



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AMBIENTAL Y FORESTAL



"CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO EN RODALES DE
***Eucalyptus globulus* ALEDAÑOS A LA LAGUNA CHACAS,**
JULIACA 2024"

Carlos Gabriel Tipula Yanapa

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL

Asesor:

Dr. Alejandro Félix Taquire Arroyo



Juliaca, 2026



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AMBIENTAL Y FORESTAL



"CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO EN RODALES DE
***Eucalyptus globulus* ALEDAÑOS A LA LAGUNA CHACAS,**
JULIACA 2024"

Carlos Gabriel Tipula Yanapa

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL

Asesor:

Dr. Alejandro Félix Taquire Arroyo



Juliaca, 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AMBIENTAL Y FORESTAL



**"CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO EN RODALES DE
Eucalyptus globulus ALEDAÑOS A LA LAGUNA CHACAS,
JULIACA 2024"**

Carlos Gabriel Tipula Yanapa

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

ASESOR: Dr. Alejandro Félix Taquire Arroyo

JULIACA, 2026

Carlos Gabriel Tipula Yanapa

CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO EN RODALES DE *Eucalyptus globulus* ALEDAÑOS A LA LAGUNA CHACAS, JULI...

 Universidad Nacional de Juliaca

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:637947701

Fecha de entrega

12 oct 2026, 3:25 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

12 oct 2026, 3:28 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

BORRADOR CARLOS GABRIEL OCTUBRE ULTIMATUM FINAL.pdf

Tamaño del archivo

3.9 MB

99 páginas

27.609 palabras

149.090 caracteres



Firmado digitalmente por AQUINO
LARICO Elmer Rodrigo FAU
20448261272 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 12.10.2026 15:48:46 -05:00

9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 9%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Firmado digitalmente por AQUINO
LARICO Elmer Rodrigo FAU
20448261272 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 12.10.2026 15:49:13 -05:00

FICHA CATALOGRÁFICA

Tipula, C. (2026). *Captura de Dióxido de Carbono en rodales de Eucalyptus globulus aledaños a la laguna Chacas, Juliaca 2024.*

(Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Juliaca.

AUTOR: Carlos Gabriel Tipula Yanapa

TÍTULO: Captura de Dióxido de Carbono en rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas, Juliaca 2024.

PUBLICACIÓN: Juliaca, 2026

DESCRIPCIÓN: Cantidad de páginas (96 pp)

CÓDIGO: 01-000086-01/T58

NOTA: Incluye bibliografía

ASESOR: Dr. Alejandro Félix Taquire Arroyo

PALABRAS CLAVE: Dioxido de carbono, *Eucalyptus globulus*, Biomasa, Ecuaciones Alométricas.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AMBIENTAL Y FORESTAL

"CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO EN RODALES DE *Eucalyptus globulus* ALEDAÑOS A LA LAGUNA CHACAS, JULIACA 2024"

TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO
AMBIENTAL Y FORESTAL

Presentado por:

Carlos Gabriel Tipula Yanapa

Sustentado y aprobado ante el siguiente jurado:

M. Sc. César Enrique Yupanqui Bendita
PRESIDENTE DEL JURADO



M. Sc. Jael Calla Calla
JURADO (Secretario)


2º MIEMBRO

Mg. Milton Quispe Tisnado
JURADO (Vocal)


3º MIEMBRO
Dr. Alejandro Félix Taquire Arroyo
ASESOR DE TESIS

DEDICATORIA

A mis padres,

Tipula Mullisaca Hilario y Yanapa Condori Nora,
quienes con su paciencia y disciplina me han formado.

Ellos han sido mi principal fuente de motivación

para alcanzar mis metas, brindándome

su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTO

A Dios por el regalo de la vida, por darme fuerzas y apoyo en los momentos de necesidad y dificultad.

A mis padres, Tipula Mullisaca Hilario y Yanapa Condori Nora, les expreso mi agradecimiento por ser las personas que más han influido en mi vida, apoyando mis sueños, confiando en mí y brindándome sabios consejos, una sólida moral, principios y valores.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal de la Universidad Nacional de Juliaca por sus consejos y enseñanzas a mis jurados M. Sc. César Enrique Yupanqui Bendta, M. Sc. Jael Calla Calla y Mg. Milton Quispe Tisnado por las sugerencias y observaciones a la presente tesis, y también a mi asesor, Dr. Alejandro Félix Taquire Arroyo, por su orientación y apoyo durante el desarrollo de esta tesis.

ÍNDICE GENERAL

	Pág
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	viii
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Identificación de la situación problemática.....	13
1.2. Formulación del problema	14
1.2.1. Problema general.....	14
1.2.2. Problemas específicos	15
1.3. Objetivos	15
1.3.1. Objetivo general	15
1.3.2. Objetivos específicos.....	15
1.4. Justificación.....	15
1.5. Formulación de hipótesis	17
1.5.1. Hipótesis general	17
1.5.2. Hipótesis específicas	17

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación	18
2.1.1. Antecedentes internacionales	18
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	23
2.1.3. Antecedentes Locales	27

2.2. Marco teórico	27
2.2.1. Biomasa arbórea	27
2.2.2. Biomasa aérea	28
2.2.3. Dióxido de carbono.....	29
2.2.4. <i>Eucalyptus globulus</i>	29
2.2.5. Captura de dióxido de carbono	30
2.2.6. Métodos para estimar la biomasa aérea	31
2.2.7. Ecuaciones alométricas.....	31
2.2.8. Rodal forestal.....	32
2.2.9. Ecosistema forestal	32
2.2.10. Los bosques como sumideros de carbono.....	32
2.2.11. Densidad de la madera	33
2.2.12. Peso específico.....	33
2.2.13. Peso específico básico.....	33
2.2.14. Carbono orgánico del suelo	34
2.2.15. Cambio climático.....	34
2.2.16. Biomasa subterránea	34
2.2.17. Stock de carbono.....	35
2.2.18. Depósitos de carbono.....	35
2.2.19. Secuestro de carbono	35
2.2.20. Productividad primaria neta	36
2.2.21. Índice de área foliar	36
2.2.22. Relación raíz-vástago.....	36
2.2.23. Respiración del suelo	37
2.2.24. Intercambio neto de dióxido de carbono del ecosistema	37
2.2.25. Incremento neto anual.....	37
2.2.26. Potencial de captura de dióxido de carbono.....	38
2.2.27. Estructura del rodal	38
2.2.28. Densidad arbórea	38
2.2.29. Volumen del fuste	38
2.2.30. Cobertura arbórea	39
2.2.31. Factor de expansión de biomasa	39
2.2.32. Inventario forestal	39

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Diseño metodológico.....	41
3.1.1. Ámbito de estudio	41
3.1.2. Tipo y nivel de investigación	41
3.1.3. Diseño y método de investigación.....	42
3.1.4. Variables de la investigación.....	42
3.1.5. Población y muestra	42
3.2. Métodos y materiales	43
3.2.1. Materiales	43
3.2.2. Equipos.....	43
3.2.3. Instrumentos y equipos de gabinete	43
3.2.4. Procedimiento.....	43

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Determinación de las características edáficas y dasonómicas de los rodales de Eucalyptus globulus aledaños a laguna Chacas, Juliaca – 2024.	49
4.2. Cuantificación de la biomasa total de los rodales de Eucalyptus globulus aledaños a laguna Chacas, Juliaca – 2024.....	54
4.3. Análisis de las diferencias significativas en la captura de dióxido de carbono entre los distintos rodales de Eucalyptus globulus aledaños a la laguna Chacas, Juliaca.	65

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones	71
5.2. Recomendaciones.....	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXOS	82

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 <i>Clasificación Taxonómica de Eucalyptus globulus</i>	30
Tabla 2 <i>Materia orgánica y densidad aparente de muestras de suelos</i>	52
Tabla 3 <i>Determinación del peso específico básico de la madera en el rodal 1</i>	54
Tabla 4 <i>Determinación del peso específico básico de la madera en el rodal 2</i>	56
Tabla 5 <i>Determinación del peso específico básico de la madera en el rodal 3</i>	57
Tabla 6 <i>Determinación de biomasa aérea total en el rodal 1</i>	61
Tabla 7 <i>Determinación de biomasa aérea total en el rodal 2</i>	62
Tabla 8 <i>Determinación de biomasa aérea total en el rodal 3</i>	63
Tabla 9 <i>Determinación de CO₂ en t/ha del rodal 1</i>	65
Tabla 10 <i>Determinación de CO₂ en t/ha del rodal 2</i>	66
Tabla 11 <i>Determinación de CO₂ en t/ha del rodal 3</i>	67
Tabla 12 <i>Determinación de CO₂ en t/ha de los tres rodales</i>	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación del lugar de estudio.....	41
Figura 2 Resultados de cálculo de volumen referente al rodal 1	49
Figura 3 Resultados de cálculo de volumen referente al rodal 2.....	50
Figura 4 Resultados de cálculo de volumen referente al rodal 3.....	51
Figura 5 Promedio de materia orgánica por rodal	52
Figura 6 Promedio de peso específico básico por rodal.....	59
Figura 7 Biomasa total por rodal.....	64
Figura 8 Captura de CO ₂ de los rodales de <i>Eucalyptus globulus</i> en t/ha.....	69
Figura 9 Registro de las muestras recolectadas de madera de <i>Eucalyptus globulus</i>	89
Figura 10 Codificación de las muestras obtenidas de los diferentes rodales evaluados	89
Figura 11 Muestras para determinar contenido de humedad	90
Figura 12 Organización de muestras obtenidas de los tres rodales	91
Figura 13 Determinación del peso de muestras de madera de <i>Eucalyptus globulus</i>	91
Figura 14 Extracción de testigos con el barreno de Pressler	92
Figura 15 Secado de muestras para poder obtener contenido de humedad	92
Figura 16 Extracción de muestras de suelo para análisis de materia orgánica	93
Figura 17 Medición de alturas usando hipsómetro.....	94
Figura 18 Mediciones en los rodales de <i>Eucalyptus globulus</i>	94
Figura 19 Etiquetado de las muestras de suelo obtenido en los rodales	95
Figura 20 Determinación de altura de muestreo de suelos en los rodales	95
Figura 21 Medición de DAP en los rodales de <i>Eucalyptus globulus</i>	96

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I. Informe de análisis del cálculo de Materia Orgánica en suelos	82
Anexo II. Inventario por grupos y volumen de <i>Eucalyptus globulus</i> del rodal 1.....	83
Anexo III. Inventario por grupos y volumen de <i>Eucalyptus globulus</i> del rodal 2	84
Anexo IV. Inventario por grupos y volumen de <i>Eucalyptus globulus</i> del rodal 3	85
Anexo V. Resultados de Stock de Carbono, referente a biomasa forestal y del suelo en t/ha .	86
Anexo VI. Prueba estadística - ANOVA	86
Anexo VII. Procedimiento de materia orgánica en el suelo – Walkley & Black.....	87
Anexo VIII. Panel Fotográfico	89

RESUMEN

La investigación responde a la creciente necesidad de implementar estrategias eficaces para mitigar el cambio climático mediante la captura de CO₂ atmosférico. La investigación tiene por objetivo determinar la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) capturada por los rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas, Juliaca 2024. Se empleó la metodología de Walkley y Black, se obtuvo nueve muestras de suelos para los tres rodales; con cuyo material se determinó el porcentaje de materia orgánica y la cantidad de captura de carbono. Entre los resultados de la investigación se obtuvo información clave para estimar la captura de CO₂ en rodales de *Eucalyptus globulus*, obteniéndose para el primer rodal un 2.04 % de materia orgánica en promedio, para el segundo rodal un 1.79 % y para el tercer rodal un 2.84 %. La biomasa total cuantificada de los rodales 1, 2 y 3 fue de 37.704, 42.592 y 27.594 t/ha respectivamente. Datos que nos servirán para cuantificar el carbono almacenado y dióxido de carbono en los tres rodales. Estadísticamente mediante la prueba ANOVA se encontraron diferencias estadísticamente significativas en los niveles de captura de CO₂. El rodal 1 presentó la mayor capacidad de captura, con 558.75 t CO₂/ha, seguido del rodal 3, con 546.80 t CO₂/ha, y el rodal 2, con 508.89 t CO₂/ha. Estas diferencias se relacionan principalmente con el diámetro de los árboles, el volumen del fuste y número de individuos de *Eucalyptus globulus*

Palabras clave:

Biomasa, dióxido de carbono, *Eucalyptus globulus*, Ecuaciones Alométricas

ABSTRACT

This research addresses the growing need to implement effective strategies to mitigate climate change by capturing atmospheric CO₂. The study aimed to determine the amount of carbon dioxide (CO₂) captured by *Eucalyptus globulus* stands surrounding the Chacas Lagoon in Juliaca in 2024. Using the Walkley and Black methodology, nine soil samples were collected from the three stands. The percentage of organic matter and the amount of carbon sequestration were then determined from these samples. Key findings included information for estimating CO₂ capture in *Eucalyptus globulus* stands. The first stand had an average organic matter content of 2.04%, the second stand 1.79%, and the third stand 2.84%. The total biomass quantified for stands 1, 2, and 3 was 37,704, 42,592, and 27,594 t/ha, respectively. These data will be used to quantify the stored carbon and carbon dioxide in the three stands. Statistically significant differences in CO₂ uptake levels were found using ANOVA. Stand 1 exhibited the highest uptake capacity, with 558.75 t CO₂/ha, followed by stand 3, with 546.80 t CO₂/ha, and stand 2, with 508.89 t CO₂/ha. These differences are mainly related to tree diameter, stem volume, and the number of *Eucalyptus globulus* individuals.

Palabras clave:

Biomass, Carbon dioxide, *Eucalyptus globulus*, Allometric equations.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa uno de los retos ambientales más importantes del siglo XXI, a causa del aumento continuo de los gases de efecto invernadero, en particular el dióxido de carbono (CO₂). Este gas representa uno de los principales impulsores del calentamiento global, ya que su acumulación en la atmósfera altera el equilibrio climático y genera impactos significativos en los ecosistemas, la biodiversidad, los recursos hídricos y las condiciones de vida de la población. Según la Organización Meteorológica Mundial, las concentraciones atmosféricas de CO₂ alcanzaron niveles históricos recientes, evidenciando la necesidad de fortalecer acciones orientadas a la reducción de emisiones y al incremento de sumideros naturales de carbono (World Meteorological Organization [WMO], 2025). Asimismo, el Global Carbon Project reportó que las emisiones mundiales de CO₂ provenientes de combustibles fósiles continuaron incrementándose en 2024, lo que demuestra la urgencia de implementar estrategias de mitigación más efectivas (Friedlingstein et al., 2025).

Los ecosistemas forestales desempeñan un papel esencial en la mitigación del cambio climático, pues pueden capturar el dióxido de carbono por medio de la fotosíntesis y guardarlo en la biomasa aérea, en la subterránea y en el suelo. Para disminuir la acumulación de CO₂ en la atmósfera y favorecer el equilibrio ecológico, son relevantes tácticas como la conservación, recuperación y gestión sostenible de las plantaciones forestales y los bosques. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024) destaca, en este contexto, la relevancia de conservar los bosques, restablecer tierras que han sido degradadas y fomentar sistemas forestales sostenibles como acciones indispensables ante el cambio climático. Asimismo, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente resalta que las acciones relacionadas con los bosques constituyen una opción importante dentro del potencial global de disminución de emisiones (UNEP, 2024).

En este contexto, los rodales de *Eucalyptus globulus* adquieren importancia ambiental por su rápido crecimiento, acumulación de biomasa y capacidad para almacenar carbono. Esta especie, ampliamente distribuida en diversas zonas altoandinas, puede contribuir a la captura de CO₂ cuando se encuentra adecuadamente manejada. Sin embargo, la mayoría de investigaciones sobre captura de carbono se ha enfocado en grandes masas forestales, mientras que los rodales ubicados en zonas periurbanas o cercanas a cuerpos de agua han sido menos estudiados. Por ello, resulta necesario generar información local que permita

cuantificar su aporte como sumideros de carbono y valorar su importancia dentro de la gestión ambiental.

Los grupos de *Eucalyptus globulus* que rodean la laguna Chacas, en el distrito de Juliaca, que se distingue por su expansión urbana y la falta de zonas naturales y áreas verdes disponibles representan un recurso ambiental relevante. Estos espacios no solo cumplen funciones paisajísticas y ecológicas, sino que también pueden contribuir a la regulación climática local, la protección del suelo y la captura de dióxido de carbono. No obstante, existe limitada información sobre la cantidad de CO₂ que pueden capturar estos rodales, lo cual dificulta su valoración ambiental y su incorporación en estrategias locales de mitigación frente al cambio climático.

Por ello, la presente investigación tiene como objetivo determinar la cantidad de dióxido de carbono capturado por los rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas, Juliaca, durante el año 2024. Para este propósito, se consideran variables relacionadas con la biomasa forestal y el contenido de carbono orgánico del suelo, aplicando procedimientos de medición dasométrica y análisis de materia orgánica. Los resultados obtenidos permiten generar información técnica sobre el potencial de captura de CO₂ de estos rodales y contribuyen a la toma de decisiones orientadas a la conservación, manejo sostenible y planificación ambiental local.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Identificación de la situación problemática

El cambio climático es, a nivel global, uno de los problemas ambientales más importantes, ya que los gases de efecto invernadero (GEI), especialmente el dióxido de carbono (CO_2), han aumentado continuamente de igual manera el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). Estos gases alteran el equilibrio térmico de la atmósfera y contribuyen al aumento de la temperatura global, generando impactos sobre los ecosistemas, la biodiversidad, los recursos hídricos y la salud humana (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023). Asimismo, las concentraciones atmosféricas de CO_2 continúan incrementándose; la Organización Meteorológica Mundial señala que el CO_2 presenta un aumento de 11.4 % en los últimos veinte años, situación que evidencia la persistencia del problema climático y la necesidad de fortalecer las acciones de mitigación (WMO, 2024).

El incremento del CO_2 atmosférico se relaciona principalmente con las actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles, el transporte, la industria, el cambio de uso del suelo, la degradación de ecosistemas y la pérdida de cobertura vegetal. De acuerdo con el Global Carbon Budget 2024, las emisiones globales de carbono continúan siendo elevadas, lo que limita la capacidad del planeta para estabilizar la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (Friedlingstein et al., 2025). De igual manera, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente advierte que aún existe una brecha significativa entre los compromisos climáticos de los países y las reducciones necesarias para enfrentar el calentamiento global, por lo que se requiere fortalecer estrategias de mitigación sostenibles y basadas en evidencia científica (UNEP, 2024).

Por otro lado, la contaminación atmosférica también representa un riesgo ambiental y sanitario. La Organización Mundial de la Salud indica que el 99 % de la población mundial vive en lugares donde no se cumplen las directrices de calidad del aire, y que la contaminación del aire exterior se asocia con enfermedades respiratorias, cardiovasculares y muertes prematuras (World Health Organization [WHO], 2024). Esta situación demuestra que la reducción de emisiones y el incremento de áreas verdes no solo contribuyen a la mitigación del cambio climático, sino también a la mejora de la calidad ambiental y la protección de la salud pública.

En este contexto, los ecosistemas forestales cumplen un papel fundamental como sumideros naturales de carbono, debido a que capturan CO₂ atmosférico mediante la fotosíntesis y lo almacenan en la biomasa aérea, biomasa subterránea y en el suelo. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura resalta que los bosques y sistemas forestales son esenciales para la sostenibilidad ambiental, la conservación de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2024). Por ello, la conservación, manejo y evaluación de los rodales forestales resulta importante para conocer su aporte real en la captura y almacenamiento de carbono.

A nivel nacional, el Perú reconoce la importancia de medir, reportar y fortalecer las acciones vinculadas con la reducción y remoción de gases de efecto invernadero, considerando que los ecosistemas forestales cumplen un rol relevante en la regulación climática y en las estrategias de mitigación frente al cambio climático (MINAM, 2024). En la región Puno, los bosques, plantaciones y grupos de árboles adquieren importancia ambiental porque contribuyen a la captura de carbono, protección del suelo, regulación microclimática y conservación de servicios ecosistémicos.

A nivel local, Juliaca presenta un crecimiento urbano acelerado, presión sobre los espacios naturales y limitada disponibilidad de áreas verdes. En este escenario, los rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas constituyen espacios con potencial para la captura de CO₂ y el almacenamiento de carbono. Sin embargo, existe limitada información científica sobre la cantidad de dióxido de carbono que estos rodales pueden capturar, así como sobre sus características edáficas, dasonómicas y biomasa total. Esta falta de información dificulta la implementación de estrategias de gestión forestal sostenible y limita la valoración ambiental de estos espacios como sumideros de carbono.

Por ello, resulta necesario cuantificar la captura de dióxido de carbono en los rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas, Juliaca 2024, con el fin de generar información técnica que contribuya a la planificación ambiental local, la conservación de áreas verdes y la mitigación del cambio climático.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuál es la cantidad de dióxido de carbono capturado por rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas, Juliaca - 2024?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo son las características edáficas y dasonómicas de los rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a laguna Chacas, Juliaca – 2024?
- ¿Cuál es la cantidad de biomasa total de los rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a laguna Chacas, Juliaca – 2024?
- ¿Difiere significativamente ($p < 0.05$) la captura de dióxido de carbono entre los tres rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas, Juliaca, en el año 2024?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la cantidad de dióxido de Carbono capturado por rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a laguna Chacas, Juliaca – 2024.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las características edáficas y dasonómicas de los rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a laguna Chacas, Juliaca – 2024.
- Cuantificar la biomasa total de los rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a laguna Chacas, Juliaca – 2024.
- Analizar si la captura de dióxido de carbono difiere significativamente ($p < 0.05$) entre los tres rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas, Juliaca – 2024.

1.4. Justificación

Referente a la justificación general, la presente investigación se justifica porque permite generar información técnica y científica sobre la captura de dióxido de carbono en rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas, Juliaca 2024. En el contexto actual, el cambio climático continúa siendo uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial, debido al incremento sostenido de los gases de efecto invernadero y a la necesidad de fortalecer estrategias de mitigación basadas en evidencia científica (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023). Asimismo, las emisiones globales de gases de efecto invernadero continúan siendo elevadas, por lo que resulta necesario implementar acciones orientadas a la reducción de emisiones y al fortalecimiento de sumideros naturales de carbono (United Nations Environment Programme [UNEP], 2024).

Desde el punto de vista teórico y científico, esta investigación aporta información sobre la capacidad de captura de CO₂ de los rodales de *Eucalyptus globulus*, considerando variables como biomasa, materia orgánica del suelo, carbono almacenado y diferencias entre rodales.

Este aporte resulta importante porque los bosques y plantaciones forestales cumplen una función relevante en la regulación climática, al capturar carbono atmosférico y almacenarlo en la biomasa y en el suelo (FAO, 2024). Además, la información generada contribuye al conocimiento local sobre el papel de los rodales forestales periurbanos como sumideros de carbono, tema que aún requiere mayor investigación en zonas altoandinas.

Desde el punto de vista ambiental, el estudio es importante porque permite valorar el aporte de los rodales de *Eucalyptus globulus* en la mitigación del cambio climático. La cuantificación de la captura de CO₂ permite reconocer la función ambiental de estos espacios, especialmente en un contexto donde las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono continúan aumentando y alcanzan valores históricos recientes (Friedlingstein et al., 2025). Por ello, conocer la cantidad de carbono almacenado en los rodales permite sustentar acciones de conservación, manejo y recuperación de áreas verdes en el ámbito local.

