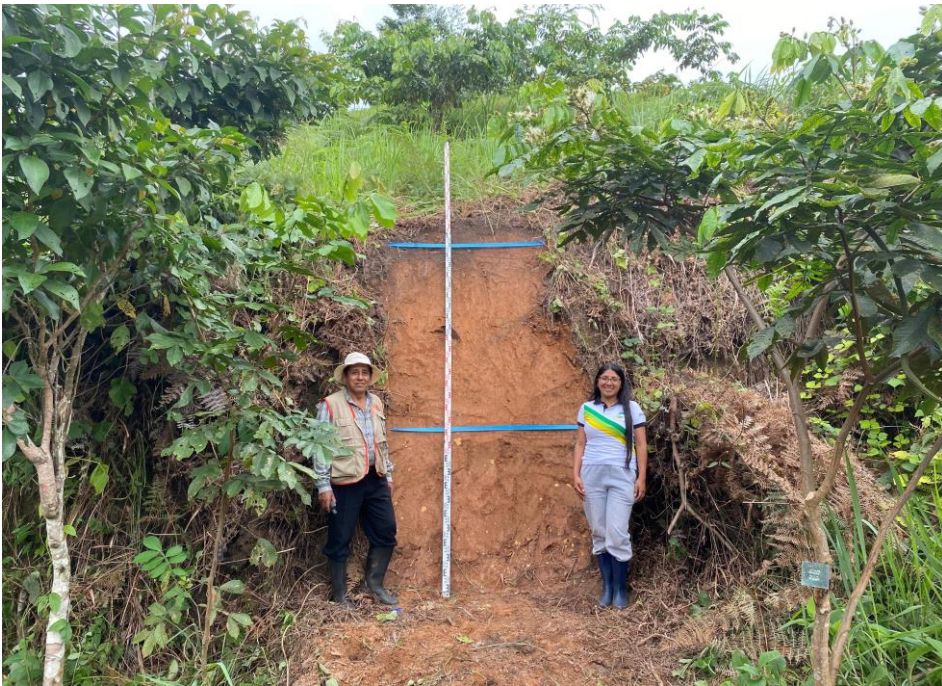
**Figura 23.** Muestreo del suelo para determinar la clase textural en la plantación de *I. edulis*.



**Figura 24.** Muestreo de los suelos en tres profundidades empleando cilindros metálicos para determinar la densidad aparente.



**Figura 25.** Medición de la profundidad efectiva en el año 2024.



**Figura 26.** Medición de la profundidad efectiva en el año 2025.



**Figura 27.** Medición de la compactación del suelo con penetrómetro de bolsillo ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ).



**Figura 28.** Instalación de 500 metros de manguera polietileno hacia la plantación de *I. edulis*



**Figura 29.** Nivelación del infiltrómetro de doble anillo.



**Figura 30.** Evaluación de la infiltración del agua en la plantación de *I. edulis* en el año 2024.



**Figura 31.** Evaluación de la infiltración del agua en la plantación de *I. edulis* en el año 2025.



**Figura 32.** Proceso de la evaluación de la infiltración del agua en la plantación de *I. edulis*.



**Figura 33.** Muestras del suelo para determinar las características químicas en el laboratorio.



**Figura 34.** Extracción del suelo del primer monolito para la evaluación de *L. terrestris*.



**Figura 35.** Proceso de separación y recolección de *L. terrestris* que fueron almacenados en frascos de vidrio.



**Figura 36.** Registro de la humedad relativa y la temperatura ambiental bajo el dosel de *I. edulis* con Datalogger Elitech RC 51H.



**Figura 37.** Registro de humedad relativa y temperatura ambiental en un espacio abierto con Datalogger Elitech RC 51H.



**Figura 38.** Codificación de las plantas de *I. edulis* mediante la colocación de placas de aluminio para el monitoreo en campo.



**Figura 39.** Recolección del componente herbáceo para determinar carbono sobre el suelo en la plantación de *I. edulis*.



**Figura 40.** Muestras de distintos componentes recolectados para determinar la captura de carbono en la plantación de *I. edulis*.



**Figura 41.** Medición y registro de la altura total de las plantas de *I. edulis*.



**Figura 42.** Conteo y pesado de *L. terrestris* procedente de la plantación de *I. edulis*.