Desde el punto de vista práctico, los resultados de la investigación pueden servir como base para la toma de decisiones en la planificación ambiental local, la gestión forestal sostenible y la conservación de los espacios naturales aledaños a la laguna Chacas. Esta información puede ser utilizada por instituciones públicas, gobiernos locales y actores vinculados a la gestión ambiental para diseñar estrategias orientadas a incrementar áreas verdes, conservar rodales existentes y fortalecer medidas de mitigación frente al cambio climático. En el caso peruano, la generación de información sobre mitigación y remoción de gases de efecto invernadero es relevante para fortalecer la transparencia climática y las acciones nacionales frente al cambio climático (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2024).

Desde el punto de vista social, la investigación promueve la conciencia ambiental de la población respecto a la importancia de los árboles y rodales forestales en la captura de dióxido de carbono, la mejora de la calidad ambiental y la conservación de los recursos naturales. La presencia de áreas verdes también se relaciona con beneficios para la salud y el bienestar de la población, especialmente en espacios urbanos y periurbanos donde existe presión sobre los ecosistemas. En ese sentido, la Organización Mundial de la Salud señala que la contaminación del aire representa un riesgo para la salud pública, por lo que el fortalecimiento de espacios verdes contribuye indirectamente a mejorar la calidad ambiental y las condiciones de vida (World Health Organization [WHO], 2024).

Desde el punto de vista metodológico, la investigación se justifica porque aplica procedimientos de medición dasométrica, estimación de biomasa y análisis de materia orgánica del suelo mediante el método de Walkley y Black. Estos procedimientos permiten obtener datos cuantificables sobre la biomasa, el carbono almacenado y la captura de CO₂ en los rodales evaluados. De esta manera, el estudio puede servir como referencia metodológica para futuras investigaciones relacionadas con captura de carbono en plantaciones forestales, rodales periurbanos y ecosistemas altoandinos.

Desde el punto de vista técnico, la investigación permite identificar diferencias entre los rodales evaluados, considerando características como el diámetro de los árboles, volumen del fuste, densidad arbórea, biomasa total y condiciones edáficas. Estos resultados son útiles para comprender qué rodales presentan mayor capacidad de captura de CO₂ y qué factores pueden influir en dicha capacidad. Por tanto, el estudio proporciona información técnica que puede orientar acciones de manejo sostenible, conservación forestal y planificación de intervenciones ambientales en la zona de influencia de la laguna Chacas.

1.5. Formulación de hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

Los rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas presentan un stock de dióxido de carbono capturado mayor a 100 t CO₂/ha, Juliaca – 2024.

1.5.2. Hipótesis específicas

- Las características edáficas de los rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas influyen directamente en la capacidad de captura de carbono de los rodales.
- Los rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas presentan valores diferenciados de biomasa total, obtenidos a partir de la cuantificación de la biomasa aérea y subterránea, Juliaca – 2024.
- La cantidad de dióxido de carbono difiere significativamente ($p < 0.05$) entre los tres rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas, Juliaca – 2024.

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Kibrie et al. (2026) evaluaron la influencia de *Eucalyptus globulus* sobre las propiedades físicoquímicas del suelo en Etiopía. Se tomaron muestras a profundidades de 0–15 y 15–30 cm y a diferentes distancias de los árboles, analizando materia orgánica, carbono orgánico, humedad, pH y densidad aparente. Los resultados mostraron contenidos de materia orgánica de 3,45 % en la capa superficial y 2,81 % entre 15–30 cm, mientras que la densidad aparente osciló aproximadamente entre 1,10 y 1,14 g/cm³. Los autores concluyeron que la profundidad y la proximidad a los árboles influyen en las propiedades del suelo. Este estudio aporta a la presente investigación porque demuestra que los suelos asociados a *Eucalyptus globulus* participan en el almacenamiento de carbono y que sus propiedades varían según las condiciones de muestreo.

Corticeiro et al. (2026) analizaron las propiedades del suelo en plantaciones de *Eucalyptus globulus* de Portugal, evaluando el efecto del fuego prescrito y las diferencias entre localidades. Se analizaron muestras superficiales de 0–2 cm, considerando materia orgánica, densidad aparente, pH y nutrientes. Los resultados mostraron densidades aparentes de 0,76–0,83 g/cm³ en Póvoa de Varzim y 1,22–1,28 g/cm³ en Nisa; asimismo, la materia orgánica alcanzó aproximadamente 18,1–21,9 % en Póvoa y alrededor de 4 % en Nisa. Concluyeron que las propiedades edáficas pueden variar considerablemente aun bajo la misma especie forestal debido a las características del sitio y al manejo. Este antecedente respalda la presente investigación al evidenciar que la materia orgánica y la densidad aparente son variables relevantes para interpretar el almacenamiento de carbono en rodales de *Eucalyptus globulus*.

En su estudio, Gaona (2026) analizó la habilidad de absorción de carbono de cuatro grupos arbóreos en las orillas del río Orillas del Zamora, en la localidad ecuatoriana de Loja. Mediante la aplicación de ecuaciones alométricas, el autor estimó la capacidad de captura de carbono de las principales familias arbóreas evaluadas. La familia Salicaceae presentó el valor más elevado, con 235.71 t/ha, seguida de Betulaceae con 21.68 t/ha, Fabaceae con 13.70 t/ha y Bignoniaceae con 9.75 t/ha. Estos resultados evidencian que la contribución al almacenamiento de carbono varía considerablemente según la familia forestal, siendo

Salicaceae la de mayor aporte dentro del área estudiada. En conjunto, las especies analizadas alcanzaron aproximadamente 280.79 t/ha, lo que demuestra la importancia de las áreas verdes urbanas como sumideros naturales capaces de absorber parte del CO₂ emitido por el parque automotor, incluso en ciudades con limitada actividad industrial. Asimismo, el estudio proporciona información técnica que puede contribuir al diseño de políticas de gestión ambiental, programas de arborización y reforestación urbana, conservación de la cobertura vegetal y selección de especies con mayor capacidad de almacenamiento de carbono. De esta manera, el fortalecimiento de las áreas verdes no solo favorecería la mitigación del cambio climático, sino también la mejora de la calidad ambiental y el bienestar de la población.

Sánchez et al. (2025) desarrollaron un estudio con el objetivo de cuantificar el carbono almacenado en la biomasa aérea de dos sistemas agroforestales (SAF) contrastantes en las provincias de San Ignacio y Jaén, Cajamarca, Perú: café y cacao. Con este fin, emplearon parcelas de 1500 m² y un método que destruye, aplicado a veinte plantas de café. Asimismo, los investigadores registraron variables dasométricas, como el diámetro a la altura del pecho, la altura total y otras características estructurales de las especies evaluadas. A partir de estos datos, estimaron la biomasa aérea mediante la aplicación de ecuaciones alométricas, lo que permitió calcular indirectamente la cantidad de carbono almacenado en los componentes vegetales de cada sistema agroforestal. Los resultados obtenidos facilitaron la comparación de la capacidad de captura y almacenamiento de carbono entre los distintos SAF analizados, identificando aquellos con mayor potencial para funcionar como sumideros de carbono. De este modo, el estudio aportó información relevante para valorar la contribución de los sistemas agroforestales a la mitigación del cambio climático, la conservación de los recursos naturales y el fortalecimiento de estrategias de manejo sostenible en la región.

Bacani et al. (2024), en un estudio de Brasil planteó por objetivo evaluar el almacenamiento y secuestro de carbono proyectado para el año 2030 en el municipio de Três Lagoas, Brasil, caracterizado por la presencia de extensas plantaciones de eucalipto. Los autores compararon un escenario tendencial o business as usual con otro basado en la protección de los bosques, en la metodología se emplearon imágenes de teledetección y modelos de cambio de uso del suelo. Los escenarios fueron simulados mediante la combinación de autómatas celulares y Random Forest, implementados en el modelo PLUS. Posteriormente, se aplicó el modelo InVEST para estimar el almacenamiento y secuestro de carbono en cada escenario, en los resultados entre 2010 y 2020 se estimó un secuestro de 3.88 Tg de carbono, concluyeron que

la protección de los bosques prácticamente duplicaría el secuestro futuro de carbono, demostrando que la conservación de la vegetación natural y el manejo sostenible de las áreas productoras de eucalipto son fundamentales para fortalecer la mitigación climática. Este artículo es uno de los antecedentes más importantes porque estudia directamente una zona productora de eucalipto. Sustenta que el almacenamiento de carbono depende de la cobertura forestal, el manejo del territorio y los cambios de uso del suelo.

Yoon et al. (2024), en un estudio realizado en Corea del Sur, plantearon como objetivo desarrollar ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el almacenamiento de carbono de ocho especies arbóreas utilizadas en áreas verdes urbanas, considerando tanto los componentes aéreos como las raíces. En la metodología, evaluaron 117 árboles procedentes de viveros mediante un método destructivo, separando y pesando el fuste, las ramas, las hojas y las raíces. Además, determinaron la concentración de carbono y nutrientes, calcularon las tasas de crecimiento anual y elaboraron modelos alométricos a partir del diámetro a la altura del pecho mediante ecuaciones lineales con transformación logarítmica. En los resultados, las ecuaciones desarrolladas presentaron coeficientes de determinación entre 0.853 y 0.982 para la biomasa aérea, y entre 0.806 y 0.923 para la biomasa subterránea. Asimismo, se determinó que aproximadamente el 30 % de la biomasa total se encontraba en las raíces y que la tasa promedio de secuestro de carbono fue de 3.96 kg de carbono por árbol al año. Los autores concluyeron que la biomasa radicular constituye una reserva importante de carbono y que su exclusión puede ocasionar una subestimación del carbono total almacenado por los árboles urbanos. Este artículo aporta a la presente investigación porque respalda el empleo de ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea y subterránea, además de demostrar la importancia de considerar las raíces en el cálculo total del carbono almacenado.

Kurtz et al. (2024), en un estudio realizado en Brasil, plantearon como objetivo cuantificar la biomasa aérea y el carbono almacenado por los árboles del Jardín Botánico de Río de Janeiro, con la finalidad de determinar su importancia como sumidero de carbono en un entorno urbano tropical. En la metodología, realizaron un inventario forestal de 6793 fustes con un diámetro a la altura del pecho igual o superior a 10 cm, registrando las características estructurales de los individuos arbóreos. Posteriormente, aplicaron ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea, el carbono acumulado y su equivalencia en dióxido de carbono. En los resultados, se obtuvo una biomasa aérea total de 8047 ± 402 Mg, equivalente a 4024 ± 201 Mg de carbono. Además, se estimó una densidad de 207 ± 10 Mg de biomasa

por hectárea y 104 ± 5 Mg de carbono por hectárea. En términos de dióxido de carbono equivalente, los árboles almacenaron aproximadamente $14\,753 \pm 738$ Mg de CO₂. Los autores concluyeron que los jardines botánicos tropicales, además de conservar la diversidad vegetal, pueden funcionar como importantes reservorios de carbono dentro de las ciudades. Este artículo aporta a la presente investigación porque evidencia la relevancia de los árboles ubicados en espacios urbanos y periurbanos como sumideros naturales de carbono.

Du et al. (2024), en un estudio desarrollado en China, plantearon como objetivo analizar la capacidad de secuestro de carbono a largo plazo de diferentes especies arbóreas antiguas presentes en áreas verdes urbanas, con la finalidad de identificar aquellas que presentan mejores condiciones para contribuir a las metas de neutralidad de carbono. En la metodología, evaluaron 643 árboles antiguos ubicados en los alrededores del lago Oeste de Hangzhou, registrando la especie, edad, altura total, diámetro a la altura del pecho y diámetro de copa. Para estimar el carbono acumulado, emplearon el método del factor de expansión de biomasa y aplicaron modelos de regresión para analizar la relación entre la edad de los árboles y su capacidad de secuestro de carbono. En los resultados, *Celtis julianae* presentó la mayor capacidad individual de secuestro, seguida de *Cinnamomum camphora*, *Castanopsis sclerophylla*, *Liquidambar formosana* y *Ginkgo biloba*. Los autores concluyeron que la capacidad de secuestro de carbono varía según la especie, la edad y las características estructurales de cada árbol.

Cajilema y Fernández (2023) estimaron la captura de carbono en 23.81 ha de ribera urbana, con 2481 árboles pertenecientes a 30 especies. *Salix humboldtiana* fue la segunda especie con mayor captura, después de *Eucalyptus globulus*, que atrapó 14.83 t CO₂ por individuo. Se utilizó un método indirecto y se evaluó la viabilidad financiera del proyecto a través de un análisis de costo-beneficio, resaltando la eficacia superior de las especies introducidas por medio del método no directo.

Linares (2022), en Ciudad Universitaria, estimó la captura de carbono en 300 árboles urbanos durante el periodo 2014–2021, mediante la medición del DAP, altura y el uso de ecuaciones alométricas. El urapán y el mango fueron las especies de más cantidad, en tanto que la familia Mimosaceae sobresalió por capturar mucho carbono. Se almacenaron 757,976.5 kg C, lo que demuestra la capacidad de los árboles urbanos para disminuir la huella de carbono y optimizar la calidad del aire.

Ramírez y Chagna (2019) llevaron a cabo una evaluación de la biomasa de 32 árboles en una plantación de *Eucalyptus grandis* que se encuentra en la costa ecuatoriana, teniendo en cuenta las ramas, el tronco, la corteza y las hojas. Se calculó que el carbono almacenado es de 312,10 t C/ha y se encuentra mayormente en el tronco. El ajuste fue del 98% en la ecuación alométrica que se basó en altura y diámetro, lo cual puso de manifiesto el gran potencial de esta especie para absorber carbono.

Carlín y Macías (2018) analizaron la retención de carbono con el fin de preservar el medio ambiente en la parroquia Quiroga, sector La Pita, a través de transectos y de la caracterización de especies que tenían un diámetro a la altura del pecho (DAP) superior a 10 cm. Utilizando la metodología de REDD+ y la de Ríos (2012), calcularon 873.50 t C/ha, lo que equivale a un valor monetario de 87,349.85 dólares estadounidenses. Se determinó que, a causa de su potencial escaso, la región no es adecuada para programas de conservación del medio ambiente.

En el Parque Metropolitano Guanguiltagua de Quito, Crespo (2021), el estudio estimó la cantidad de dióxido de carbono almacenada por los eucaliptos del parque, con la finalidad de valorar su contribución a la reducción de la huella de carbono generada en el entorno urbano. Para realizar la estimación, se combinaron imágenes satelitales obtenidas mediante Sentinel-2 y Landsat 8 con mediciones efectuadas directamente en campo. Asimismo, se aplicaron ecuaciones alométricas y modelos de regresión lineal para relacionar las características dasométricas de los árboles con la biomasa y el carbono acumulado. Los resultados mostraron un almacenamiento aproximado de 42,150 toneladas de CO₂, evidenciando la elevada capacidad de los eucaliptos para actuar como sumideros naturales de carbono. En consecuencia, el parque fue reconocido como uno de los espacios verdes con mayor importancia ambiental dentro de la ciudad, debido a su aporte en la regulación climática, la conservación de la cobertura vegetal y la mitigación de las emisiones urbanas.

En Cuenca, Ecuador, Muñoz y Vásquez (2020) evaluaron las emisiones de vehículos y la capacidad de absorción de carbono en 28 parques urbanos con un área total de 64.51 hectáreas. Al calcular la captura de 11,418.88 t CO₂ en 2019, utilizando métodos no destructivos e inventario forestal, se llegó a esa cifra. La evaluación económica reveló la viabilidad financiera en los mercados de carbono, tanto en el voluntario como en el de Kioto. Por lo tanto, aconsejaron llevar a cabo el proyecto porque tenía una rápida recuperación de inversión y era muy rentable.

Martínez (2019) calculó la captura de carbono en el bosque urbano del Tecnológico de Antioquia (TdeA) entre los años 2012 y 2018, contabilizando a 220 individuos que tenían diámetros superiores a los 10 cm. Se utilizaron dos modelos alométricos, los cuales calcularon entre 609.15 y 642.23 t de biomasa, lo que equivale a 304.58 y 321.12 t C. La investigación demostró que el TdeA contribuyó a la mitigación del cambio climático en las ciudades.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Cárdenas et al. (2026) evaluaron el almacenamiento de carbono en plantaciones andinas de *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* ubicadas en Áncash, Perú, considerando de manera integral la biomasa aérea, la biomasa subterránea y el carbono presente en el suelo. Para ello, establecieron parcelas de evaluación, registraron variables dasométricas como el diámetro a la altura del pecho y aplicaron ecuaciones alométricas para estimar la biomasa de los árboles; además, utilizaron un factor de 0,30 para calcular la biomasa radicular y el método de Walkley-Black para determinar el carbono orgánico del suelo. Los resultados mostraron que *Eucalyptus globulus* alcanzó valores importantes de almacenamiento de carbono, destacando la plantación de Catac con aproximadamente 251,08 Mg C/ha, distribuidos en 73,33 Mg C/ha de biomasa aérea, 21,98 Mg C/ha de biomasa subterránea y 155,77 Mg C/ha en el suelo. Los autores concluyeron que el suelo constituye uno de los principales reservorios de carbono y que la capacidad de almacenamiento depende tanto de la especie como de las condiciones particulares del sitio. Este antecedente aporta directamente a la presente investigación porque respalda el uso conjunto de biomasa aérea, biomasa subterránea y carbono edáfico para obtener una estimación más completa del carbono almacenado en rodales de *Eucalyptus globulus*.

Salgado et al. (2025), en un estudio realizado en la Amazonía central del Perú, tuvieron como objetivo evaluar la influencia de especies arbóreas de sombra en el almacenamiento de carbono de plantaciones de café. Evaluaron diez sistemas agroforestales y tres cultivos sin sombra, cuantificando el carbono presente en árboles, café, hojarasca, vegetación y suelo. Los resultados mostraron que los sistemas agroforestales almacenaron más carbono que los cultivos sin sombra; el sistema con *Retrophyllum rospigliosii* alcanzó 190.38 Mg C/ha, mientras que el asociado con eucalipto superó en 40.30 Mg C/ha al café sin sombra. Concluyeron que los árboles de sombra incrementan significativamente las reservas de carbono. Este estudio aporta información sobre la contribución del suelo y del eucalipto al almacenamiento total de carbono.

Carbajal et al. (2025), en un estudio realizado en las cuencas de Torobamba, Ayacucho, y Coata, Puno, tuvieron como objetivo predecir espacialmente las reservas de carbono orgánico del suelo. Recolectaron muestras a 30 cm de profundidad y compararon modelos geoespaciales y algoritmos de aprendizaje automático. Los resultados indicaron que Torobamba presentó 2.52 % de carbono orgánico y Coata 1.34 %. En Coata, la cobertura arbórea alcanzó el mayor almacenamiento, con 56.71 Mg C/ha. Concluyeron que los modelos geoespaciales representan mejor la variabilidad del carbono en paisajes andinos. Este artículo aporta un referente cercano a la laguna Chacas y demuestra la influencia de la cobertura vegetal y la densidad aparente en el carbono del suelo.

Garate et al. (2024), en un estudio realizado en Madre de Dios, Perú, plantearon como objetivo analizar la recuperación de la biomasa aérea, la estructura forestal y la diversidad de especies en bosques secundarios afectados por actividades de minería aurífera. En la metodología, evaluaron 179 parcelas forestales distribuidas en una cronosecuencia de hasta 23 años después del abandono de la actividad minera. Compararon áreas intervenidas mediante maquinaria pesada con zonas afectadas por minería de bombeo o succión, considerando variables como la biomasa aérea, la edad del bosque, la distancia al borde, la estructura forestal y la diversidad arbórea. En los resultados, determinaron que, después de 20 años, los bosques afectados por minería de succión recuperaron aproximadamente el 56 % de la biomasa aérea registrada en los bosques de referencia, mientras que las áreas intervenidas con maquinaria pesada solamente alcanzaron una recuperación del 18 %. Asimismo, se evidenció que el tipo de minería, la edad del rodal y la distancia al bosque circundante influyeron significativamente en la recuperación de la biomasa. Los autores concluyeron que la recuperación forestal depende de la intensidad y del tipo de perturbación, debido a que el uso de maquinaria pesada genera alteraciones persistentes en el suelo y limita la regeneración de la vegetación. Este artículo aporta a la presente investigación porque demuestra que las condiciones edáficas, la edad de los rodales y las alteraciones ambientales influyen en la acumulación de biomasa, aspectos que pueden utilizarse para interpretar las diferencias encontradas entre los rodales de *Eucalyptus globulus*.

Vallejos et al. (2024a), en un estudio desarrollado en la región San Martín, Perú, plantearon como objetivo determinar el efecto del cambio de uso del suelo forestal sobre el contenido y la densidad del carbono orgánico en los suelos de los bosques secos tropicales del Huallaga Central. En la metodología, establecieron 24 parcelas de 100 m² distribuidas en bosques primarios, bosques intervenidos y áreas deforestadas. En estas parcelas recolectaron 120

muestras de suelo correspondientes a cinco niveles de profundidad, en las cuales analizaron la textura, densidad aparente, contenido de carbono orgánico, densidad de carbono y factor de erodabilidad. En los resultados, encontraron que, en los primeros 20 cm de profundidad, el bosque primario almacenó 79.5 ± 21.3 t C/ha, el bosque intervenido presentó 58.5 ± 11.8 t C/ha y el área deforestada alcanzó 41.8 ± 10 t C/ha. Asimismo, el factor de erodabilidad aumentó de 0.065 en el bosque primario a 0.076 en el bosque intervenido y a 0.093 en la zona deforestada. Las diferencias más notorias en el carbono del suelo se presentaron en los primeros 40 cm de profundidad. Los autores concluyeron que la intervención y la deforestación disminuyen progresivamente el carbono orgánico almacenado en el suelo e incrementan su susceptibilidad a la erosión. Este artículo aporta a la presente investigación porque respalda la importancia de considerar el carbono orgánico del suelo dentro de la estimación total y permite relacionar la materia orgánica, la densidad aparente y la profundidad de muestreo con el almacenamiento de carbono en los rodales estudiados.

Vallejos et al. (2024b), en un estudio realizado en la Amazonía peruana, plantearon como objetivo cuantificar las reservas de carbono de diferentes sistemas de producción de café y compararlas con las existencias de carbono de un bosque secundario. En la metodología, evaluaron cuatro tipos de cobertura: plantaciones de café sin árboles de sombra, café asociado con *Inga* sp., café bajo un sistema de policultivo y bosque secundario. Para estimar el carbono almacenado en los árboles utilizaron ecuaciones alométricas, mientras que el carbono presente en el suelo, la vegetación herbácea y la hojarasca fue determinado mediante muestreos de campo y análisis de laboratorio. En los resultados, el bosque secundario presentó una reserva aproximada de 133.08 t C/ha, seguido del café asociado con *Inga* sp., que alcanzó 117.13 t C/ha. El sistema de policultivo registró 75.83 t C/ha, mientras que el café sin sombra presentó aproximadamente 32.1 t C/ha. Además, se encontró que el carbono aéreo fue mayor en el bosque secundario y que el carbono orgánico del suelo representó una proporción importante en todos los sistemas evaluados. Las plantas de café almacenaron, en promedio, 2.65 t C/ha. Los autores concluyeron que los sistemas agroforestales con árboles de sombra almacenan una mayor cantidad de carbono que los monocultivos sin sombra, destacando que el café asociado con *Inga* sp. presentó valores cercanos a los registrados en el bosque secundario. Este artículo aporta a la presente investigación porque demuestra la importancia de integrar los diferentes depósitos de carbono, como la biomasa aérea, las raíces, la hojarasca, la vegetación y el suelo, y evidencia que la densidad y estructura de la cobertura arbórea determinan la cantidad total de carbono almacenado.

Alarcón y Apaza (2023) en el distrito de Coata, en Quispicanchi calcularon y examinaron la retención de carbono aéreo en plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill y *Pinus radiata*. La investigación se llevó a cabo en dos parcelas de 50.74 m² y con una población de 286 individuos, con un estimado de 1111 árboles por hectárea. Se registraron la altura, el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la densidad de la madera. Los hallazgos revelaron una biomasa de 151.442 t/ha para *Pinus* y de 74.138 t/ha para *Eucalyptus*, con 75.721 y 37.069 t C/ha, respectivamente.

Cárdenas (2022) realizó una investigación sobre la acumulación de dióxido de carbono en un cultivo de *Eucalyptus globulus* Labill, ubicado en la comunidad campesina de Uñas, Huancayo, Junín. Para lograrlo, empleó un método indirecto que se basaba en ecuaciones alométricas, estimando la biomasa con datos de DAP y altura. El estudio cubrió un área de 51.362 ha, que incluía nueve parcelas de 100 m² cada una. Los hallazgos mostraron que en el año 2020 se capturaron un total de 25,933.799 t CO₂.

Yantas (2022) calculó la captura de CO₂ en los cultivos de *Eucalyptus globulus*, *Cupressus macrocarpa* y *Pinus radiata* con el objetivo de ayudar a mitigar el cambio climático. El área del estudio fue de 1 hectárea, con ejemplares de 2500 m² por cada especie. Se usaron ecuaciones exponenciales para calcular la captura de CO₂, así como métodos no destructivos para medir la altura total y el DAP. Los hallazgos indicaron que *Eucalyptus globulus* absorbió 526.64 toneladas de CO₂ por hectárea, a diferencia de *Pinus radiata*, que capturó 315.56 toneladas de CO₂ por hectárea.

Herrera y Quispe (2020) en dos parcelas de 100 × 100 m² y 50 × 100 m², respectivamente, se analizó el almacenamiento de carbono en *Polylepis incana* y *Eucalyptus globulus*. Utilizando ecuaciones alométricas, calcularon el CO₂, el carbono y la biomasa aérea. Los hallazgos mostraron que *Eucalyptus globulus* guarda más carbono (35.12 t C/ha) en comparación con *Polylepis incana* (3.93 t C/ha), lo cual se debe a las variaciones en la edad, el tipo y el DAP.

Valverde et al. (2019) para calcular la biomasa aérea de los árboles de *Eucalyptus globulus* en Huertas, Jauja, eligieron 40 árboles cuyo diámetro a la altura del pecho superara los 15 cm. Para elegir el modelo que mejor se ajusta, se utilizó un muestreo destructivo y pruebas estadísticas como Fisher, R² y t de Student. La ecuación que se basa en DAP²h² presentó el ajuste más adecuado, con el índice Furnival más bajo.

2.1.3. Antecedentes Locales

Mollocondo y Aguilar (2019) desarrollaron una investigación en el Centro de Producción San Juan de Potojani, orientada a estimar la cantidad de dióxido de carbono almacenada por plantaciones forestales de *Polylepis* sp., *Cupressus* spp. y *Eucalyptus globulus*. El estudio tuvo como finalidad determinar la contribución de estas especies en la reducción de las concentraciones de CO₂ atmosférico y, consecuentemente, en la mitigación de los efectos asociados al cambio climático. Para la obtención de los datos, los investigadores aplicaron un método no destructivo, basado en la medición de las características dasométricas de los árboles, evitando su tala o afectación directa. Asimismo, establecieron una superficie de muestreo de 2 500 m² para cada especie y, mediante ecuaciones y factores de conversión, estimaron la biomasa forestal, el carbono almacenado y su equivalente en dióxido de carbono. Los resultados mostraron que las plantaciones de *Cupressus* spp. presentaron una capacidad considerable de almacenamiento, alcanzando 142,335 toneladas de carbono por hectárea, equivalentes a 521,94 toneladas de CO₂ por hectárea. El aporte de la investigación radica en proporcionar información cuantitativa sobre la capacidad de captura de CO₂ de especies forestales presentes en el altiplano, constituyéndose en un antecedente relevante para el diseño de programas de forestación, reforestación y gestión ambiental orientados a mitigar el cambio climático.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Biomasa arbórea

La biomasa arbórea está constituida por el conjunto de materia orgánica presente en las diferentes estructuras de un árbol, entre ellas el fuste, las ramas, las hojas, la corteza y el sistema radicular. Su formación ocurre principalmente mediante la fotosíntesis, proceso fisiológico en el que las plantas captan dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera y, utilizando la energía solar, lo convierten en compuestos orgánicos necesarios para el desarrollo y mantenimiento de sus tejidos vegetales. De esta manera, una parte del carbono atmosférico queda almacenada en la madera y en los demás componentes del árbol durante su crecimiento, la biomasa arbórea representa una variable esencial, ya que permite cuantificar indirectamente la cantidad de carbono fijado por los árboles. Su estimación puede realizarse mediante métodos directos, que requieren el corte y pesaje de los individuos, o mediante procedimientos no destructivos, como el uso de ecuaciones alométricas basadas en variables dasométricas, entre ellas el diámetro a la altura del pecho, la altura total y la densidad de la madera. El análisis de la biomasa también permite determinar la contribución

de los ecosistemas forestales a la regulación climática, debido a que los árboles actúan como reservorios naturales de carbono y reducen temporalmente la concentración de CO₂ presente en la atmósfera. Por esta razón, su evaluación resulta importante para comparar especies, plantaciones y rodales, así como para formular estrategias de conservación, forestación y reforestación orientadas a mitigar los efectos del cambio climático. No obstante, la cantidad de biomasa almacenada puede variar según la especie, la edad del árbol, las condiciones del suelo, la disponibilidad de agua, la densidad de la plantación y las características climáticas del lugar (Huynh et al., 2022).

2.2.2. Biomasa aérea

La biomasa aérea comprende la totalidad de la materia orgánica seca acumulada en las estructuras del árbol que se encuentran por encima del nivel del suelo. Esta incluye principalmente el fuste, las ramas, las hojas y la corteza, componentes en los que se almacena una proporción considerable del carbono capturado durante el proceso de fotosíntesis. Por ello, su determinación resulta fundamental en los estudios forestales y ambientales, ya que constituye uno de los principales depósitos de carbono en los ecosistemas boscosos y en las plantaciones forestales. La estimación de la biomasa aérea permite conocer la capacidad que poseen los árboles para retener carbono y reducir temporalmente la cantidad de dióxido de carbono presente en la atmósfera. Además, proporciona información relevante para evaluar el crecimiento de los individuos, comparar el comportamiento de diferentes especies o rodales y determinar su contribución a la mitigación del cambio climático. La cantidad de biomasa acumulada puede variar de acuerdo con factores como la especie, la edad, el diámetro del árbol, la altura, la densidad de la madera, las condiciones climáticas, la fertilidad del suelo y el manejo silvicultural aplicado, para su cuantificación se utilizan generalmente métodos indirectos o no destructivos, los cuales permiten estimar la biomasa sin necesidad de talar la totalidad de los árboles evaluados. Estos procedimientos se basan en la medición de variables dasométricas obtenidas directamente en campo, como el diámetro a la altura del pecho —medido convencionalmente a 1,30 m sobre el nivel del suelo—, la altura total del árbol y la densidad básica de la madera. Posteriormente, estos datos se incorporan en ecuaciones alométricas desarrolladas para determinadas especies o condiciones ecológicas, mediante las cuales se calcula la cantidad aproximada de biomasa seca existente en cada individuo (Huynh et al., 2022).

2.2.3. Dióxido de carbono

El dióxido de carbono (CO₂) constituye uno de los gases de efecto invernadero con mayor influencia en el incremento de la temperatura global. Si bien está presente de forma natural en la atmósfera y cumple una función esencial en procesos como la fotosíntesis y el ciclo del carbono, el aumento desmedido de sus niveles genera un desequilibrio climático, debido a que favorece la acumulación de calor en la superficie terrestre. Esta elevada concentración se atribuye, principalmente, a actividades antrópicas como la combustión de combustibles fósiles en el transporte, las industrias y la producción de energía, además de la deforestación, los incendios forestales y la transformación del uso de los suelos. Estas actividades no solo liberan grandes cantidades de carbono almacenado, sino que también disminuyen la capacidad de los ecosistemas para absorber el CO₂ presente en la atmósfera. De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, el incremento sostenido de los gases de efecto invernadero intensifica el calentamiento global y ocasiona alteraciones en la temperatura, los patrones de precipitación y la frecuencia de eventos climáticos extremos, generando efectos negativos sobre los ecosistemas, la biodiversidad, los recursos hídricos, la producción agrícola y las condiciones de vida de la población, especialmente en las zonas más vulnerables (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023). Asimismo, el Global Carbon Budget 2024 señala que las emisiones mundiales de dióxido de carbono continúan manteniéndose en niveles elevados, a pesar de los compromisos internacionales orientados a reducirlas. Esta problemática pone de manifiesto la importancia de reforzar las acciones orientadas a mitigar el cambio climático, mediante la reducción del consumo de combustibles fósiles, el uso progresivo de fuentes de energía renovable, la protección de las áreas boscosas y la restauración de los espacios deteriorados. Bajo este enfoque, los bosques naturales y las plantaciones forestales desempeñan un papel fundamental como reservorios de carbono, ya que absorben el CO₂ de la atmósfera a través de la fotosíntesis y retienen el carbono en diferentes componentes, como la biomasa aérea, el sistema radicular, la materia orgánica y el suelo. Por esta razón, la evaluación de la captura de CO₂ en especies forestales como *Eucalyptus globulus* permite conocer su aporte ambiental y generar información técnica para promover acciones de forestación, reforestación, conservación y manejo sostenible orientadas a mitigar los efectos del cambio climático (Friedlingstein et al., 2025).

2.2.4. *Eucalyptus globulus*

Eucalyptus globulus es una especie forestal introducida y ampliamente cultivada en diferentes regiones debido a su rápido crecimiento, adaptabilidad y capacidad de producción

de biomasa. En zonas altoandinas, esta especie se encuentra presente en plantaciones y rodales, donde cumple funciones ambientales relacionadas con la protección del suelo, regulación microclimática y almacenamiento de carbono. Debido a su crecimiento acelerado y acumulación de biomasa, *Eucalyptus globulus* puede contribuir a la captura de CO₂ cuando se encuentra bajo condiciones adecuadas de manejo y conservación.

Tabla 1.

Clasificación Taxonómica de Eucalyptus globulus

Nombre	Descripción
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Myrtales
Familia	Myrtaceae
Género	<i>Eucalyptus</i>
Nombre Común	Eucalipto
Nombre científico	<i>Eucalyptus globulus</i>

Fuente: (Tarazona, 2022)

La especie Eucalipto en su estado adulto se distingue porque es el único que genera un cono o fruto solitario. En el sector papelerero, la madera de eucalipto es muy valorada debido a su fibra corta y otras características técnicas que la hacen perfecta para producir celulosa y papel de gran calidad. (Hanco, 2018).

2.2.5. Captura de dióxido de carbono

Esta constituye un proceso natural mediante el cual las plantas absorben el CO₂ presente en la atmósfera durante la fotosíntesis y lo transforman en compuestos orgánicos que son utilizados para su crecimiento y desarrollo. Como resultado de este proceso, el carbono queda almacenado temporalmente en los diferentes componentes de la vegetación, como el fuste, las ramas, las hojas, la corteza y las raíces, así como en la materia orgánica y en las distintas capas del suelo. En los ecosistemas forestales, esta función adquiere especial importancia, debido a que los árboles actúan como sumideros naturales capaces de retirar una parte del dióxido de carbono atmosférico y conservarlo durante determinados periodos,

contribuyendo de esta manera a disminuir parcialmente su concentración en el ambiente. La cantidad de carbono almacenado puede variar según la especie forestal, la edad de los individuos, la densidad de la plantación, las condiciones climáticas, las características del suelo y el manejo silvicultural aplicado. Por ello, la evaluación de la biomasa aérea, la biomasa radicular y el carbono orgánico del suelo permite estimar con mayor precisión la capacidad de captura de CO₂ de un bosque o plantación forestal. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura destaca que los bosques cumplen una función esencial en la sostenibilidad ambiental, debido a que, además de almacenar carbono, favorecen la conservación de la biodiversidad, protegen los suelos frente a la erosión, regulan el ciclo hídrico y proporcionan diversos bienes y servicios ecosistémicos. En consecuencia, la conservación, restauración y ampliación de las áreas forestales representan estrategias importantes para enfrentar el cambio climático, recuperar ecosistemas degradados y promover el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2024).

2.2.6. Métodos para estimar la biomasa aérea

Puede realizarse mediante métodos destructivos y no destructivos. El método no destructivo utiliza variables medibles en campo, como DAP, altura total, área basal y densidad de la madera, las cuales se incorporan en ecuaciones alométricas para estimar la biomasa. Este último método es ampliamente utilizado en estudios de captura de carbono porque permite evaluar una mayor cantidad de individuos sin afectar la cobertura forestal (Huynh et al., 2022).

2.2.7. Ecuaciones alométricas

Las ecuaciones alométricas constituyen herramientas matemáticas empleadas para estimar características de los árboles que resultan complejas, costosas o destructivas de medir directamente, como la biomasa aérea, la biomasa radicular y el carbono almacenado. Estas estimaciones se realizan a partir de variables dasométricas de fácil obtención en campo, entre las que destacan el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total del árbol, el volumen del fuste, la densidad básica de la madera y, en algunos casos, la edad o las características específicas de la especie. La formulación de estas ecuaciones se basa en las relaciones proporcionales existentes entre las dimensiones del árbol y la cantidad de materia orgánica que este acumula durante su crecimiento, su aplicación permite transformar las mediciones forestales en valores aproximados de biomasa, los cuales posteriormente pueden convertirse en contenido de carbono y en cantidades equivalentes de dióxido de carbono capturado. En

los inventarios forestales y en las investigaciones relacionadas con el cambio climático, las ecuaciones alométricas desempeñan un papel fundamental, debido a que facilitan la evaluación de grandes extensiones forestales sin necesidad de talar los árboles, permiten reducir los costos, el tiempo de trabajo y el impacto ambiental generado por los métodos destructivos de medición. Su precisión depende de factores como la especie forestal, las condiciones climáticas, el tipo de suelo, la edad de los árboles, la densidad del rodal y la región donde fueron desarrolladas. En consecuencia, la selección de una ecuación adecuada es indispensable para disminuir la incertidumbre y obtener estimaciones confiables sobre la biomasa, el carbono almacenado y el potencial de captura de CO₂ de los bosques y plantaciones forestales. (Huynh et al. ,2022).

2.2.8. Rodal forestal

Un rodal forestal es un conjunto de árboles que crecen en un área determinada y presentan características relativamente similares en cuanto a especie, edad, estructura, densidad y condiciones ambientales. En estudios de captura de carbono, el análisis por rodales permite comparar diferencias en biomasa, carbono almacenado y capacidad de captura de CO₂. Esta unidad de análisis resulta útil porque permite evaluar el comportamiento de grupos forestales ubicados en condiciones edáficas y dasonómicas específicas.

2.2.9. Ecosistema forestal

Los ecosistemas forestales están conformados por árboles, suelo, fauna, microorganismos y factores ambientales que interactúan entre sí. Estos ecosistemas cumplen funciones importantes como la regulación climática, conservación de la biodiversidad, protección del suelo, recarga hídrica y almacenamiento de carbono. Según la FAO (2024), los bosques son esenciales para la sostenibilidad ambiental y requieren manejo, conservación e innovación basada en evidencia para responder a los desafíos climáticos actuales.

2.2.10. Los bosques como sumideros de carbono

Los bosques desempeñan una función importante como sumideros naturales de carbono, esto se debe a que los ecosistemas forestales captan el dióxido de carbono atmosférico a través de la fotosíntesis y retienen el carbono en distintos reservorios, entre ellos la biomasa aérea, el sistema radicular, la hojarasca, la materia orgánica y el suelo. Este proceso contribuye a reducir parcialmente la presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera y favorece el equilibrio climático. No obstante, actividades como la deforestación, el deterioro de las áreas boscosas, los incendios y la transformación del uso del suelo disminuyen de manera

importante la capacidad de los ecosistemas para fijar y almacenar carbono. En este contexto, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente resalta la importancia de promover la conservación, recuperación y gestión sostenible de los ecosistemas forestales, con el propósito de disminuir las emisiones mundiales y mitigar las consecuencias del cambio climático. (United Nations Environment Programme [UNEP], 2024).

2.2.11. Densidad de la madera

La densidad de la madera expresa la relación entre la masa de la madera y su volumen. Esta propiedad es importante en estudios de biomasa y carbono porque influye directamente en la cantidad de materia seca acumulada por el árbol. Una mayor densidad de madera puede representar mayor almacenamiento de biomasa y, por consiguiente, mayor contenido de carbono. En la estimación de biomasa, la densidad de la madera se utiliza junto con el volumen del fuste para calcular la biomasa del árbol y proyectar su capacidad de almacenamiento de carbono (Khanal et al., 2023)

2.2.12. Peso específico

El peso específico de la madera representa la relación existente entre la masa seca de una muestra y el volumen que ocupa bajo determinadas condiciones de humedad. Esta propiedad física permite conocer las características y el grado de densidad de la madera, además de contribuir a una estimación más precisa de la biomasa acumulada en los árboles. En los estudios relacionados con la captura de carbono, este parámetro es fundamental, debido a que se utiliza para transformar el volumen calculado del fuste en biomasa seca. A partir de este valor, se puede determinar la cantidad de carbono almacenado en el tejido leñoso y, posteriormente, convertirlo en su equivalente de dióxido de carbono. El peso específico puede variar según la especie forestal, la edad del árbol, las condiciones de crecimiento y las características ambientales del lugar (Khanal et al., 2023)

2.2.13. Peso específico básico

El peso específico básico de la madera corresponde a la relación entre el peso anhidro de la madera y su volumen en estado saturado. Este indicador es importante porque permite obtener una medida más estable de la densidad de la madera, reduciendo la variabilidad ocasionada por el contenido de humedad. Su aplicación en estudios de biomasa forestal permite mejorar la precisión de las estimaciones de carbono almacenado en especies arbóreas (Taquire, 2023)

2.2.14. Carbono orgánico del suelo

El carbono orgánico del suelo representa la fracción de carbono almacenada en la materia orgánica del suelo, proveniente de restos vegetales, raíces, hojarasca y actividad microbiana. Este componente es relevante en los estudios de captura de carbono, debido a que el suelo puede almacenar cantidades importantes de carbono y complementar la evaluación de la biomasa forestal. Estudios recientes sobre carbono orgánico en suelos forestales muestran que las coberturas vegetales y las condiciones del suelo influyen en la acumulación y conservación del carbono edáfico (Khanal et al., 2023; Mendoza-López et al., 2024).

2.2.15. Cambio climático

El cambio climático comprende las modificaciones prolongadas y relevantes que se producen en el comportamiento del sistema climático, principalmente como consecuencia del aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por las actividades humanas. Este fenómeno provoca alteraciones en la temperatura del planeta, los regímenes de precipitación, la disponibilidad de los recursos hídricos y el equilibrio de los ecosistemas. Asimismo, puede afectar la biodiversidad, la productividad agrícola y forestal, así como las condiciones de vida de la población. Ante esta problemática, la protección y recuperación de los ecosistemas forestales adquieren especial importancia, debido a su capacidad para absorber y almacenar dióxido de carbono. Por ello, la cuantificación de la captura de carbono permite conocer el aporte de los bosques y plantaciones forestales en las estrategias de mitigación y adaptación frente a los efectos del cambio climático (IPCC, 2023; UNEP, 2024).

2.2.16. Biomasa subterránea

La biomasa subterránea está constituida principalmente por las raíces vivas de los árboles y demás componentes vegetales que se encuentran debajo de la superficie del suelo. Las raíces cumplen funciones esenciales, como la absorción de agua y nutrientes, el soporte mecánico del árbol y la acumulación de materia orgánica. Asimismo, representan un depósito importante de carbono, debido a que una parte del dióxido de carbono absorbido mediante la fotosíntesis es transformada en compuestos orgánicos y distribuida hacia el sistema radicular. Su determinación directa puede resultar compleja y costosa, porque requiere extraer, separar, limpiar, pesar y secar las raíces. Por esta razón, en los estudios forestales se emplean ecuaciones alométricas o relaciones entre la biomasa aérea y la biomasa subterránea. La inclusión de este componente permite obtener una estimación más completa

de la biomasa total y evita subestimar el carbono almacenado en los ecosistemas forestales (IPCC, 2019).

2.2.17. Stock de carbono

El stock de carbono se refiere a la cantidad total de carbono almacenada en un ecosistema, rodal o plantación forestal en un momento determinado. Generalmente se expresa en toneladas de carbono por hectárea y puede encontrarse distribuido en diferentes componentes, como la biomasa aérea, las raíces, la madera muerta, la hojarasca y la materia orgánica del suelo. Su cuantificación permite conocer la capacidad de un ecosistema para conservar carbono y funcionar como reservorio frente al incremento del dióxido de carbono atmosférico. En los estudios forestales, el stock de carbono se estima a partir de la biomasa seca de los árboles, aplicando una fracción de carbono correspondiente, y posteriormente puede convertirse en dióxido de carbono equivalente. Sin embargo, este concepto no debe confundirse con la tasa de captura anual, debido a que el stock representa una cantidad acumulada y no necesariamente el carbono incorporado durante un año. Su evaluación es importante para comparar rodales, especies y tipos de cobertura vegetal (FAO, 2020).

2.2.18. Depósitos de carbono

Los depósitos de carbono son los distintos componentes de un ecosistema en los cuales el carbono puede permanecer almacenado durante periodos variables. En los ecosistemas forestales, los principales depósitos reconocidos son la biomasa aérea, la biomasa subterránea, la madera muerta, la hojarasca y el carbono orgánico del suelo. La biomasa aérea comprende el fuste, las ramas, hojas y corteza; mientras que la biomasa subterránea está formada principalmente por las raíces. La madera muerta incluye los árboles caídos y residuos leñosos, mientras que la hojarasca está constituida por hojas, ramas pequeñas y otros restos vegetales depositados sobre el suelo. Por su parte, el suelo puede almacenar carbono procedente de raíces, residuos vegetales y actividad microbiana. La evaluación conjunta de estos depósitos permite obtener una estimación más completa del carbono total almacenado. No obstante, la selección de los depósitos que serán medidos depende de los objetivos, recursos y alcance de cada investigación forestal (IPCC, 2019).

2.2.19. Secuestro de carbono

El secuestro de carbono consiste en la extracción del dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera y su posterior retención durante un determinado periodo en depósitos naturales o sistemas desarrollados artificialmente. Dentro de los ecosistemas forestales, esta función se

lleva a cabo principalmente a través de la actividad fotosintética, mediante la cual los árboles absorben el CO₂ atmosférico y lo convierten en materia orgánica. El carbono resultante se distribuye y acumula en los diferentes componentes del árbol, como el tronco, las ramas, el follaje y las raíces, además de incorporarse al suelo mediante la descomposición de hojas, raíces y otros residuos vegetales. A diferencia del stock de carbono, que representa una cantidad almacenada en un momento específico, el secuestro se relaciona con el incremento del carbono durante un periodo determinado. Por ello, para calcularlo adecuadamente se necesitan mediciones realizadas en dos momentos diferentes, datos sobre el crecimiento de los árboles o métodos que estimen las ganancias y pérdidas de carbono. El secuestro depende de factores como la especie, edad, densidad, crecimiento, disponibilidad de agua, nutrientes, condiciones del suelo y manejo forestal. Su cuantificación permite valorar la contribución de los rodales a la mitigación del cambio climático (IPCC, 2019).

2.2.20. Productividad primaria neta

La productividad primaria neta representa la cantidad de materia orgánica y carbono que la vegetación acumula después de descontar la energía utilizada por las plantas durante su respiración. En los ecosistemas forestales, este indicador permite evaluar el crecimiento efectivo de los árboles y la velocidad con la que el carbono atmosférico se incorpora al fuste, las ramas, las hojas y las raíces. Su comportamiento puede variar según la edad del bosque, las condiciones climáticas, la disponibilidad de agua y nutrientes, y el manejo aplicado al rodal. Por ello, constituye un indicador importante de la capacidad de almacenamiento de carbono de las plantaciones forestales (Tian et al., 2024).

2.2.21. Índice de área foliar

El índice de área foliar corresponde a la superficie total de las hojas existente por cada unidad de área del terreno. Este parámetro permite caracterizar la cantidad de follaje presente en un rodal y estimar la superficie fotosintéticamente activa de la vegetación. Un mayor desarrollo foliar puede favorecer la interceptación de la radiación solar y la absorción de dióxido de carbono; sin embargo, también puede incrementar la transpiración y la demanda de agua de los árboles. Su estimación puede realizarse mediante mediciones directas, instrumentos ópticos o técnicas de teledetección (Mthembu et al., 2023).

2.2.22. Relación raíz-vástago

La relación raíz-vástago expresa la proporción existente entre la biomasa acumulada en las raíces y la biomasa presente en los componentes aéreos del árbol, como el fuste, las ramas y

las hojas. Este coeficiente se emplea para aproximar la biomasa subterránea cuando no resulta posible extraer y pesar directamente todo el sistema radicular. Su valor puede modificarse según la especie, edad, diámetro, densidad del rodal, condiciones climáticas y disponibilidad de recursos. Por ello, es recomendable utilizar valores correspondientes a especies y condiciones ambientales similares a las del área evaluada (Su et al., 2025).

2.2.23. Respiración del suelo

La respiración del suelo es el proceso mediante el cual se libera dióxido de carbono desde la superficie terrestre hacia la atmósfera como resultado de la actividad respiratoria de las raíces y de los microorganismos que descomponen la materia orgánica. Este flujo representa una de las principales vías de salida del carbono almacenado en los ecosistemas forestales. Su intensidad se encuentra condicionada por la temperatura, la humedad, la presencia de hojarasca, la actividad microbiana y las características de la vegetación. Por ello, su evaluación permite comprender mejor la dinámica del carbono dentro de un rodal forestal (Bond-Lamberty et al., 2024; Tammadid et al., 2024).

2.2.24. Intercambio neto de dióxido de carbono del ecosistema

El intercambio neto de dióxido de carbono del ecosistema representa el balance entre el CO₂ absorbido por la vegetación mediante la fotosíntesis y el CO₂ liberado por la respiración de las plantas, el suelo y los microorganismos. Este indicador permite establecer si un ecosistema funciona como sumidero o como fuente de carbono durante un periodo determinado. A diferencia del stock de carbono, que expresa la cantidad almacenada en un momento específico, el intercambio neto analiza el flujo de carbono a través del tiempo y puede estimarse mediante mediciones de campo, teledetección y modelos ecosistémicos (Lian et al., 2023).

2.2.25. Incremento neto anual

El incremento neto anual corresponde al aumento promedio del volumen de madera registrado en un rodal durante un año, después de descontar las pérdidas naturales ocasionadas por mortalidad, enfermedades, incendios, plagas u otros factores. Este indicador permite conocer la velocidad de crecimiento del bosque y estimar el aumento anual de la biomasa y del carbono almacenado. Su determinación requiere mediciones forestales realizadas en diferentes periodos o la aplicación de modelos de crecimiento. Por consiguiente, permite diferenciar el carbono acumulado históricamente de la cantidad adicional incorporada anualmente por los árboles (FAO, 2023).

2.2.26. Potencial de captura de dióxido de carbono

El potencial de captura de dióxido de carbono se refiere a la capacidad que posee un ecosistema o rodal forestal para absorber CO₂ atmosférico y almacenarlo en la biomasa vegetal y en el suelo. Esta capacidad no es constante, debido a que depende de la especie, edad, crecimiento, densidad arbórea, calidad del sitio, disponibilidad de agua, características del suelo y manejo forestal. En las plantaciones de eucalipto, la acumulación de carbono también puede variar según los cambios de cobertura y uso del suelo. Su evaluación permite comparar rodales y reconocer aquellos con mayor aporte a la mitigación climática (Bacani et al., 2024; Ribeiro et al., 2023).

2.2.27. Estructura del rodal

La estructura del rodal comprende la organización de los árboles dentro de una superficie forestal, considerando variables como el diámetro, altura, edad, distribución espacial, tamaño de las copas, competencia y composición de especies. Estas características determinan la manera en que los individuos ocupan el espacio y utilizan la luz, el agua y los nutrientes disponibles. La estructura forestal influye directamente en la producción de biomasa y en la cantidad de carbono almacenado. Por ello, su análisis permite explicar las diferencias de captura de CO₂ que pueden presentarse entre rodales sometidos a condiciones ambientales o niveles de perturbación distintos (Chaudhury et al., 2022; Li et al., 2023).

2.2.28. Densidad arbórea

La densidad arbórea representa el número de árboles existentes dentro de una unidad de superficie y generalmente se expresa en individuos por hectárea. Esta variable permite conocer el grado de ocupación del terreno y el nivel de competencia entre los árboles por luz, agua, nutrientes y espacio. Una densidad elevada puede incrementar la biomasa total del rodal, aunque también puede limitar el crecimiento individual de los árboles. Por el contrario, una densidad reducida puede favorecer mayores diámetros individuales, pero disminuir la acumulación total de biomasa por hectárea. En consecuencia, esta variable influye en el almacenamiento de carbono forestal (Chaudhury et al., 2022; Li et al., 2023).

2.2.29. Volumen del fuste

El volumen del fuste representa el espacio ocupado por el tronco principal del árbol y se expresa habitualmente en metros cúbicos. Su estimación se realiza a partir de variables dasométricas como el diámetro a la altura del pecho, la altura total y la forma del tronco, aplicando ecuaciones volumétricas o factores de forma. Este parámetro resulta fundamental

en los estudios de captura de carbono porque, al relacionarlo con la densidad o el peso específico de la madera, permite calcular la biomasa seca del fuste. Posteriormente, dicha biomasa puede convertirse en carbono almacenado y en su equivalente de dióxido de carbono (Ribeiro et al., 2023).

2.2.30. Cobertura arbórea

La cobertura arbórea corresponde al porcentaje de la superficie del terreno cubierto por la proyección vertical de las copas de los árboles. Este indicador permite conocer la extensión, continuidad y grado de ocupación del estrato arbóreo dentro de un rodal. Asimismo, se relaciona con la interceptación de la radiación solar, la protección del suelo, la regulación microclimática y la disponibilidad de espacio para el crecimiento de la vegetación. Su evaluación complementa las mediciones de densidad, diámetro y altura, y puede obtenerse mediante observaciones de campo, fotografías aéreas, imágenes satelitales o sensores remotos (FAO, 2023).

2.2.31. Factor de expansión de biomasa

El factor de expansión de biomasa es un coeficiente utilizado para convertir la biomasa del fuste en biomasa aérea total. Su aplicación permite incorporar componentes del árbol que no siempre son medidos directamente, como las ramas, hojas y corteza. Este factor resulta especialmente útil cuando el inventario forestal proporciona información sobre el volumen comercial o la biomasa del tronco, pero se requiere estimar la biomasa completa del individuo. El valor del factor de expansión no necesariamente es constante, debido a que puede variar según la especie forestal, edad, diámetro, altura, densidad del rodal, condiciones ambientales y manejo silvicultural. En árboles jóvenes, la proporción de ramas y hojas puede ser mayor respecto al fuste, mientras que en individuos maduros el tronco puede representar una proporción más elevada de la biomasa total. Por ello, se recomienda emplear factores específicos para la especie y zona de estudio cuando estén disponibles, ya que los valores generales pueden incrementar la incertidumbre de las estimaciones (IPCC, 2019).

2.2.32. Inventario forestal

El inventario forestal es un procedimiento ordenado y sistemático mediante el cual se recopila información cuantitativa y cualitativa sobre los recursos forestales existentes en una determinada área. Entre las principales variables registradas se encuentran la especie, el diámetro a la altura del pecho, la altura total, el número de individuos, la densidad arbórea, el área basal, el estado sanitario y el volumen de los árboles. Estos datos permiten

caracterizar la estructura del rodal y sirven como base para estimar la biomasa, el carbono almacenado y el dióxido de carbono equivalente. El inventario puede realizarse mediante censos completos o a través de parcelas de muestreo, dependiendo de la extensión del área, la heterogeneidad de la vegetación y los recursos disponibles. (FAO, 2020; IPCC, 2019)

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Diseño metodológico

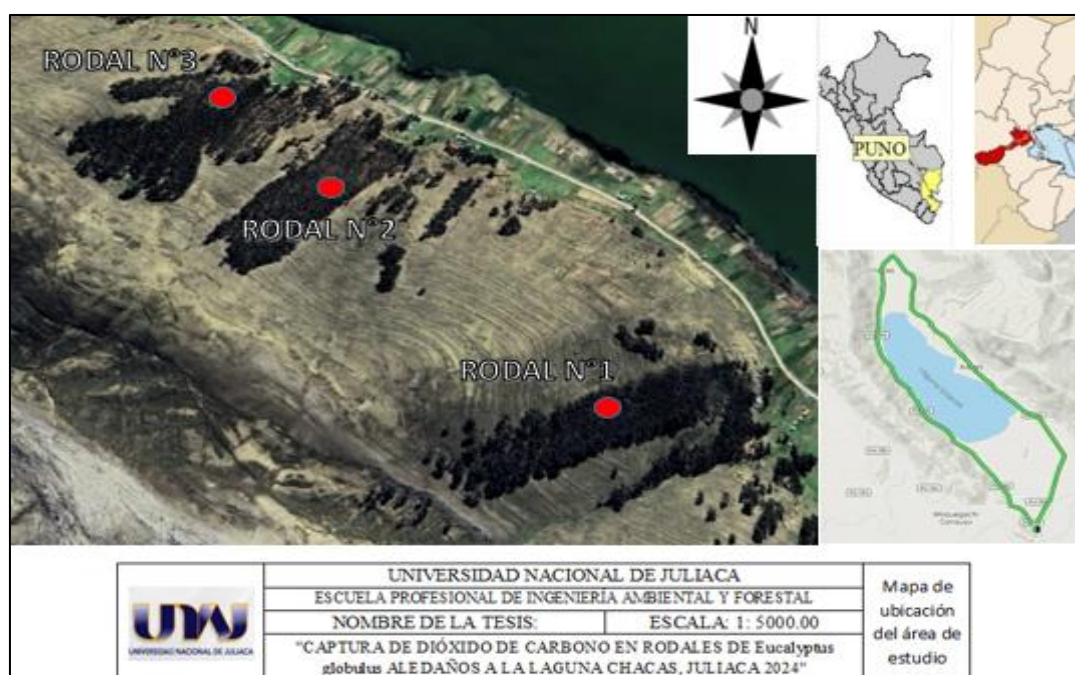
3.1.1. Ámbito de estudio

La investigación presente se llevó a cabo en las áreas que poseen una mayor cantidad de *Eucalyptus globulus* cerca de la laguna Chacas, la cual está situada en Juliaca, provincia de San Román, región Puno. En términos geográficos, la laguna Chacas se encuentra a 4003 metros sobre el nivel del mar y tiene coordenadas UTM en la zona 19 L: 367670.19 metros al este y 8295432.17 metros al sur.

La investigación se realizó en los rodales de *Eucalyptus globulus* con mayor cantidad de individuos. El primero abarca 5.50 hectáreas, el segundo 4.38 hectáreas y el tercero 7.39 hectáreas, haciendo un total de 17.27 hectáreas aproximadamente, en la Figura 1 se muestra el mapa de la ubicación de los tres rodales

Figura 1.

Ubicación del lugar de estudio



Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Tipo y nivel de investigación

El estudio es de nivel descriptivo, porque busca caracterizar y cuantificar las variables edáficas, dasonómicas, la biomasa y el CO₂ almacenado en los rodales de *Eucalyptus*

globulus. Asimismo, presenta un componente comparativo, ya que se analizaron las diferencias entre los tres rodales mediante ANOVA.

El estudio es de tipo aplicado, ya que se caracteriza por su enfoque en la aplicación práctica de sus resultados. Los resultados conseguidos tienen un efecto directo en las decisiones vinculadas con la gestión de los bosques y la reducción del cambio climático.

3.1.3. Diseño y método de investigación

El diseño de investigación es no experimental ya que el investigador no manipula las variables intencionadamente. En este tipo de diseño, se observan y analizan las variables de interés tal como aparecen de manera natural en el ambiente objeto de estudio. En esta tesis, el objetivo es medir y analizar la aptitud para capturar dióxido de carbono de un rodal de *Eucalyptus globulus* sin interferir en su crecimiento o en sus condiciones.

3.1.4. Variables de la investigación

Variable de estudio: Captura de dióxido de Carbono

3.1.5. Población y muestra

3.1.5.1. Población

La población de estudio estuvo constituida por la totalidad de individuos de *Eucalyptus globulus* presentes en los rodales ubicados en las zonas aledañas a la laguna Chacas, en la ciudad de Juliaca. La población arbórea de *Eucalyptus globulus* existentes en los tres rodales identificados dentro del área de investigación, teniendo un área aproximada de 17.27 hectáreas, cuyas características dasométricas permitieron estimar el volumen, la biomasa y el carbono almacenado, para el componente edáfico, la población estuvo conformada por el suelo correspondiente a dichos rodales, debido a que en este medio se encuentra una parte importante del carbono orgánico acumulado.

3.1.5.2. Muestra

Para la estimación del carbono en el suelo, se recolectaron tres muestras en cada rodal, obteniéndose un total de nueve muestras correspondientes a los tres rodales evaluados. Por otra parte, para determinar el volumen total de los árboles, se consideró como población a los individuos de *Eucalyptus globulus* ubicados en los rodales 1, 2 y 3, en los cuales se contabilizaron 715, 506 y 628 árboles, respectivamente. Se excluyeron aquellos árboles menores de tres años y con un diámetro a la altura del pecho (DAP)_{1.30 m} inferior a 10 cm, de acuerdo con Juárez (2015). Asimismo, para estimar la biomasa total, se seleccionaron 15 individuos de *Eucalyptus globulus* en cada rodal, sumando un total de 45 árboles. Esta

selección tuvo como finalidad determinar el peso específico básico de la madera de los individuos de *Eucalyptus globulus* ubicados en las zonas aledañas a la laguna Chacas, en la localidad de Juliaca.

3.1.5.3. Muestreo

El proceso de muestreo se realizó mediante un método no probabilístico, sustentado en el criterio y juicio del investigador. Para la obtención de las muestras de suelo, se seleccionaron tres muestras en cada rodal, alcanzando un total de nueve muestras de suelo correspondientes a los tres rodales evaluados. Asimismo, para la estimación de la biomasa total, se seleccionaron 15 individuos de *Eucalyptus globulus* por rodal haciendo un total de 45 individuos,

Para poder escoger la cantidad de 15 individuos se siguió las directrices del Manual de Procedimientos y Muestreos de Biomasa Forestal (Schlegel et al., 2000)

3.2. Métodos y materiales

3.2.1. Materiales

3.2.1.1. Materiales de campo y gabinete

Para la recolección de datos en campo se utilizaron una forcípula, destinada a medir el diámetro de los árboles; un hipsómetro Harbin SCR, empleado para determinar la altura total; y un barreno de Pressler, utilizado para extraer muestras de madera. Asimismo, se emplearon fichas de campo para el registro de la información, bolsas herméticas para la conservación y traslado de las muestras, y una cinta métrica de 1,5 m para realizar mediciones complementarias.

3.2.1.2. Vestimenta y laboratorio

- Guantes y mascarillas desechables para laboratorio

3.2.2. Equipos

- Para el secado de las muestras se utilizó una estufa de laboratorio marca Memmert, mientras que para determinar su peso se empleó una balanza analítica de la marca Ohaus.

3.2.3. Instrumentos y equipos de gabinete

- PC de escritorio y Software R para la parte estadística.

3.2.4. Procedimiento

3.2.4.1. Contenido de biomasa aérea

a) Medición de variables dasonómicas

La determinación del diámetro normal de cada individuo se realizó directamente sobre el fuste, a una altura de 1,30 m con respecto al nivel del terreno. Para efectuar esta medición se empleó una forcípula, y los resultados obtenidos fueron anotados de manera ordenada en las fichas de recolección de datos. Cuando la sección transversal del árbol presentaba una forma irregular, se tomaron dos lecturas en direcciones perpendiculares; posteriormente, ambos valores fueron promediados para obtener una medida representativa del diámetro del fuste (Urural, 2022).

Por otra parte, la altura total de los árboles de *Eucalyptus globulus* fue determinada mediante el uso de un hipsómetro. Este equipo permite calcular indirectamente la dimensión vertical del árbol a través de escalas graduadas en grados y porcentajes. Para realizar la medición, se consideró la distancia comprendida desde la base del tronco hasta el punto más elevado de la copa, obteniéndose así la altura total de cada individuo forestal evaluado.

b) Cálculo del volumen

Para poder determinar el volumen general de cada especie de *Eucalyptus globulus* se aplicó el modelo matemático de HOSSFELD (Brown y Lugo, 1984) y para el uso de coeficiente de forma se aplicó el valor de 0.79 que es para latifoliadas según (Rivas, 2006)

$$V = \frac{\pi}{4} \times H \times DN^2 \times FF \quad (1)$$

Dónde:

V= Volumen (m³)

H= Altura del árbol (m)

DN= Diámetro Normal (m)

FF= Factor de forma (Latifoliada = 0.79)

c) Determinación del peso específico básico

Para determinar el peso específico básico, se aplicó el método de Máximo Contenido de Humedad (MCH) , en este método se tiene que emparar las muestras en agua

potable por 10 días para lograr que el agua penetre totalmente, renovando el agua utilizada de manera periódica (esto para evitar la contaminación por hongos), una vez que el agua penetra totalmente, se pesa en la balanza analítica.

Luego se seca en una estufa calibrada a 100 °C, esto por un intervalo de 5 días hasta poder conseguir un peso constante (Vásquez et al., 2015)

Con los datos obtenidos se aplicó la ecuación de Smith (1954), dicho procedimiento se encuentra normalizado por la NTP 251.011.2014, bajo condiciones de peso específico básico (Yana, 2019)

$$Peb = \frac{1}{MCH + \frac{1}{1.53}} \quad (2)$$

Dónde:

Peb = Peso específico básico de la madera (g/cm³)

MCH = Máximo contenido de humedad

Ps = Peso saturado (g)

Pa = Peso anhidro (g), 1.53 = peso constante del peso específico básico de la madera.

d) Cálculo de biomasa aérea

- Cálculo de la biomasa del fuste

Para la obtención de la biomasa de fuste en la especie *Eucalyptus globulus* se aplicó la ecuación (Farinango, 2020)

$$Bf = V * Peb \quad (3)$$

Dónde:

Bf= Biomasa del fuste

V= Volumen (m³)

Peb= Peso específico (kg/m³)

- Cálculo de la biomasa aérea

Se calculará aplicando el factor de expansión de biomasa, con el valor mínimo de 1.74

y máximo 3.00; se aplicó la siguiente ecuación (Farinango, 2020)

$$Ba = Bf \times FEB \quad (4)$$

$$FEB = e (3.213 - 0.506 \ln(Bf)) \quad (5)$$

Dónde:

Ba = Biomasa aérea

Bf = Biomasa del fuste (kg)

FEB = Factor de expansión

E= Número de Euler (2.71828)

Ln = Logaritmo natural

- Cálculo de la biomasa de las raíces

Se eligió emplear vínculos entre la biomasa subterránea y la biomasa sobre el suelo, utilizando ecuaciones alométricas disponibles en la literatura científica, para determinar la raíz. De esta manera, se procedió a calcular la biomasa de raíces para todos los tipos de bosques mediante estas ecuaciones alométricas (Chávez, 2018)

$$Br = Ba \times 0.3 \quad (6)$$

Dónde:

Br = Biomasa de la raíz (kg)

Ba = Biomasa aérea (kg)

Se usó el valor por defecto de 0.3 para poder terminar la biomasa en raíces, utilizado por el autor ((Rodríguez et al., 2018)

- Cálculo de la biomasa total

Para poder determinar la biomasa se efectuará la sumatoria de los resultados obtenidos tanto de la biomasa aérea como de la biomasa subterránea, cuya ecuación se muestra a continuación:

$$Bt = Ba + Br \quad (7)$$

Dónde:

Bt= Biomasa total

Ba = Biomasa aérea

Br = Biomasa de la raíz

3.2.5.2. Cantidad de captura de CO₂

a) Cálculo del stock de carbono equivalente almacenado

Para determinar el contenido de carbono almacenado en la biomasa arbórea, se aplicó un factor de conversión de 0,59. Este valor supone que el carbono representa aproximadamente el 59 % de la biomasa seca total estimada para cada individuo forestal. De esta manera, la cantidad de carbono se obtuvo multiplicando la biomasa calculada de cada árbol por dicho factor. El cálculo del stock de carbono se realizó utilizando la ecuación recomendada por el IPCC (Zapana, 2016)

$$CA = BT \times 0.5947 \quad (8)$$

Dónde:

CA = Carbono total almacenado (kg C/ha)

BT= Biomasa total (kg/ha)

0.5947 = constante de fracción de carbono

b) Cálculo del Stock de CO₂ equivalente almacenado

Según las directrices del IPCC, para calcular la cantidad de carbono en los bosques, se sugiere usar un factor de 3.67, obtenido al dividir el peso atómico del dióxido de carbono entre el peso específico del carbono (Toledo, 2020)

$$CO_2 = CA \times 3.67 \quad (9)$$

Dónde:

CO₂ = Cantidad de dióxido de carbono en Stock (t /ha)

CA = Carbono almacenado (t /ha)

3.67 = relación peso molecular

c) Estimación de la cantidad de carbono almacenado en el suelo asociado a *Eucalyptus globulus* en rodales aledaños a la laguna Chacas

- Muestreo de suelos

Según la guía de muestreo de suelos del MINAM (2014), la recolección de muestras se realizará con una profundidad de 10 a 30 cm. Las muestras de suelo fueron recolectadas en los rodales 1, 2 y 3 de *Eucalyptus globulus*, ubicados en las áreas aledañas a la laguna Chacas. En cada rodal se obtuvieron tres muestras, alcanzando un total de nueve muestras de suelo. Inmediatamente después de su extracción, estas fueron colocadas en bolsas herméticas tipo Ziploc y debidamente identificadas mediante etiquetas que consignaban las coordenadas geográficas, la profundidad de muestreo, el nombre del responsable, la fecha y la hora de recolección. Finalmente, las muestras fueron trasladadas al laboratorio para efectuar los análisis correspondientes.

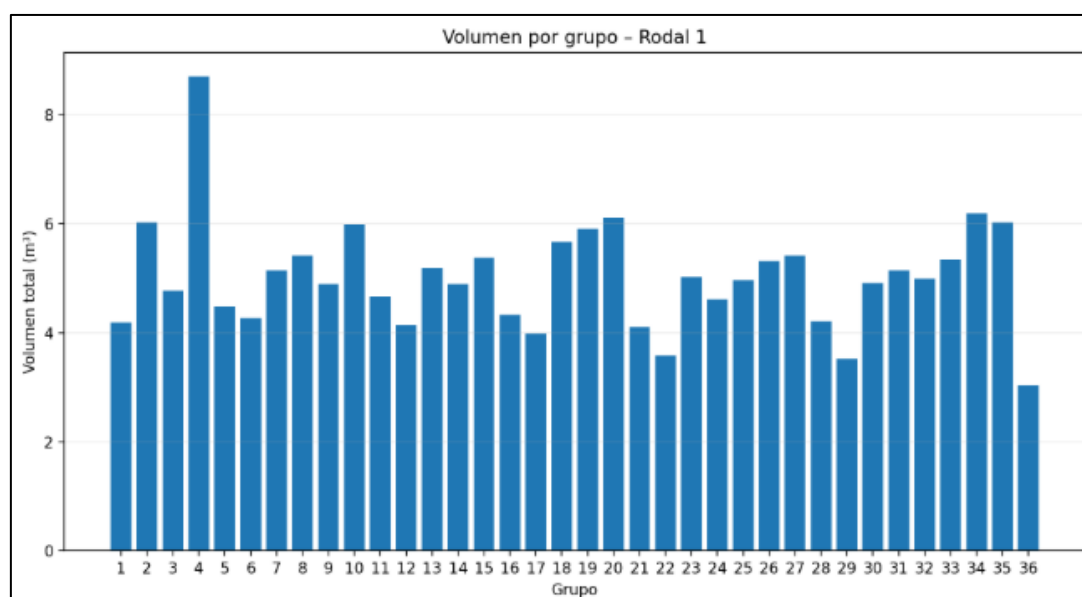
CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Determinación de las características edáficas y dasonómicas de los rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a laguna Chacas, Juliaca – 2024.

Figura 2.

Resultados de cálculo de volumen referente al rodal 1



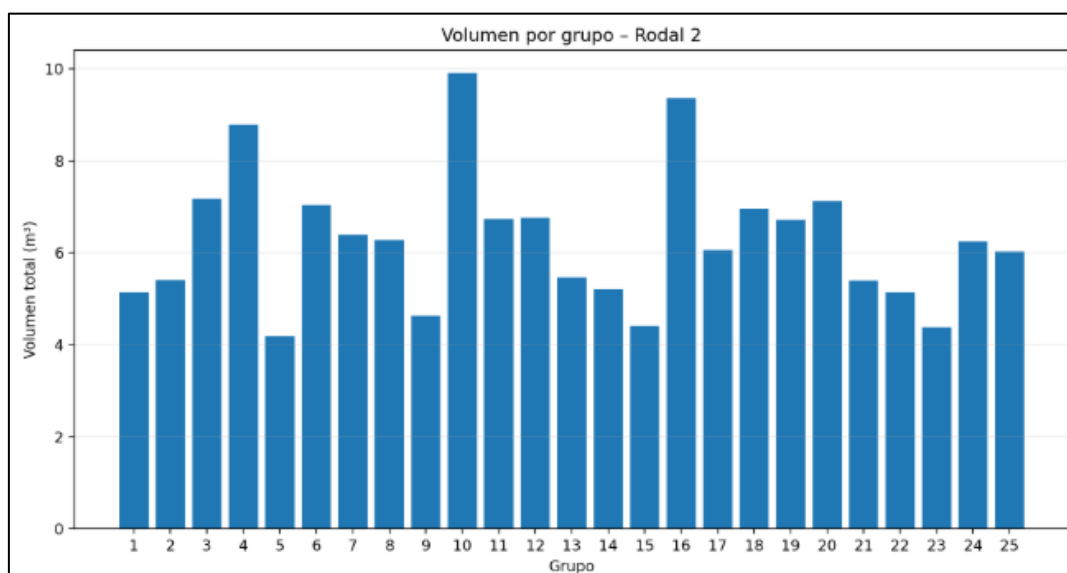
Fuente: Elaboración propia

En la figura 2 se aprecia los resultados referentes al volumen del rodal 1 de *Eucalyptus globulus*, dónde se evaluaron 715 árboles distribuidos en 36 grupos, obteniéndose un volumen total de 180,492 m³, con valores de DAP promedio por grupo entre 13 y 21 cm. Estos resultados pueden contrastarse con Alarcón y Apaza (2023), quienes evaluaron *Eucalyptus globulus* en Ccatca, Cusco, mediante dos áreas de 50,74 × 50,74 m, registrando 286 individuos y realizando mediciones de DAP y altura; la diferencia en el número de individuos respecto al presente estudio se relaciona principalmente con la superficie y el diseño de muestreo empleados. Asimismo, Cajilema y Fernández (2023) evaluaron 1 117 individuos de *Eucalyptus globulus* y realizaron mediciones dasométricas, encontrándose un DAP promedio de 78,87 cm, valor considerablemente superior al rango de 13–21 cm registrado en el rodal 1; esta diferencia puede estar relacionada con la edad, condiciones de crecimiento y estructura de los árboles evaluados. Cárdenas (2022), por su parte, realizó un inventario forestal en una plantación de *Eucalyptus globulus* de 51,362 ha, considerando

individuos con $DAP \geq 10$ cm y utilizando parcelas de 100 m², lo que evidencia un criterio de inclusión similar al utilizado en el presente estudio respecto al diámetro mínimo. De manera complementaria, Mollocondo y Aguilar (2019) evaluaron *Eucalyptus globulus* mediante una muestra de 2 500 m² por especie, registrando DAP y altura de cada árbol, lo que permite establecer una comparación metodológica con el presente inventario. En conjunto, las diferencias observadas en número de individuos y DAP pueden explicarse por la superficie muestreada, densidad de plantación, edad de los árboles, condiciones edáficas y climáticas y manejo del rodal; en el caso del rodal 1, la presencia de 715 individuos y DAP de hasta 21 cm contribuyó al volumen total de 180,492 m³, debido a que el volumen del rodal está condicionado por las dimensiones y cantidad de los árboles evaluados.

Figura 3.

Resultados de cálculo de volumen referente al rodal 2



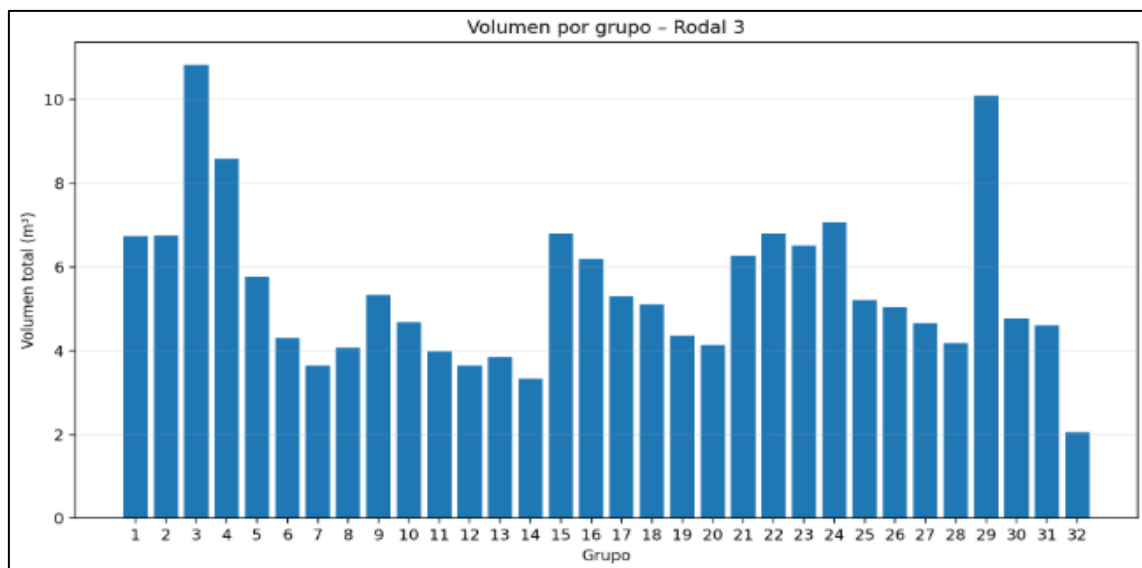
Fuente: Elaboración propia

En la figura 3 se aprecia los resultados referentes al volumen del rodal 2 de *Eucalyptus globulus*, dónde se evaluaron 506 árboles distribuidos en 26 grupos, con valores de DAP promedio entre 14 y 22 cm; el volumen total reportado para este rodal es de 159,396 m³. Al comparar estos resultados con Alarcón y Apaza (2023), quienes trabajaron con *Eucalyptus globulus* en Ccatca, Cusco, se observa que su estudio evaluó 286 individuos mediante dos áreas de 50,74 × 50,74 m y registró DAP y altura total, mientras que en el rodal 2 se evaluaron 506 individuos, evidenciándose una mayor cantidad de árboles en el presente estudio. Cajilema y Fernández (2023) evaluaron 1 117 individuos de *Eucalyptus globulus* y reportaron un DAP promedio de 78,87 cm, considerablemente superior al rango de 14–22

cm encontrado en el rodal 2; esta diferencia puede asociarse con la edad, tamaño de los individuos y condiciones particulares de crecimiento de cada población. Cárdenas (2022) consideró en su inventario individuos de *Eucalyptus globulus* con DAP ≥ 10 cm, empleando nueve parcelas de 100 m² dentro de una plantación de 51,362 ha, mientras que en el presente rodal se utilizaron grupos de individuos para determinar las características dasométricas y el volumen, por lo que las diferencias metodológicas y de superficie pueden influir en los resultados obtenidos. Por su parte, Mollocondo y Aguilar (2019) utilizaron una muestra de 2 500 m² por especie y midieron el DAP y la altura total de cada árbol, constituyendo un antecedente metodológicamente comparable, aunque la superficie y distribución de los individuos fueron diferentes. En consecuencia, la diferencia del volumen registrado en el rodal 2 respecto a otros estudios puede explicarse principalmente por la cantidad de individuos, la distribución de los DAP, la edad de los árboles, la densidad y las condiciones ambientales del sitio; específicamente, los individuos del rodal 2 presentan un rango diamétrico relativamente estrecho de 14–22 cm, lo que condiciona la magnitud del volumen obtenido.

Figura 4.

Resultados de cálculo de volumen referente al rodal 3



Fuente: Elaboración propia

En la figura 4 se aprecia los resultados referentes al volumen del rodal 3 de *Eucalyptus globulus*, dónde se evaluaron 628 árboles distribuidos en 32 grupos, obteniéndose un volumen total de 174,771 m³, con valores de DAP promedio entre 13 y 23 cm. En comparación con Alarcón y Apaza (2023), quienes evaluaron 286 individuos de *Eucalyptus*

globulus en Ccatca, Cusco, mediante áreas de muestreo de $50,74 \times 50,74$ m y registraron DAP y altura total, el rodal 3 presenta una cantidad considerablemente mayor de individuos evaluados, lo cual puede influir en el volumen total obtenido; sin embargo, la comparación debe considerar que ambas investigaciones utilizaron superficies y diseños de muestreo diferentes. Cajilema y Fernández (2023) evaluaron 1 117 individuos de *Eucalyptus globulus* y obtuvieron un DAP promedio de 78,87 cm, valor muy superior al rango de 13–23 cm registrado en el rodal 3, diferencia que puede relacionarse con la edad, tamaño de los árboles, densidad y condiciones de crecimiento de las poblaciones estudiadas. Cárdenas (2022) consideró individuos con $DAP \geq 10$ cm en una plantación de *Eucalyptus globulus* de 51,362 ha, utilizando nueve parcelas de 100 m²; este criterio presenta similitud con el presente estudio en cuanto a la consideración de individuos a partir de un determinado diámetro, aunque las superficies y estrategias de muestreo fueron diferentes. Asimismo, Mollocondo y Aguilar (2019) emplearon una muestra de 2 500 m² por especie y registraron el DAP y la altura de cada individuo, constituyendo otro antecedente comparable para analizar la estructura de la población arbórea. Las diferencias observadas entre estos estudios pueden atribuirse principalmente a la cantidad de individuos, densidad del rodal, edad de los árboles, distribución diamétrica, superficie de muestreo y condiciones ambientales; en el rodal 3, la presencia de individuos con DAP de hasta 23 cm permite explicar que, pese a contar con menos árboles que el rodal 1, se haya obtenido un volumen de 174,771 m³, debido a que el volumen no depende únicamente del número de individuos.

Tabla 2.

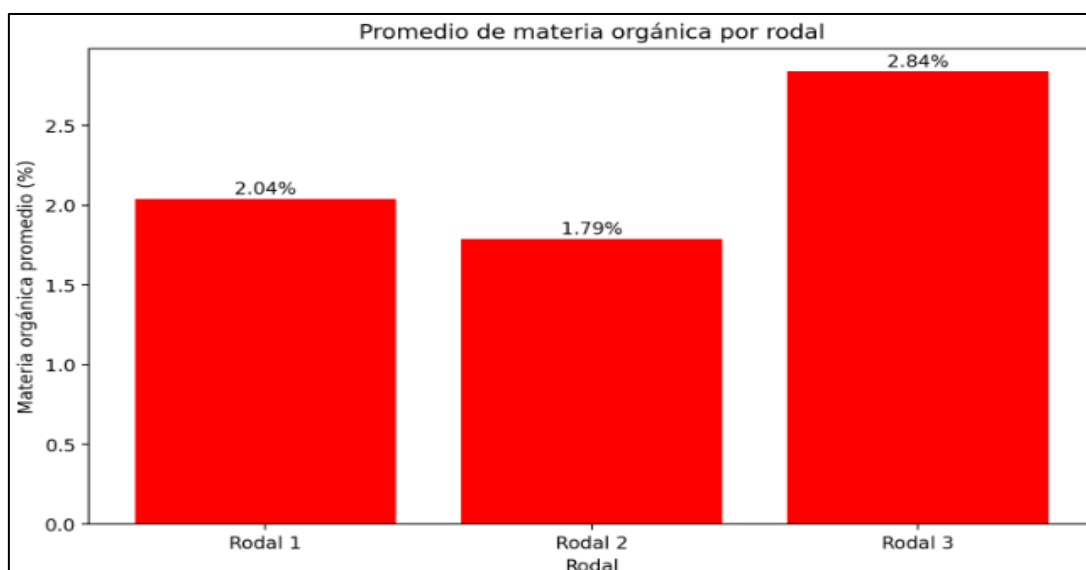
Materia orgánica y densidad aparente de muestras de suelos

Rodal	Muestra	% MO	DA (kg/m ³)	Profundidad (m)
R1	M01	4.03	1100	0.2
	M02	1.01	1480	0.2
	M03	1.07	1450	0.2
R2	M01	2.49	1280	0.2
	M02	1.14	1420	0.2
	M03	1.75	1350	0.2
R3	M01	3.22	1180	0.2
	M02	3.69	1120	0.2
	M03	1.61	1380	0.2

Fuente: Elaboración propia

Figura 5.

Promedio de materia orgánica por rodal



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 2 presenta variaciones en las características edáficas de los tres rodales de *Eucalyptus globulus* evaluados. El contenido de materia orgánica fluctuó entre 1,01 y 4,03 %, mientras que la densidad aparente se encontró entre 1100 y 1480 kg/m³. Se obtuvieron valores promedio de materia orgánica de 2,04 % para el rodal 1, 1,79 % para el rodal 2 y 2,84 % para el rodal 3, lo cual se muestra en la figura 2. En cuanto a la densidad aparente, los valores promedio fueron de 1343,33 kg/m³, 1350,00 kg/m³ y 1226,67 kg/m³ para los rodales 1, 2 y 3, respectivamente. Estos resultados evidencian una heterogeneidad en las propiedades físicas y químicas del suelo, aun cuando todas las muestras fueron obtenidas a una profundidad de 0,20 m, en el contexto regional, Carbajal et al. (2025) encontraron 1,34 % de carbono orgánico en los suelos de la cuenca Coata, Puno, y determinaron que la cobertura arbórea alcanzó 56,71 Mg C/ha, evidenciando que la vegetación y las propiedades edáficas condicionan el almacenamiento de carbono en los paisajes andinos.

Estos resultados presentan una relación con lo encontrado por Kibrie et al. (2026), quienes determinaron en suelos asociados a *Eucalyptus globulus* un contenido promedio de materia orgánica de 3,45 % en la capa superficial de 0–15 cm y de 2,81 % entre los 15 y 30 cm de profundidad. De esta manera, el valor obtenido en el rodal 3 de Chacas, de aproximadamente 2,84 %, es prácticamente semejante al 2,81 % registrado por dichos autores en la capa subsuperficial. En cambio, los rodales 1 y 2, con 2,04 y 1,79 %, respectivamente, presentaron

contenidos inferiores. Kibrie et al. también comprobaron que la materia orgánica disminuyó tanto con la profundidad como al aumentar la distancia respecto a los árboles, debido a que cerca de *Eucalyptus globulus* existe una mayor incorporación de hojas, ramas pequeñas, raíces finas y otros residuos orgánicos al suelo.

Los resultados pueden compararse con lo reportado por Hanco (2018), quien evaluó directamente suelos con forestación de *Eucalyptus globulus* en Huancané, Puno, utilizando también el método de Walkley y Black. La autora obtuvo aproximadamente 1,71 % de materia orgánica y una densidad aparente de 1,25 g/cm³ en los suelos asociados al eucalipto. Al contrastar estos valores con la presente investigación, el rodal 1 presentó 2,04 % de materia orgánica, el rodal 2 registró 1,79 % y el rodal 3 alcanzó 2,84 %, por lo que los tres rodales mostraron contenidos promedio de materia orgánica superiores al valor registrado por Hanco, siendo la diferencia más evidente en el rodal 3. En cuanto a la densidad aparente, los rodales 1 y 2 presentaron valores ligeramente superiores, con 1,343 y 1,350 g/cm³, respectivamente, mientras que el rodal 3 alcanzó 1,227 g/cm³, valor muy próximo al 1,25 g/cm³ registrado en Huancané.

4.2. Cuantificación de la biomasa total de los rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a laguna Chacas, Juliaca – 2024.

Tabla 3.

Determinación del peso específico básico de la madera en el rodal 1

Grupo	DAP (cm)	Peso saturado (g)	Peso anhidro (g)	Máx. contenido de humedad	Peso específico (g/cm ³)	Peso específico (kg/m ³)
1	18.45	3.95	1.7	1.32	0.506	506
2	17.3	4.1	1.78	1.30	0.511	511
3	19.8	3.88	1.65	1.35	0.499	499
4	16.2	4.45	1.92	1.32	0.507	507
5	18.9	3.7	1.55	1.39	0.490	490
6	20.1	4.05	1.75	1.31	0.508	508
7	21.5	3.98	1.68	1.37	0.494	494
8	22.3	4.35	1.9	1.29	0.515	515
9	21.9	3.82	1.63	1.34	0.501	501
10	23.8	4.02	1.72	1.34	0.502	502
11	19.6	3.9	1.68	1.32	0.506	506
12	18.2	4	1.72	1.33	0.505	505
13	17.5	4.15	1.8	1.31	0.510	510
14	20.4	3.95	1.7	1.32	0.506	506

15	21.8	4.1	1.78	1.30	0.511	511
16	19.3	3.85	1.66	1.32	0.507	507
17	18.7	3.92	1.69	1.32	0.507	507
18	22.1	4.2	1.83	1.30	0.513	513
19	23.4	4.3	1.88	1.29	0.515	515
20	24	4.25	1.85	1.30	0.513	513
21	18.9	3.88	1.66	1.34	0.502	502
22	17.8	4.05	1.75	1.31	0.508	508
23	19.5	3.9	1.68	1.32	0.506	506
24	20.2	4	1.72	1.33	0.505	505
25	21.7	4.15	1.8	1.31	0.510	510
26	22.5	4.25	1.85	1.30	0.513	513
27	23.1	4.3	1.88	1.29	0.515	515
28	18.6	3.95	1.7	1.32	0.506	506
29	17.9	4.05	1.75	1.31	0.508	508
30	19.7	3.9	1.68	1.32	0.506	506
31	20.8	4.05	1.75	1.31	0.508	508
32	21.9	4.15	1.8	1.31	0.510	510
33	22.8	4.2	1.83	1.30	0.513	513
34	23.6	4.3	1.88	1.29	0.515	515
35	24.2	4.35	1.9	1.29	0.515	515
36	19.1	3.88	1.66	1.34	0.502	502

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3 se presentan los resultados correspondientes a la determinación del peso específico básico de la madera en el rodal 1 de *Eucalyptus globulus*. Los valores del diámetro a la altura del pecho (DAP) variaron entre 16.2 cm y 24.2 cm. Asimismo, el peso específico básico se encontró en un rango de 0.490 a 0.515 g/cm³, y el promedio fue de 0.507 g/cm³ o su equivalente 507.44 kg/m³. Los mayores valores de peso específico básico se registraron en los grupos con diámetros promedio más altos, lo que evidencia una relación directa entre el desarrollo dendrométrico de los árboles y la densidad de la madera. En cuanto al contenido máximo de humedad, este presentó una variación reducida, con valores comprendidos entre 1.287 y 1.387, lo cual demuestra homogeneidad en las propiedades físicas de las muestras evaluadas.

Tabla 4.*Determinación del peso específico básico de la madera en el rodal 2*

Grupo	DAP (cm)	Peso saturado (g)	Peso anhidro (g)	Máx. contenido de humedad	Peso específico (g/cm ³)	Peso específico (kg/m ³)
1	21.2	4.1	1.78	1.30	0.511	511
2	18.3	3.8	1.6	1.38	0.493	493
3	25.9	4.6	2	1.30	0.512	512
4	17.6	3.9	1.7	1.29	0.513	513
5	19.1	4.2	1.85	1.27	0.520	520
6	23.7	4	1.75	1.29	0.516	516
7	23.9	4.5	1.98	1.27	0.519	519
8	23.1	4.3	1.92	1.24	0.528	528
9	19.7	3.85	1.7	1.26	0.521	521
10	18.3	4.2	1.85	1.27	0.520	520
11	22.9	4.1	1.8	1.28	0.518	518
12	24.5	4.4	1.95	1.26	0.524	524
13	21.8	4.1	1.8	1.28	0.518	518
14	20.9	4	1.75	1.29	0.516	516
15	19.6	3.9	1.7	1.29	0.513	513
16	18.8	3.95	1.72	1.30	0.513	513
17	22.3	4.2	1.85	1.27	0.520	520
18	23.6	4.3	1.9	1.26	0.522	522
19	24.1	4.35	1.92	1.27	0.521	521
20	25.2	4.5	2	1.25	0.525	525
21	21.5	4.1	1.8	1.28	0.518	518
22	20.8	4	1.75	1.29	0.516	516
23	19.9	3.9	1.7	1.29	0.513	513
24	22.4	4.2	1.85	1.27	0.520	520
25	23	4.25	1.88	1.26	0.522	522
26	21.7	4.1	1.8	1.28	0.518	518

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4 presenta los resultados obtenidos en la determinación del peso específico básico de la madera correspondiente al rodal 2 de *Eucalyptus globulus*. El diámetro a la altura del pecho (DAP) de los individuos evaluados varió entre 17,6 y 25,9 cm, mientras que el peso específico básico osciló entre 0,493 y 0,528 g/cm³ y el promedio fue de 0.517 g/cm³ o su equivalente 517.31 kg/m³. El registro más elevado correspondió al grupo 8, que presentó un DAP de 23,1 cm y un peso específico básico de 0,528 g/cm³. Este resultado indica una mayor cantidad de materia seca por unidad de volumen en comparación con las demás muestras

analizadas, lo que sugiere que los individuos con un desarrollo diamétrico considerable pueden presentar una madera de mayor densidad. Sin embargo, esta característica también puede estar condicionada por la edad del árbol, las condiciones del sitio, la disponibilidad de agua y nutrientes, así como por la proporción de madera juvenil y madura.

Respecto al contenido máximo de humedad, los valores se encontraron entre 1,240 y 1,375, evidenciándose una variación reducida entre las muestras. Esta relativa homogeneidad indica que la madera evaluada presentó un comportamiento físico similar frente a su capacidad de retener humedad, pese a las diferencias observadas en el DAP y en el peso específico básico. La determinación conjunta de estas propiedades permite caracterizar de manera más precisa la calidad física de la madera y reconocer posibles diferencias entre los individuos que conforman el rodal 2.

Tabla 5.

Determinación del peso específico básico de la madera en el rodal 3

Grupo	DAP (cm)	Peso saturado (g)	Peso anhidro (g)	Máx. contenido de humedad	Peso específico (g/cm ³)	Peso específico (kg/m ³)
1	22.9	4	1.75	1.29	0.516	516
2	24.5	4.1	1.8	1.28	0.518	518
3	16	3.8	1.65	1.30	0.511	511
4	26.5	4.6	2	1.30	0.512	512
5	17.7	4.1	1.8	1.28	0.518	518
6	18.6	3.7	1.55	1.39	0.490	490
7	18.2	4	1.75	1.29	0.516	516
8	20	4.3	1.9	1.26	0.522	522
9	21	3.9	1.7	1.29	0.513	513
10	20.4	4.2	1.85	1.27	0.520	520
11	18.5	3.9	1.7	1.29	0.513	513
12	17.2	3.85	1.68	1.29	0.514	514
13	19	3.95	1.72	1.30	0.513	513
14	17.4	3.9	1.7	1.29	0.513	513
15	23.5	4.25	1.88	1.26	0.522	522
16	22.1	4.1	1.8	1.28	0.518	518
17	21.4	4.05	1.78	1.28	0.518	518
18	20.8	4	1.75	1.29	0.516	516
19	19.7	3.9	1.7	1.29	0.513	513
20	18.9	3.95	1.72	1.30	0.513	513
21	22.5	4.2	1.85	1.27	0.520	520
22	23.8	4.3	1.9	1.26	0.522	522

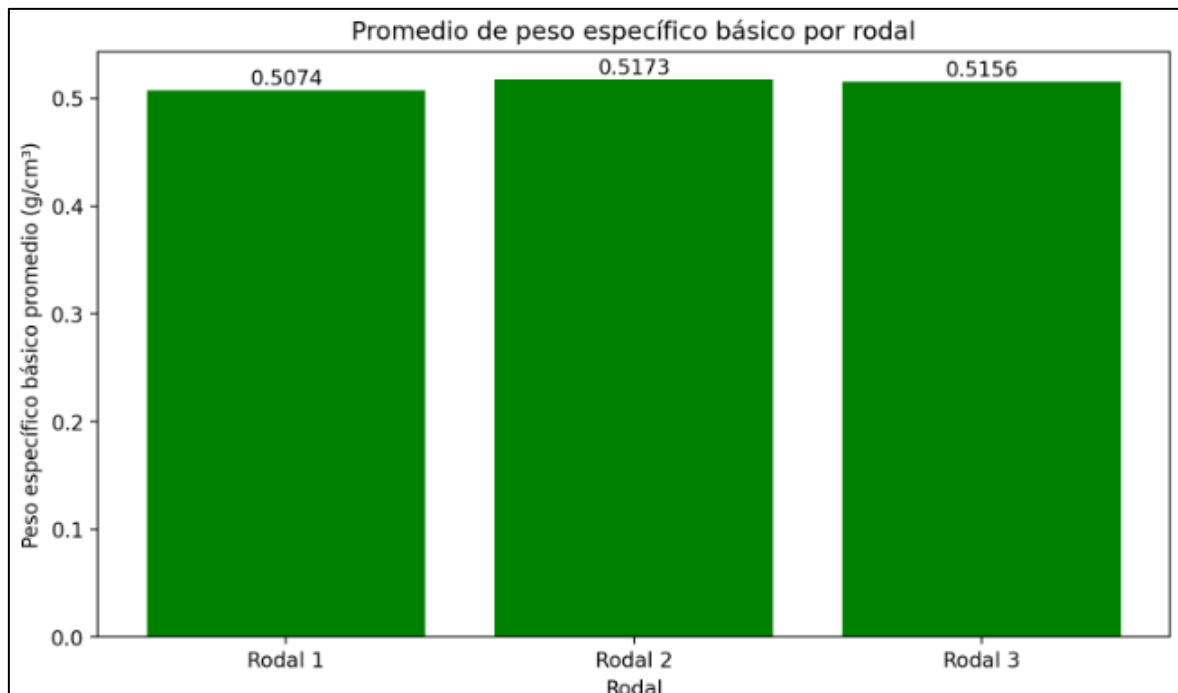
23	24.6	4.35	1.92	1.27	0.521	521
24	25.1	4.45	1.98	1.25	0.526	526
25	21.9	4.05	1.78	1.28	0.518	518
26	20.7	4	1.75	1.29	0.516	516
27	19.8	3.95	1.72	1.30	0.513	513
28	18.6	3.9	1.7	1.29	0.513	513
29	17.9	3.85	1.68	1.29	0.514	514
30	19.4	3.95	1.72	1.30	0.513	513
31	20.6	4	1.75	1.29	0.516	516
32	21.3	4.05	1.78	1.28	0.518	518

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 5 presenta los resultados obtenidos durante la determinación del peso específico básico de la madera de los individuos pertenecientes al rodal 3 de *Eucalyptus globulus*. Los valores del diámetro a la altura del pecho (DAP) se encontraron entre 16 y 26,5 cm, mientras que el peso específico básico de la madera osciló de 0,490 a 0,526 g/cm, el peso específico básico promedio del rodal 3 fue de 0.516 g/cm³ o su equivalente 515.59 kg/m³. El valor más alto se registró en el grupo 24, cuyo DAP fue de 25,1 cm y cuyo peso específico alcanzó 0,526 g/cm³. Este resultado evidencia que algunos individuos con mayor desarrollo diamétrico presentaron una madera más densa, lo cual puede estar relacionado con la cantidad de materia seca acumulada en el fuste. Por el contrario, el grupo 6 mostró el menor peso específico básico, con un valor de 0,490 g/cm³, indicando una menor concentración de masa seca por unidad de volumen en comparación con los demás grupos evaluados, en cuanto al contenido máximo de humedad, los valores variaron entre 1,247 y 1,387, mostrando diferencias reducidas entre las muestras analizadas. Esta limitada variación refleja una relativa homogeneidad en el comportamiento físico de la madera del rodal 3, pese a las diferencias registradas en el diámetro y en el peso específico básico.

Figura 6.

Promedio de peso específico básico por rodal



Fuente: Elaboración propia

La figura 3 muestra un resumen referente al promedio de los pesos básicos específicos por rodal, estos resultados pueden compararse con Carrillo et al. (2017), quienes evaluaron la calidad de la madera de *Eucalyptus globulus* y determinaron un peso específico básico promedio de 478 kg/m³, equivalente a 0,478 g/cm³. Esta variación puede estar vinculada con diferencias en la edad de los árboles, procedencia genética, condiciones ambientales, disponibilidad hídrica y proporción de madera juvenil y madura. Por tanto, aunque ambos estudios corresponden a *Eucalyptus globulus*, el peso específico básico no debe considerarse un valor constante para la especie.

Asimismo, los resultados guardan relación con Resquin et al. (2022), quienes evaluaron plantaciones de *Eucalyptus globulus* de diferentes edades y procedencias en Uruguay y determinaron que la densidad básica de la madera aumentaba conforme se incrementaba la edad de cosecha. Los autores registraron valores de hasta 0,580 g/cm³ en árboles de aproximadamente 11 y 13 años. Este valor es superior a los máximos encontrados en Chacas, donde se registraron 0,515 g/cm³ en el rodal 1, 0,528 g/cm³ en el rodal 2 y 0,526 g/cm³ en el

rodal 3. La diferencia puede explicarse parcialmente por la edad y el grado de madurez de la madera, debido a que Resquin et al. observaron que el incremento de la edad estuvo acompañado por un aumento de la densidad básica. En consecuencia, árboles con mayor proporción de madera madura pueden presentar valores superiores de peso específico respecto a individuos con mayor presencia de madera juvenil.

Por otra parte, Elissetche et al. (2024) estudiaron genotipos híbridos de *Eucalyptus nitens* × *Eucalyptus globulus* bajo condiciones contrastantes de disponibilidad de agua. Los autores encontraron pesos específicos básicos aproximadamente entre 400 y 450 kg/m³ (0,400–0,450 g/cm³) bajo alta disponibilidad hídrica y entre 450 y 500 kg/m³ (0,450–0,500 g/cm³) bajo condiciones de menor disponibilidad de agua. Los valores registrados en los rodales de Chacas, particularmente los promedios de 0,507–0,517 g/cm³, fueron ligeramente superiores al intervalo reportado por estos autores. No obstante, debe considerarse que Elissetche et al. trabajaron con híbridos y no exclusivamente con *Eucalyptus globulus*. Aun así, sus resultados son relevantes porque evidencian que la disponibilidad hídrica puede modificar la densidad de la madera, demostrando que este parámetro responde tanto al componente genético como a las condiciones ambientales del sitio.

La comparación con los tres antecedentes permite señalar que los valores obtenidos en los rodales de Chacas, comprendidos principalmente alrededor de 0,50–0,52 g/cm³, se encuentran dentro de un rango técnicamente coherente para materiales de *Eucalyptus*. Las diferencias observadas respecto de otros estudios pueden atribuirse a la edad de los individuos, procedencia genética, disponibilidad de agua y nutrientes, condiciones climáticas, características del sitio y proporción de madera juvenil y madura. Por ello, la ligera superioridad del rodal 2 no debe interpretarse únicamente como consecuencia de un mayor DAP, sino como resultado de la interacción de diversos factores propios del crecimiento y formación de la madera.

Asimismo, los resultados son coherentes con Valverde et al. (2019), quienes desarrollaron una ecuación para estimar la biomasa aérea de árboles de *Eucalyptus globulus*, utilizando variables dasométricas como el DAP y la altura. En el rodal 3, los valores de DAP entre 16.0 y 26.5 cm, junto con el peso específico básico promedio de 0.516 g/cm³, permiten una mejor aproximación a la biomasa, debido a que se considera tanto el tamaño del árbol como la densidad de la madera. Esta combinación de variables mejora la estimación de biomasa frente a un cálculo basado únicamente en el volumen.

Tabla 6.*Determinación de biomasa total en el rodal 1*

Grupo	Volumen (m3)	Peso específico (kg/m³)	Biomasa del Fuste (kg)	Biomasa Aérea (kg)	Biomasa de raíces (kg)	Biomasa total (kg)
1	4.18	506	2116	3682	1105	4786
2	6.02	511	3079	5357	1607	6964
3	4.77	499	2381	4143	1243	5386
4	8.70	507	4414	7680	2304	9984
5	4.48	490	2193	3816	1145	4961
6	4.27	508	2171	3777	1133	4910
7	5.15	494	2544	4427	1328	5755
8	5.42	515	2787	4849	1455	6304
9	4.89	501	2450	4262	1279	5541
10	5.99	502	3009	5236	1571	6807
11	4.66	506	2361	4108	1232	5340
12	4.13	505	2089	3635	1091	4726
13	5.18	510	2643	4599	1380	5979
14	4.89	506	2471	4300	1290	5590
15	5.37	511	2743	4774	1432	6206
16	4.33	507	2194	3818	1145	4964
17	3.99	507	2022	3518	1055	4573
18	5.67	513	2908	5060	1518	6577
19	5.91	515	3045	5299	1590	6888
20	6.11	513	3133	5451	1635	7086
21	4.11	502	2065	3592	1078	4670
22	3.59	508	1822	3171	951	4122
23	5.03	506	2545	4428	1328	5756
24	4.61	505	2328	4050	1215	5265
25	4.96	510	2530	4401	1320	5722
26	5.31	513	2721	4734	1420	6154
27	5.42	515	2790	4855	1456	6311
28	4.21	506	2128	3703	1111	4814
29	3.52	508	1790	3115	935	4050
30	4.91	506	2488	4329	1299	5628
31	5.15	508	2615	4550	1365	5916
32	4.99	510	2546	4430	1329	5759
33	5.34	513	2742	4771	1431	6203
34	6.19	515	3190	5551	1665	7216
35	6.03	515	3104	5401	1620	7021
36	3.03	502	1521	2646	794	3440

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en la Tabla 6 demuestran que la biomasa total del rodal 1 es de 207 374 kg, el grupo 4, presentó el mayor volumen, con 8.70 m³, y alcanzó la mayor biomasa total, con 9984 kg. Por el contrario, el grupo 36 registró el menor volumen y, en consecuencia, la menor biomasa total, con 3440 kg.

Tabla 7.

Determinación de biomasa total en el rodal 2

Grupo	Volumen (m3)	Peso específico (kg/m ³)	Biomasa del Fuste (kg)	Biomasa Aérea (kg)	Biomasa de raíces (kg)	Biomasa total (kg)
1	5.15	511	2630	4576	1373	5949
2	5.42	493	2669	4645	1393	6038
3	7.17	512	3669	6384	1915	8299
4	8.79	513	4511	7849	2355	10203
5	4.18	520	2174	3784	1135	4919
6	7.04	516	3628	6313	1894	8207
7	6.39	519	3319	5774	1732	7507
8	6.28	528	3315	5768	1730	7499
9	4.63	521	2416	4204	1261	5465
10	9.91	520	5151	8963	2689	11652
11	6.74	518	3491	6074	1822	7896
12	6.75	524	3536	6153	1846	7999
13	5.46	518	2829	4923	1477	6399
14	5.21	516	2686	4674	1402	6077
15	4.41	513	2265	3941	1182	5123
16	9.36	513	4799	8350	2505	10855
17	6.06	520	3150	5482	1644	7126
18	6.96	522	3629	6314	1894	8209
19	6.71	521	3499	6087	1826	7914
20	7.12	525	3742	6511	1953	8464
21	5.40	518	2796	4865	1460	6325
22	5.15	516	2654	4617	1385	6003
23	4.38	513	2251	3916	1175	5091
24	6.24	520	3244	5644	1693	7337
25	6.02	522	3147	5477	1643	7120
26	2.46	518	1272	2214	664	2878

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en la Tabla 7 demuestran que la biomasa total del rodal 2 es de 186 554 kg. El grupo 10 presentó el mayor volumen, con 9.91 m³, y alcanzó la mayor biomasa

total, con 11 652 kg. De igual forma, el grupo 16 presentó un volumen elevado de 9.36 m³ y una biomasa total de 10 855 kg.

Tabla 8.

Determinación de biomasa total en el rodal 3

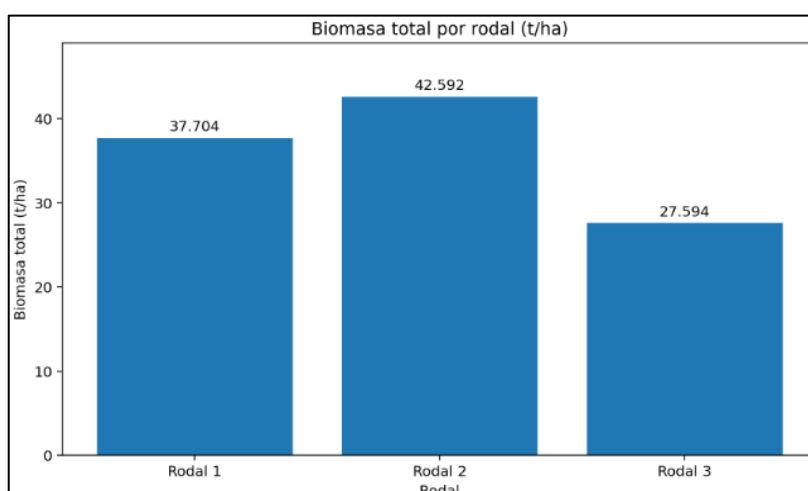
Grupo	Volumen (m3)	Peso específico (kg/m³)	Biomasa del Fuste (kg)	Biomasa Aérea (kg)	Biomasa de raíces (kg)	Biomasa total (kg)
1	6.74	516	3477	6049	1815	7864
2	6.75	518	3497	6085	1826	7911
3	10.83	511	5536	9632	2890	12522
4	8.59	512	4396	7648	2295	9943
5	5.77	518	2990	5202	1561	6762
6	4.31	490	2110	3671	1101	4772
7	3.65	516	1881	3273	982	4255
8	4.08	522	2127	3701	1110	4811
9	5.34	513	2740	4768	1430	6198
10	4.69	520	2438	4242	1273	5515
11	3.99	513	2048	3563	1069	4632
12	3.65	514	1876	3264	979	4243
13	3.84	513	1971	3429	1029	4458
14	3.33	513	1712	2979	894	3873
15	6.79	522	3550	6176	1853	8029
16	6.20	518	3212	5590	1677	7266
17	5.31	518	2750	4786	1436	6221
18	5.11	516	2637	4589	1377	5966
19	4.36	513	2236	3891	1167	5059
20	4.13	513	2120	3689	1107	4796
21	6.28	520	3262	5676	1703	7379
22	6.79	522	3545	6168	1850	8019
23	6.51	521	3394	5905	1772	7677
24	7.08	526	3723	6478	1943	8422
25	5.21	518	2701	4700	1410	6110
26	5.05	516	2605	4532	1360	5892
27	4.66	513	2391	4160	1248	5409
28	4.18	513	2148	3737	1121	4858
29	10.09	514	5187	9026	2708	11733
30	4.77	513	2448	4260	1278	5538
31	4.61	516	2376	4133	1240	5374
32	2.06	518	1067	1857	557	2414

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en la Tabla 8 demuestran que la biomasa total del rodal 3 fue de 203 921 kg, el grupo 3 presentó el mayor volumen, con 10.83 m³, y alcanzó la mayor biomasa total, con 12 522 kg. De manera similar, el grupo 29 registró un volumen de 10.09 m³ y una biomasa total de 11 733 kg. Esto confirma que, a mayor volumen maderable, mayor será la biomasa del fuste, la biomasa aérea y la biomasa total.

Figura 7.

Biomasa total por rodal



Fuente: Elaboración propia

La biomasa total estimada, expresada por unidad de superficie, fue de 37,704 t/ha en el rodal 1, 42,592 t/ha en el rodal 2 y 27,594 t/ha en el rodal 3. Estos resultados muestran que, aunque el rodal 1 presentó la mayor biomasa total en términos absolutos con 207 374 kg, al considerar la superficie de cada rodal el mayor valor correspondió al rodal 2. Este comportamiento evidencia la importancia de expresar la biomasa en toneladas por hectárea cuando se busca realizar comparaciones entre rodales con superficies diferentes.

Los resultados pueden compararse con Alarcón y Apaza (2023), quienes evaluaron plantaciones de *Eucalyptus globulus* en Cusco y reportaron una biomasa aérea de 74,138 t/ha, con 1111 árboles por hectárea. Los valores encontrados en los rodales de Chacas fueron menores: el rodal 1, 2 y 3 presentaron 37,704 t/ha, 42,592 t/ha y 27,594 t/ha. En comparación con los 74,138 t/ha reportados por Alarcón y Apaza.

Asimismo, los resultados fueron inferiores a los registrados por Kurtz et al. (2024), quienes determinaron una densidad de biomasa aérea de 207 ± 10 t/ha, en árboles del Jardín Botánico

de Río de Janeiro. Dicho estudio evaluó 6793 fustes con DAP igual o superior a 10 cm y obtuvo una biomasa aérea total de 8047 ± 402 Mg. Frente a estos valores, la biomasa estimada en Chacas fue considerablemente menor, puesto que el máximo correspondió al rodal 2 con 42,592 t/ha.

Por otra parte, los resultados guardan relación metodológica con Yoon et al. (2024), quienes evaluaron 117 árboles mediante muestreo destructivo y determinaron que aproximadamente el 30 % de la biomasa total se encontraba en las raíces. Asimismo, sus modelos presentaron coeficientes de determinación entre 0,853 y 0,982 para la biomasa aérea y entre 0,806 y 0,923 para la biomasa subterránea. En la presente investigación también se incorporó el componente radicular, aunque se utilizó un factor equivalente al 30 % de la biomasa aérea. Debido a ello, las raíces representan aproximadamente el 23,08 % de la biomasa total estimada en el procedimiento aplicado en Chacas. Esta comparación respalda la importancia de incorporar la biomasa subterránea para evitar una estimación incompleta de la biomasa forestal, pero también evidencia que la proporción radicular puede variar según la metodología y las especies evaluadas.

4.3 Análisis de las diferencias significativas en la captura de dióxido de carbono entre los distintos rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas, Juliaca – 2024.

Tabla 9.

Determinación de CO₂ en t/ha del rodal 1

Grupo	Carbono almacenado kg C/ha	Carbono almacenado t C/ha	CO ₂ (t/ha)
1	2846	2.85	10.45
2	4142	4.14	15.20
3	3203	3.20	11.76
4	5938	5.94	21.79
5	2950	2.95	10.83
6	2920	2.92	10.72
7	3423	3.42	12.56
8	3749	3.75	13.76
9	3295	3.30	12.09
10	4048	4.05	14.86
11	3176	3.18	11.66
12	2810	2.81	10.31
13	3555	3.56	13.05

14	3324	3.32	12.20
15	3690	3.69	13.54
16	2952	2.95	10.83
17	2719	2.72	9.98
18	3912	3.91	14.36
19	4096	4.10	15.03
20	4214	4.21	15.47
21	2777	2.78	10.19
22	2451	2.45	9.00
23	3423	3.42	12.56
24	3131	3.13	11.49
25	3403	3.40	12.49
26	3660	3.66	13.43
27	3753	3.75	13.77
28	2863	2.86	10.51
29	2408	2.41	8.84
30	3347	3.35	12.28
31	3518	3.52	12.91
32	3425	3.42	12.57
33	3689	3.69	13.54
34	4292	4.29	15.75
35	4175	4.18	15.32
36	2046	2.05	7.51

Fuente: Elaboración propia

Respecto al CO₂ equivalente, los valores variaron entre 7.51 t/ha y 21.79 t/ha. El mayor valor se presentó en el grupo 4, con 21.79 t/ha, seguido por los grupos 34, 20 y 35, con 15.75 t/ha, 15.47 t/ha y 15.32 t/ha, respectivamente. Por otro lado, los valores más bajos se observaron en los grupos 36, 29 y 22, con 7.51 t/ha, 8.84 t/ha y 9.00 t/ha, respectivamente.

Tabla 10.

Determinación de CO₂ en t/ha del rodal 2

Grupo	Carbono almacenado kg C/ha	Carbono almacenado t C/ha	CO₂ (t/ha)
1	3538	3.54	12.98
2	3591	3.59	13.18
3	4935	4.94	18.11
4	6068	6.07	22.27
5	2925	2.93	10.74
6	4881	4.88	17.91

7	4464	4.46	16.38
8	4459	4.46	16.37
9	3250	3.25	11.93
10	6929	6.93	25.43
11	4696	4.70	17.23
12	4757	4.76	17.46
13	3806	3.81	13.97
14	3614	3.61	13.26
15	3047	3.05	11.18
16	6455	6.46	23.69
17	4238	4.24	15.55
18	4882	4.88	17.92
19	4706	4.71	17.27
20	5033	5.03	18.47
21	3761	3.76	13.80
22	3570	3.57	13.10
23	3028	3.03	11.11
24	4363	4.36	16.01
25	4234	4.23	15.54
26	1711	1.71	6.28

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al CO₂ equivalente, los valores oscilaron entre 6.28 t/ha y 25.43 t/ha. El mayor valor se presentó en el grupo 10, con 25.43 t/ha, seguido por los grupos 16 y 4, con 23.69 t/ha y 22.27 t/ha, respectivamente. En contraste, los menores valores se observaron en los grupos 26, 5 y 23, con 6.28 t/ha, 10.74 t/ha y 11.11 t/ha,

Tabla 11.

Determinación de CO₂ en t/ha del rodal 3

Grupo	Carbono almacenado kg C/ha	Carbono almacenado t C/ha	CO₂ (t/ha)
1	4677	4.68	17.16
2	4705	4.70	17.27
3	7447	7.45	27.33
4	5913	5.91	21.70
5	4022	4.02	14.76
6	2838	2.84	10.41
7	2531	2.53	9.29
8	2861	2.86	10.50

9	3686	3.69	13.53
10	3280	3.28	12.04
11	2755	2.75	10.11
12	2523	2.52	9.26
13	2651	2.65	9.73
14	2303	2.30	8.45
15	4775	4.78	17.52
16	4321	4.32	15.86
17	3700	3.70	13.58
18	3548	3.55	13.02
19	3008	3.01	11.04
20	2852	2.85	10.47
21	4388	4.39	16.11
22	4769	4.77	17.50
23	4565	4.57	16.75
24	5008	5.01	18.38
25	3633	3.63	13.33
26	3504	3.50	12.86
27	3216	3.22	11.80
28	2889	2.89	10.60
29	6978	6.98	25.61
30	3294	3.29	12.09
31	3196	3.20	11.73
32	1436	1.44	5.27

Fuente: Elaboración propia

Respecto al CO₂ equivalente, los valores variaron entre 5.27 t/ha y 27.33 t/ha. El mayor valor se obtuvo en el grupo 3, con 27.33 t/ha, seguido por el grupo 29, con 25.61 t/ha, y el grupo 4, con 21.70 t/ha. En cambio, los menores valores se registraron en los grupos 32, 14 y 12, con 5.27 t/ha, 8.45 t/ha y 9.26 t/ha, respectivamente.

Tabla 12.

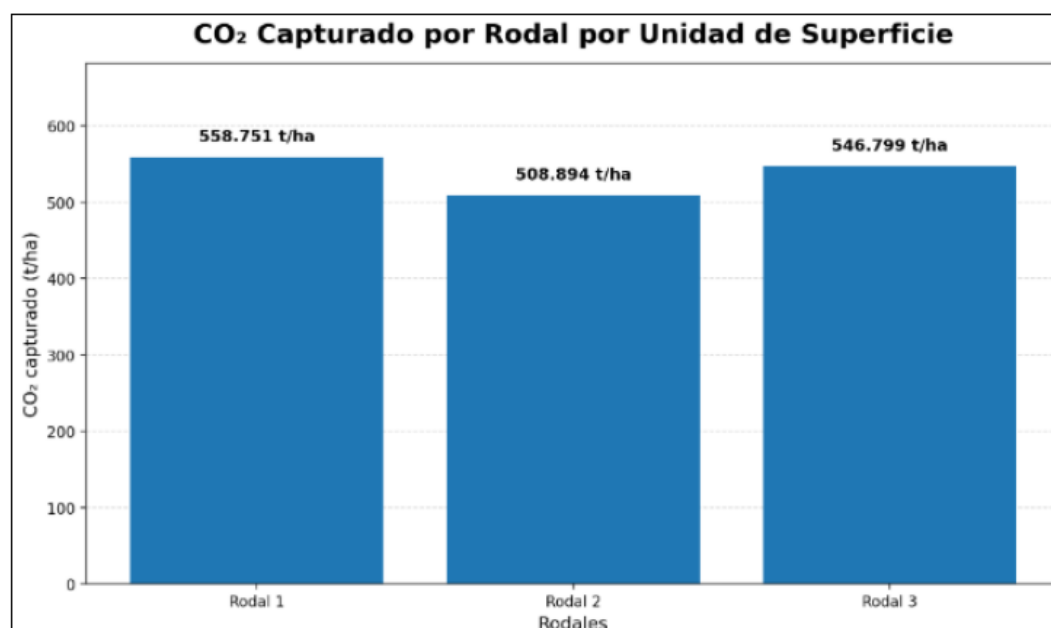
Determinación de CO₂ en t/ha de los tres rodales

Rodal	Total (t CO ₂ /ha)
Rodal 1	558.751
Rodal 2	508.894
Rodal 3	546.799

Fuente: Elaboración propia

Figura 8.

Captura de CO₂ de los rodales de Eucalyptus globulus en t/ha



Fuente: Elaboración propia

Los valores presentados en la tabla 12 y en la figura 5 corresponden al dióxido de carbono capturado (t CO₂/ha), determinado considerando conjuntamente el carbono almacenado en la biomasa forestal, constituida por la biomasa aérea y la biomasa radicular estimada, y el carbono orgánico almacenado en el suelo. En el rodal 1 se obtuvo un stock total de 558,751 t CO₂/ha, seguido del rodal 3 con 546,799 t CO₂/ha y del rodal 2 con 508,894 t CO₂/ha. De esta manera, el rodal 1 presentó el mayor valor de almacenamiento de CO₂ equivalente por hectárea, mientras que el rodal 2 registró el menor.

Estos resultados pueden compararse con Alarcón y Apaza (2023), quienes evaluaron plantaciones de *Eucalyptus globulus* en Cusco y determinaron 136,04 t CO₂/ha. Por tanto, los valores obtenidos en Chacas fueron considerablemente superiores. La diferencia puede estar relacionada con que Alarcón y Apaza (2023) cuantificaron principalmente biomasa aérea, mientras en la presente investigación se incorporó la biomasa total forestal, considerando también la biomasa radicular estimada, influye las diferencias en DAP, altura, densidad de madera, edad de los individuos y características propias de cada sitio.

De manera similar, Kurtz et al. (2024) determinaron aproximadamente 381,68 ± 18,35 t CO₂/ha. Este resultado se aproxima considerablemente a los valores encontrados en Chacas.

La proximidad entre estos resultados evidencia que las cantidades obtenidas en los rodales de Chacas se encuentran dentro de magnitudes observadas en coberturas arbóreas con elevada acumulación de biomasa.

Por otro lado, Salgado et al. (2025) evaluaron distintos compartimentos de carbono en sistemas agroforestales de la Amazonía central peruana y determinaron que el sistema con *Retrophyllum rospigliosii* alcanzó aproximadamente 698,69 t CO₂/ha, siendo superior a los valores encontrados en los rodales 1, 2 y 3 de Chacas. Ambos estudios coinciden en demostrar que una mayor cantidad de biomasa y una estructura vegetal más desarrollada permiten almacenar mayores cantidades de carbono y, consecuentemente, mayores cantidades equivalentes de CO₂.

Los resultados también presentan correspondencia con la investigación de Yantas (2022), quien determinó una captura de 526.64 t de CO₂/ha en plantaciones de *Eucalyptus globulus*. A pesar de las variaciones encontradas entre sus estimaciones y las obtenidas en los rodales de Juliaca, ambos estudios reconocen el elevado potencial de esta especie para secuestrar carbono.

Por su parte, Herrera y Quispe (2020) señalaron que *Eucalyptus globulus* puede almacenar una mayor cantidad de carbono que especies nativas como *Polylepis incana*, principalmente por su crecimiento acelerado y por alcanzar diámetros superiores.

Con la finalidad de determinar si las diferencias observadas entre los rodales fueron estadísticamente significativas, se aplicó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) la cual se muestra detalladamente en el Anexo 6, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. El análisis obtuvo un estadístico $F = 4,740$ y un valor $p = 0,011$.

Debido a que el valor p fue inferior al nivel de significancia establecido ($p = 0,011 < 0,05$), se rechazó la hipótesis nula y se determinó que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de CO₂ de los rodales evaluados. En consecuencia, los resultados respaldan la tercera hipótesis específica, precisándose que el ANOVA demuestra que si existen diferencias estadísticamente significativas en la captura de CO₂ entre los tres rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Los rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas presentaron una importante capacidad de almacenamiento de dióxido de carbono. El rodal 1 registró 558.751 t CO₂/ha, el rodal 2 508.894 t CO₂/ha y el rodal 3 546.799 t CO₂/ha, siendo el rodal 1 el de mayor almacenamiento por hectárea. Destacando el rodal 1 por presentar los mayores valores de biomasa total y dióxido de carbono equivalente, lo que demuestra la relevancia ambiental de estos rodales como reservorios naturales de carbono y su potencial contribución a las estrategias locales de mitigación frente al cambio climático.

Se determinaron las características edáficas y dasonómicas de los rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas, evidenciándose variaciones entre las áreas evaluadas. En las características edáficas, el rodal 3 presentó el mayor contenido promedio de materia orgánica, con 2,84 %, el rodal 1 registró 2,04 % de materia orgánica, mientras que el rodal 2 presentó 1,79 %. En cuanto a las características dasonómicas, el DAP varió entre 16,2 y 24,2 cm en el rodal 1, entre 17,6 y 25,9 cm en el rodal 2 y entre 16,0 y 26,5 cm en el rodal 3; asimismo, se identificaron variaciones en la altura, el volumen del fuste y la cantidad de individuos de cada rodal.

La cuantificación de la biomasa total de los rodales de *Eucalyptus globulus*, considerando la biomasa aérea y la biomasa radicular estimada, permitió determinar 37.704 t/ha en el rodal 1, 42.592 t/ha en el rodal 2 y 27.594 t/ha en el rodal 3. En consecuencia, el rodal 2 presentó la mayor cantidad de biomasa total, seguido muy cercanamente por el rodal 1, mientras que el rodal 3 registró el menor valor, esto debido al área considerada en cada rodal.

Se determinó que existen diferencias significativas en la captura de dióxido de carbono entre los rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas, debido a que el análisis de varianza obtuvo un valor $p = 0,011$, inferior al nivel de significancia establecido de 5%, se rechazó la hipótesis nula y se respaldó la tercera hipótesis específica, concluyéndose que existe diferencia estadística significativa

5.2. Recomendaciones

Se recomienda a la Municipalidades, en coordinación con las instituciones responsables de la gestión ambiental, impulse acciones de forestación y recuperación de áreas degradadas próximas a la laguna Chacas. Estas iniciativas podrían considerar el uso de *Eucalyptus globulus*, debido al nivel de almacenamiento de carbono registrado en los rodales estudiados.

Se recomienda realizar evaluaciones periódicas de los rodales analizados para conocer los cambios que experimentan con el paso del tiempo. Este seguimiento deberá incluir la medición del diámetro a la altura del pecho, la altura de los árboles y la cantidad de individuos por unidad de superficie, lo que permitirá actualizar las estimaciones de biomasa y carbono acumulado.

Para próximos estudios, se propone analizar especies forestales distintas a *Eucalyptus globulus*, incluyendo variedades nativas y exóticas que se desarrollan en la región Puno. De esta manera, será posible comparar su capacidad para retener dióxido de carbono e identificar aquellas que ofrezcan mejores resultados frente al cambio climático.

Se plantea a las autoridades locales utilizar la información generada en esta investigación como un insumo para formular o fortalecer sus instrumentos de gestión ambiental. La conservación de los rodales cercanos a la laguna Chacas puede contribuir al almacenamiento natural de carbono y apoyar las acciones locales orientadas a disminuir la concentración de gases de efecto invernadero.

Se recomienda complementar los métodos tradicionales de evaluación forestal con herramientas tecnológicas, como imágenes satelitales, teledetección y sistemas de información geográfica. Su aplicación facilitaría el análisis de áreas de mayor extensión y permitiría obtener estimaciones más precisas sobre la distribución de la biomasa y las reservas de carbono en la región Puno.

.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcon, F., & Apaza, P. (2023). *Almacenamiento de carbono aéreo en plantaciones forestales de Eucalyptus globulus Labill y Pinus radiata en el distrito de Ccatca, Quispicanchi, Cusco-2023* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/117249>
- Alfaro, R. (2017). *Captura de carbono en rebrotes de Eucalyptus globulus Labill «eucaliptus» en Motil, provincia de Otuzco del departamento de La Libertad-Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/7969>
- Arévalo, W., & Alcántara, F. (2021). Cobertura arbórea y captura de dióxido de carbono en los parques urbanos. Caso: Lima Norte. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(47), 13–18. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i47.20638>
- Bacani, V. M., da Silva, B. H. M., Sato, A. A. de S. A., Sampaio, B. D. S., da Cunha, E. R., Vick, E. P., de Oliveira, V. F. R., & Decco, H. F. (2024). Carbon storage and sequestration in a eucalyptus productive zone in the Brazilian Cerrado, using the Ca-Markov/Random Forest and InVEST models. *Journal of Cleaner Production*, 444, Artículo 141291. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141291>
- Bond-Lamberty, B., Ballantyne, A., Berryman, E., Fluet-Chouinard, E., Jian, J., Morris, K. A., Rey, A., & Vargas, R. (2024). Twenty years of progress, challenges, and opportunities in measuring and understanding soil respiration. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 129(2), Artículo e2023JG007637. <https://doi.org/10.1029/2023JG007637>
- Cajilema, D., & Fernández, D. (2023). *Estimación de la capacidad de captura de carbono de cuatro especies arbóreas predominantes de las riberas del río Machángara-Cuenca-Ecuador* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24497/1/UPS-CT010381.pdf>
- Carbajal, C., Tumbalobos-Dextre, M., Condori-Ataupillco, T., Cuellar-Condori, N., & Gavilan, C. (2025). Spatial prediction of soil organic carbon stocks across contrasting Andean basins, Peru. *Geoderma Regional*, 43, Artículo e01026. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2025.e01026>
- Cárdenas, H. (2022). *Potencial de captura de carbono en una plantación de Eucalyptus globulus Labill en la CC de Uñas, Huancayo* [Tesis de pregrado, Universidad

- Nacional del Centro del Perú].
<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/8466>
- Cárdenas, R. (2016). *Evaluación del potencial de los bosques de Eucalyptus globulus y Pinus radiata como sumideros de carbono en el entorno del Parque Nacional Huascarán (Perú)* [Tesis doctoral, Universidad de Salamanca].
<https://gredos.usal.es/handle/10366/129634>
- Cárdenas, R. C., Gallardo Lancho, J. F., & Loli Figueroa, O. O. (2026). Almacenamiento de carbono en plantaciones exóticas andinas: *Eucalyptus globulus* vs *Pinus radiata*. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 10(28), 502–517.
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i28.448>
- Carlín, D., & Macías, D. (2018). *Valoración de la captación de carbono para la conservación ambiental en el sector La Pita de la parroquia Quiroga* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López].
<https://repositorio.espam.edu.ec/items/a486408e-dc16-4dc6-8e0d-a624915ccc1a>
- Chartered Institute of Ecology and Environmental Management. (2024). *Carbon in ecosystems*. <https://www.ser.org/events/eventdetails.aspx?id=1889529>
- Chaudhury, G., Darji, C. B., Basumatari, M., Dutta, G., Devi, A., & Bharadwaj, N. (2022). Stand structure, biomass and carbon stock along disturbance gradients in differently managed tropical forests of Assam, northeast India. *Trees, Forests and People*, 9, Artículo 100296. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100296>
- Chávez, J. (2018). *Captura y almacenamiento de carbono de los bosques estacionalmente secos de la costa norte (Lambayeque), como mitigación frente al cambio climático* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina].
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3346>
- Chimbo, I. (2016). *Evaluación del carbono en la biomasa de dos especies forestales introducidas (Eucalyptus y Pinus) y una especie nativa (Hesperomeles ferruginea) en el bosque Aguarongo* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana].
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/11782>
- Corticeiro, S., Pinto, J., Maia, P., Chaby, I., Rocha, J., Keizer, J. J., Oliveira, B. R. F., Teixeira, C., Fabres, S., Fernandes, P. M., & Quintela, A. (2026). Short-term effects of prescribed fire for *Eucalyptus globulus* Labill. slash management in Portugal. *Journal of Forestry Research*, 37, Artículo 95. <https://doi.org/10.1007/s11676-026-02037-8>

- Crespo, X. (2021). *Cálculo del carbono secuestrado en la biomasa aérea en el Parque Metropolitano Guangüiltagua para apoyar iniciativas de disminución de la huella de carbono de la ciudad de Quito* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica Indoamérica]. <https://repositorio.uti.edu.ec/handle/123456789/2652>
- Cruzado, W. (2021). *Evaluación del crecimiento e incremento de las plantaciones de Pinus radiata D. Don, en el centro poblado Cobro Negro-San Silvestre de Cochan* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/4440>
- Du, H., Bao, Z., & Zhou, F. (2024). Carbon sequestration of common garden tree species under the carbon neutrality target in East China. *Forests*, 15(10), Artículo 1692. <https://doi.org/10.3390/f15101692>
- Farinango, J. (2020). *Determinación de la relación de emisión y captura de carbono en el arbolado de las avenidas de cuatro parroquias urbanas del cantón Ibarra* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10714>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *Global forest resources assessment 2020: Main report*. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *The state of the world's forests 2024: Forest-sector innovations towards a more sustainable future*. <https://doi.org/10.4060/cd1211en>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Alkama, R., . . . Zheng, B. (2025). Global carbon budget 2024. *Earth System Science Data*, 17(3), 965–1039. <https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025>
- Gaona, Y. (2026). *Estimación teórica de la capacidad de captura de carbono de especies arbóreas predominantes en las riberas localizadas en la avenida Orillas del Zamora de la ciudad de Loja, Ecuador* [Tesis de maestría, Universidad Técnica de Ambato]. <https://repositorio.uta.edu.ec/items/fa75ea2e-8d2d-4243-984c-57ea03cfa6bf>
- Garate, J., Herrera-Machaca, M., Pareja Auquipata, V., Alarcón Aguirre, G., Baez Quispe, S., & Carpio-Vargas, E. E. (2024). Resilience of aboveground biomass of secondary forests following the abandonment of gold mining activity in the southeastern Peruvian Amazon. *Diversity*, 16(4), Artículo 233. <https://doi.org/10.3390/d16040233>

- Ginez, A. (2019). *Estimación del carbono total almacenado en los bosques altoandinos (Polylepis sp.) del distrito de Capaso mediante modelo InVEST* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Juliaca]. <http://repositorio.unaj.edu.pe/handle/UNAJ/40>
- Guan, L., Sun, Y., Yuan, M. Q., Li, J., Zhang, Y. J., & Tang, J. Y. (2025). Forest soil organic carbon review. *American Journal of Plant Sciences*, 16(1), 155–169. <https://doi.org/10.4236/ajps.2025.161014>
- Gutiérrez, B., & Flores, A. (2018). Captura de carbono y modelos alométricos para estimar biomasa en rodales naturales de *Pinus oocarpa* Schl. et Cham. en Chiapas, México. *Foresta Veracruzana*, 20(2), 21–28. <https://www.redalyc.org/journal/497/49758340005/>
- Hanco, E. (2018). *Determinación de la captura de carbono en suelos con eucalipto (Eucalyptus globulus Labill) en el distrito de Huancané-Puno, 2018* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Unión]. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/1785>
- Hao, Y., Mao, J., Bachmann, C. M., Hoffman, F. M., Koren, G., Chen, H., Tian, H., Liu, J., Tao, J., Tang, J., Li, L., Liu, L., Apple, M., Shi, M., Jin, M., Zhu, Q., Kannenberg, S., Shi, X., Zhang, X., . . . Dai, Y. (2025). Soil moisture controls over carbon sequestration and greenhouse gas emissions: A review. *npj Climate and Atmospheric Science*, 8, Artículo 16. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00888-8>
- Herrera, E., & Quispe, H. (2020). *Almacenamiento de carbono en las especies forestales Polylepis incana Kunth y Eucalyptus globulus Labill. Distrito de San Sebastián, Cusco-2020* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/59188>
- Huynh, T., Lewis, T., Applegate, G., Pachas, A. N. A., & Lee, D. J. (2022). Allometric equations to estimate aboveground biomass in spotted gum (*Corymbia citriodora* subspecies *variegata*) plantations in Queensland. *Forests*, 13(3), Artículo 486. <https://doi.org/10.3390/f13030486>
- Igartúa, D., Moreno, K., Piter, J., & Monteoliva, S. (2015). Densidad y propiedades mecánicas de la madera de *Acacia melanoxylon* implantada en Argentina. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 17(4), 809–820. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000070>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume 4. Agriculture, forestry and other land use*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Juarez, Y. (2015). *Dasometría*. Juárez Y Editorial.
- Kalra, Y. P., & Maynard, D. G. (1991). *Methods manual for forest soil and plant analysis* (Information Report NOR-X-319). Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Centre.
- Khanal, S., Adhikari, H., & Ghimire, P. (2023). Mapping soil organic carbon stocks in Nepal's forests. *Scientific Reports*, 13, Artículo 7325. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34247-z>
- Kibrie, W., Bedassa, T., Amdemariam, T., Getachew, K., & Debebe, F. (2026). Spatial variation of soil physicochemical properties along distance gradients from *Eucalyptus globulus* trees in northwestern Ethiopia. *Discover Environment*, 4, Artículo 313. <https://doi.org/10.1007/s44274-026-00846-6>
- Kurtz, B. C., de Almeida, T. M. H., Coelho, M. A. N., Deccache, L. S. J., Tortorelli, R. M., Gonzaga, D. R., Madureira, L. K., Guedes-Oliveira, R., Barros, C. F., & de Siqueira, M. F. (2024). Quantifying the carbon stocks in urban trees: The Rio de Janeiro Botanical Garden as an important tropical carbon sink. *Journal of Zoological and Botanical Gardens*, 5(4), 579–589. <https://doi.org/10.3390/jzbg5040039>
- Lachowicz, H., Bieniasz, A., & Wojtan, R. (2019). Variability in the basic density of silver birch wood in Poland. *Silva Fennica*, 53(1), Artículo 9968. <https://doi.org/10.14214/sf.9968>
- Li, T., Wu, X.-C., Wu, Y., & Li, M.-Y. (2023). Forest carbon density estimation using tree species diversity and stand spatial structure indices. *Forests*, 14(6), Artículo 1105. <https://doi.org/10.3390/f14061105>
- Lian, Y., Li, H., Liu, L., Dong, J., Liu, X., Qu, Z., Li, L., Chen, L., Wang, D., & Zhang, H. (2023). Mapping the net ecosystem exchange of CO₂ of global terrestrial systems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 116, Artículo 103176. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103176>
- Linares, L. (2022). *Estimación de la captura y almacenamiento de carbono por los árboles de la Universidad de Antioquia en Ciudad Universitaria* [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia]. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/30121>

- Martínez, A. (2019). *Estimación de la captura de carbono y la evaluación del riesgo del bosque del Tecnológico de Antioquia* [Tesis de pregrado, Tecnológico de Antioquia]. <https://dspace.tdea.edu.co/handle/tda/473>
- Medina, J. (2010). La dieta del dióxido de carbono (CO₂). *Conciencia Tecnológica*, (39), 50–53.
- Mendoza-Lopez, K., Ordoñez-Sánchez, L., Valdez-Andía, M. J., Lozano-Chung, A., García-Gonzales, P. E., Saavedra-Ramírez, J., Macedo-Córdova, W., Baselly-Villanueva, J. R., Reategui, K., Gaona-Jimenez, N., & Vallejos-Torres, G. (2024). Estimates of soil organic carbon in the Ojos de Agua and El Quinillal forests in the Central Huallaga of Peru. *International Journal of Forestry Research*, 2024, Artículo 5692145. <https://doi.org/10.1155/2024/5692145>
- Mijangos, A. (2015). *Estimación del contenido y captura de carbono en la biomasa arbórea del bosque de San Juan de Aragón, Distrito Federal* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://ru.dgb.unam.mx/items/7693ccee-3aba-4d31-a6ae-e8de44ca22b5>
- Ministerio del Ambiente. (2024). *Primer informe bienal de transparencia del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/7999450-informe-bienal-de-transparencia-del-peru-2024>
- Miranda, A., & Cruzado, I. (2020). *Determinación de la captura de carbono en pastos naturales altoandinos Stipa ichu y Alchemilla vulgaris Tantachual Bajo, Cajamarca* [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/24006>
- Mollocondo, M., & Aguilar, L. (2019). *Estimación de la captura de CO₂ en plantaciones forestales de Polylepis sp., Cupressus spp. y Eucalyptus globulus, para mitigar el cambio climático en el Centro de Producción San Juan de Potojani-Puno, 2018* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Unión]. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/1742>
- Mthembu, N., Lottering, R., & Kotze, H. (2023). Forest, crop and grassland leaf area index estimation using remote sensing: A review of current research methods, sensors, estimation models and accomplishments. *Applied Sciences*, 13(6), Artículo 4005. <https://doi.org/10.3390/app13064005>
- Muñoz, M., & Vásquez, E. (2020). *Estimaciones del potencial de captura de carbono en los parques urbanos y emisiones de CO₂ vehiculares en Cuenca-Ecuador* [Tesis de

- pregrado, Universidad Politécnica Salesiana].
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18390>
- Pang, D., & Xu, H. (2024). Carbon sequestration and stability and soil erosion in forest ecosystems. *Forests*, 15(11), Artículo 1961. <https://doi.org/10.3390/f15111961>
- Ramírez, J., & Chagna, E. (2019). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Eucalyptus grandis* W. Hill. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 7(1). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2310-34692019000100086
- Ribeiro, F. P., Gatto, A., de Oliveira, A. D., Pulrolnik, K., Valadão, M. B. X., Araújo, J. B. C. N., de Carvalho, A. M., & Ferreira, E. A. B. (2023). Carbon storage in different compartments in eucalyptus stands and native Cerrado vegetation. *Plants*, 12(14), Artículo 2751. <https://doi.org/10.3390/plants12142751>
- Rivas, D. (2006). *Sistemas de producción forestal: Evaluación de los recursos forestales* [Archivo PDF]. Universidad Autónoma Chapingo. <https://www.fao.org/forest-resources-assessment/es>
- Rodríguez, Y., Ajete, A., Orta, S., Rondón, D., & Rivera, J. (2018). Comportamiento del carbono retenido en el arbolado urbano en el sur de la ciudad de Guantánamo. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 6(3), 284–299. <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/download/348/html?inline=1>
- Salgado Veramendi, N., Romero-Chavez, L. E., Huerto Pajuelo, E. S., Ibarra Porras, C. del C., Cunyas-Camayo, J. M., Aldava Pardave, U., Vallejos-Torres, G., & Solórzano Acosta, R. (2025). Carbon storage in coffee agroforestry systems: Role of native and introduced shade trees in the central Peruvian Amazon. *Agriculture*, 15(13), Artículo 1415. <https://doi.org/10.3390/agriculture15131415>
- Sánchez, T., Núñez, M., & Romero Rojas, J. (2025). Cuantificación de carbono en la biomasa aérea de dos sistemas agroforestales (SAFS) en las provincias de San Ignacio y Jaén-Cajamarca. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(2), 2248–2267. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2.17057
- Schlegel, B., Gayoso, J., & Guerra, J. (2000). *Manual de procedimientos y muestreos de biomasa forestal* [Archivo PDF]. Universidad Austral de Chile. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstreams/288f5c4b-1223-4cd5-84f1-4a1e0f894a5b/download>
- Sosa, J. (2016). *Valoración económica del secuestro de CO₂ en tres tipos de bosques en el distrito de Alto Nanay, Loreto-Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de la

<https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/handle/20.500.12737/4283>

- Su, J., Yu, M., Zhang, X., Xu, J., & Gao, J. (2025). A comparison of the impact of latitude on the root-shoot ratio of natural and planted forests. *Forests*, 16(3), Artículo 381. <https://doi.org/10.3390/f16030381>
- Tammadid, W., Sangkachai, B., Chanonmuang, P., Chidthaisong, A., & Hanpattanakit, P. (2024). Comparison and environmental controls of soil respiration in primary and secondary dry dipterocarp forests in Thailand. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7, Artículo 1294942. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1294942>
- Taquire, A. (2023). *Anatomía y propiedades de la madera* (Vol. 1). Editorial Académica.
- Tarazona, L. (2022). *Evaluación del efecto de plantaciones de eucalipto (Eucalyptus globulus) y un bosque natural de aliso (Alnus glutinosa) en la calidad del suelo, en la zona de Ragraj-San Buenaventura* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Hermilio Valdizán].
- Tian, L., Tao, Y., Simms, J., Mäkelä, A., & Li, M. (2024). How forest age impacts on net primary productivity: Insights from future multi-scenarios. *Forest Ecosystems*, 11, Artículo 100228. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2024.100228>
- Toledo, A. (2020). *Captura de carbono en la especie Tillandsia werdermanni y Tillandsia purpurea (siempre viva) en las Lomas Arrojadero situada entre los distritos de Inclán y Locumba* [Tesis de pregrado, Universidad Privada de Tacna]. <https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/1710>
- United Nations Environment Programme. (2024). *Emissions gap report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments*. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404>
- Universidad Rural de Guatemala. (2022). *Manual de inventarios forestales* [Archivo PDF]. <https://openknowledge.fao.org/bitstreams/d6c9e042-8573-4b84-a311-64ec92106bdc/download>
- Vallejos, G., Gaona-Jimenez, N., Pichis-García, R., Ordoñez, L., García-Gonzales, P., Quinteros, A., Lozano, A., Saavedra-Ramírez, J., Tuesta-Hidalgo, J. C., Reategui, K., Macedo-Córdova, W., Baselly-Villanueva, J. R., & Marín, C. (2024b). Carbon reserves in coffee agroforestry in the Peruvian Amazon. *Frontiers in Plant Science*, 15, Artículo 1410418. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1410418>
- Vallejos, G., Lozano-Chung, A., Ordoñez-Sánchez, L., García-Gonzales, P., Quinteros, A., Gaona-Jimenez, N., Mendoza-Caballero, W., Macedo-Córdova, W., Saavedra-

- Ramirez, J., Baselly-Villanueva, J. R., & Marín, C. (2024a). Forest land-use change affects soil organic carbon in tropical dry forests of the Peruvian Amazon. *Forest Systems*, 33(3), Artículo 20896. <https://doi.org/10.5424/fs/2024333-20896>
- Valverde, J., Barrena, V., & Guillen, R. (2019). Estimación de la biomasa aérea de *Eucalyptus globulus* Labill plantado en cercos vivos, distrito Huertas, Junín (Perú). *Revista Forestal del Perú*, 34(1). <https://doi.org/10.21704/rfp.v34i1.1285>
- Vásquez, O., García, E., & Ramírez, J. (2015). Specific gravity of wood from two pines and its relation with edaphic properties. *Maderas y Bosques*, 21(1), 129–138.
- World Health Organization. (2024, 24 de octubre). *Ambient (outdoor) air pollution*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- World Meteorological Organization. (2024). *WMO greenhouse gas bulletin No. 20: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2023*. <https://library.wmo.int/idurl/4/69057>
- World Meteorological Organization. (2025). *State of the climate update for COP30*.
- Yana, D. (2019). *Captura de dióxido de carbono en relación con la biomasa de las especies forestales predominantes del ornato urbano en Juliaca, 2019* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Juliaca]. <http://repositorio.unaj.edu.pe/handle/UNAJ/78>
- Yantas, K. (2022). *Estimación del nivel de captura de dióxido de carbono del eucalipto (Eucalyptus globulus), ciprés (Cupressus macrocarpa) y pino (Pinus radiata), en la localidad de Huariaca, Pasco-2019* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <http://45.177.23.200/handle/undac/2646>
- Yoon, T. K., Lee, S., Lee, S., Lee, J.-M., Son, Y., & Lee, S. (2024). Root biomass allocation and carbon sequestration in urban landscaping tree species in South Korea. *Forests*, 15(12), Artículo 2104. <https://doi.org/10.3390/f15122104>
- Zapana, M. (2016). *Carbono almacenado en la biomasa aérea de los queñoales (Polylepis spp.) en el bosque de Motoni-San Cayetano ubicado en el distrito de Pucará-Región Puno* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. https://biblioteca.unap.edu.pe/opac_css/index.php?lvl=author_see&id=100304

ANEXOS

Anexo 1. Informe de análisis del cálculo de Materia Orgánica en suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



INFORME DE ANÁLISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : CARLOS GABRIEL TIPULA YANAPA
PROCEDENCIA : PUNO/ SAN ROMAN/ JULIACA/ LAGUNA CHACAS
REFERENCIA : H.R. 84581
BOLETA : 7061
FECHA : 10/01/2025

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	M.O. %
7924	M01 - R 01	4.03
7925	M02 - R 01	1.01
7926	M03 - R 01	1.07
7927	M01 - R 02	2.49
7928	M02 - R 02	1.14
7929	M03 - R 02	1.75
7930	M01 - R 03	3.22
7931	M02 - R 03	3.69
7932	M03 - R 03	1.81



[Signature]
Dra. Lily Tello Peramás
Jefa de Laboratorio

Fuente: (Universidad Nacional Agraria La Molina, 2024)

Anexo 2. Inventario por grupos y volumen de *Eucalyptus globulus* del rodal 1

Grupo	Número de Árboles	DAP Promedio (cm)	Altura Promedio (m)	Volumen Total(m³)
1	20	14	17.2	4.183
2	20	17	16.8	6.025
3	20	15	17.1	4.774
4	20	21	15.9	8.701
5	20	14	18.4	4.475
6	20	15	15.3	4.272
7	20	16	16.2	5.146
8	20	17	15.1	5.415
9	20	16	15.4	4.892
10	20	18	14.9	5.991
11	20	15	16.7	4.663
12	20	14	17	4.135
13	20	16	16.3	5.178
14	20	15	17.5	4.886
15	20	16	16.9	5.369
16	20	14	17.8	4.329
17	20	14	16.4	3.989
18	20	17	15.8	5.666
19	20	18	14.7	5.910
20	20	18	15.2	6.111
21	20	14	16.9	4.110
22	20	13	17.1	3.586
23	20	15	18	5.026
24	20	15	16.5	4.607
25	20	16	15.6	4.956
26	20	17	14.8	5.308
27	20	17	15.1	5.415
28	20	14	17.3	4.208
29	20	13	16.8	3.523
30	20	15	17.6	4.914
31	20	16	16.2	5.146
32	20	16	15.7	4.988
33	20	17	14.9	5.344
34	20	18	15.4	6.192
35	20	18	15	6.031
36	15	14	16.6	3.028

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3. *Inventario por grupos y volumen de Eucalyptus globulus del rodal 2*

Grupo	Número de Árboles	DAP Promedio (cm)	Altura Promedio (m)	Volumen Total (m³)
1	20	16	16.2	5.146
2	20	17	15.1	5.415
3	20	19	16	7.168
4	20	20	17.7	8.786
5	20	14	17.2	4.183
6	20	18	17.5	7.036
7	20	18	15.9	6.393
8	20	17	17.5	6.276
9	20	15	16.6	4.635
10	20	22	16.5	9.910
11	20	17	18.8	6.742
12	20	18	16.8	6.755
13	20	16	17.2	5.464
14	20	16	16.4	5.210
15	20	15	15.8	4.412
16	20	21	17.1	9.358
17	20	17	16.9	6.061
18	20	18	17.3	6.956
19	20	18	16.7	6.714
20	20	19	15.9	7.123
21	20	16	17	5.401
22	20	16	16.2	5.146
23	20	15	15.7	4.384
24	20	17	17.4	6.240
25	20	17	16.8	6.025
26	6	20	16.5	2.457

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4. *Inventario por grupos y volumen de Eucalyptus globulus del rodal 3*

Grupo	Número de Árboles	DAP Promedio (cm)	Altura Promedio (m)	Volumen Total (m³)
1	20	17	18.8	6.742
2	20	18	16.8	6.755
3	20	23	16.5	10.831
4	20	20	17.3	8.587
5	20	17	16.1	5.774
6	20	14	17.7	4.305
7	20	14	15	3.648
8	20	15	14.6	4.076
9	20	16	16.8	5.337
10	20	15	16.8	4.691
11	20	14	16.4	3.989
12	20	13	17.4	3.649
13	20	14	15.8	3.843
14	20	13	15.9	3.335
15	20	18	16.9	6.795
16	20	17	17.3	6.204
17	20	16	16.7	5.305
18	20	16	16.1	5.115
19	20	15	15.6	4.356
20	20	14	17	4.135
21	20	17	17.5	6.276
22	20	18	16.9	6.795
23	20	18	16.2	6.513
24	20	19	15.8	7.078
25	20	16	16.4	5.210
26	20	16	15.9	5.051
27	20	15	16.7	4.663
28	20	14	17.2	4.183
29	20	22	16.8	10.090
30	20	15	17.1	4.774
31	20	15	16.5	4.607
32	8	16	16.2	2.059

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5. Resultados de Stock de Carbono, referente a biomasa forestal y del suelo en t/ha

Rodal	Resultados totales	Stock de carbono (t/ha)	Total Stock de carbono por rodal (t/ha)	Total (t CO ₂ /ha)
Rodal 1	Biomasa forestal	123.326	152.248	558.751
	Biomasa del suelo	28.922		
Rodal 2	Biomasa forestal	110.943	138.663	508.894
	Biomasa del suelo	27.720		
Rodal 3	Biomasa forestal	121.271	148.992	546.799
	Biomasa del suelo	27.720		

Fuente: Elaboración propia

Anexo 6. Prueba estadística - ANOVA

1. Formulación de Hipótesis

- Hipótesis Nula (H_0): No existe diferencias estadísticamente significativas en la captura de CO₂ entre los tres rodales de *Eucalyptus globulus* en la laguna Chacas.
- Hipótesis Alternativa (H_1): Existen diferencias estadísticamente significativas en la captura de CO₂ entre los tres rodales de *Eucalyptus globulus* en la laguna Chacas..

2. Nivel de Significancia (α)

Se seleccionó un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

3. Cálculo del Estadístico de Prueba

Se calculó el estadístico F de ANOVA, que compara la variabilidad entre las medias de captura de CO₂ de los rodales con la variabilidad dentro de los rodales. La fórmula para el estadístico F es:

$$F = \frac{MS_{\text{Entre}}}{MS_{\text{Dentro}}}$$

Donde:

MS_{Entre} es la media cuadrática entre los rodales

MS_{Dentro} es la media cuadrática dentro de los rodales

Fuente de variación	SC	GI	CM	F	P
Entre grupos	143.876	2	71.938	4.74	0.011

Dentro de grupos	1380.998	91	15.176
Total	1524.875	93	

Fuente: Elaboración propia

4. Regla de Decisión

Si el valor P calculado es de 0.011 y este es menor a 0.05; entonces rechazamos la hipótesis nula H_0

5. Conclusión

Con base en los resultados del ANOVA, se determine que si existen diferencias estadísticamente significativas en la captura de CO₂ entre los tres rodales de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas.

Anexo 7. Procedimiento de materia orgánica en el suelo – Walkley & Black

Para la determinación del porcentaje de carbono orgánico: Para calcular el carbono almacenado, se utilizó el método de Walkley & Black (1934), la determinación de materia orgánica del suelo se efectuó en el laboratorio de la Universidad Nacional Agraria La Molina, siguiendo el procedimiento recomendado por (Kalra & Maynard, 1991)

Las muestras fueron recolectadas (fuste, hojas y ramas), etiquetadas e identificadas para cada especie (Yana, 2019)

Para poder calcular la materia orgánica y el porcentaje de carbono se aplicó las siguientes ecuaciones.

$$\%MO = M * \frac{1.724 * 0.4 * Nsfa * (Vb - Vm)}{p} \quad (10)$$

$$\%C = \% MO / 1.724 \quad (11)$$

Dónde:

MO = Materia orgánica

M= Molaridad de la solución

Vb = Volumen de Sal de Mohr requerida para el blanco (mL)

V_m = Volumen de Sal de Mohr requerido para la muestra (mL)

N_{sda} = Normalidad de la solución ferrosa amoniacal

P = Peso de la muestra en gramos (g)

- Estimación de la captura de carbono en el suelo (T_c/ha)

Se aplicó la siguiente formula brindada por la FAO (2017).

$$COS = D_a \times P \times C_{Lab} \quad (12)$$

Dónde:

COS = Carbono almacenado en el suelo ($kg\ C /m^2$)

D_a = Densidad aparente (kg/m^3)

P = Profundidad (m)

C_{Lab} = Contenido total de carbono (g /g)

d) Cálculo de carbono equivalente almacenado

El carbono capturado o retenido por el rodal de *Eucalyptus globulus* aledaños a la laguna Chacas, se calcula con la suma del stock de carbono de biomasa más el stock de carbono en el suelo, mediante la siguiente ecuación:

$$Stock(Carbono) = Carbono(Biomasa) + Carbono(Suelo) \quad (13)$$

Dónde:

Stock (carbono) = Stock de carbono total

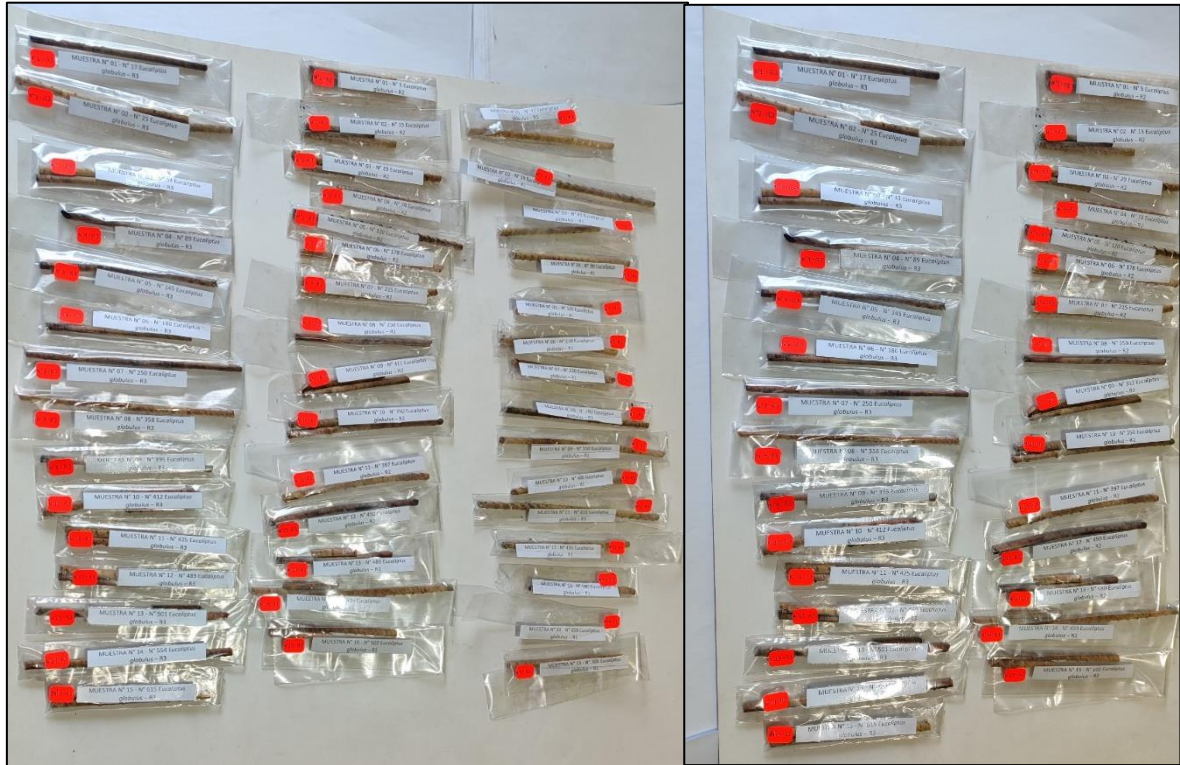
Carbono (Biomasa)= Carbono almacenado en la biomasa forestal

Carbono (Suelo)= Carbono almacenado en el suelo

Anexo 8. Panel Fotográfico

Figura 9.

Registro de las muestras recolectadas de madera de *Eucalyptus globulus*



Fuente: Elaboración propia

Figura 10.

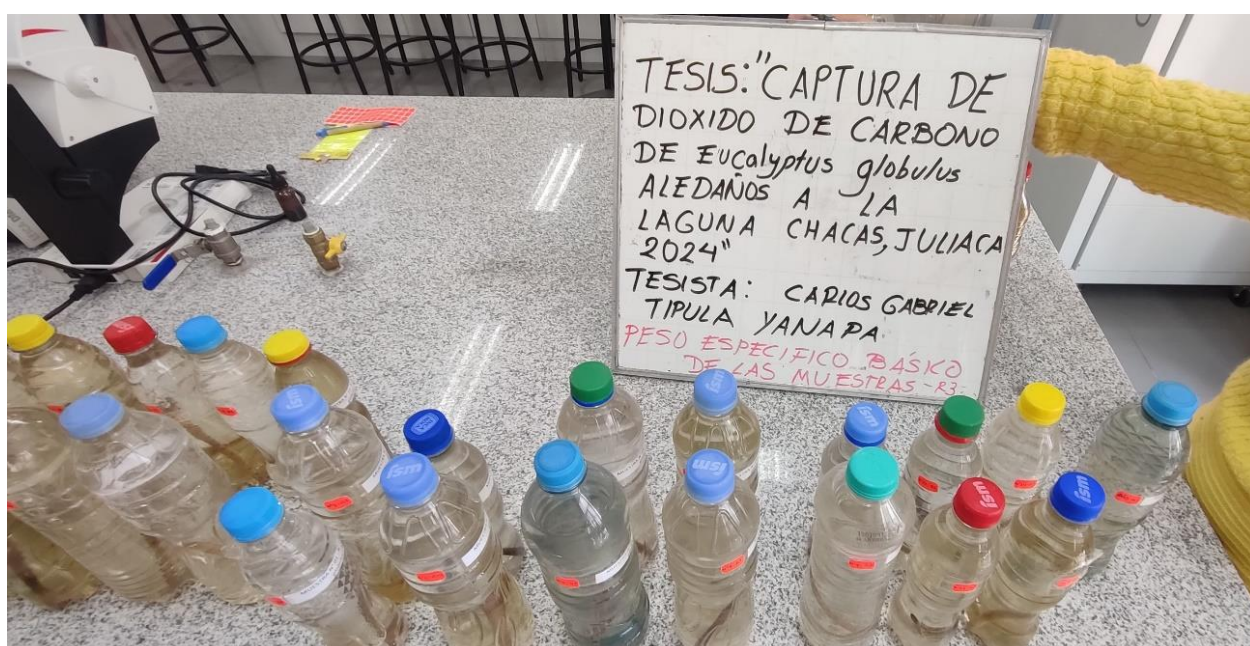
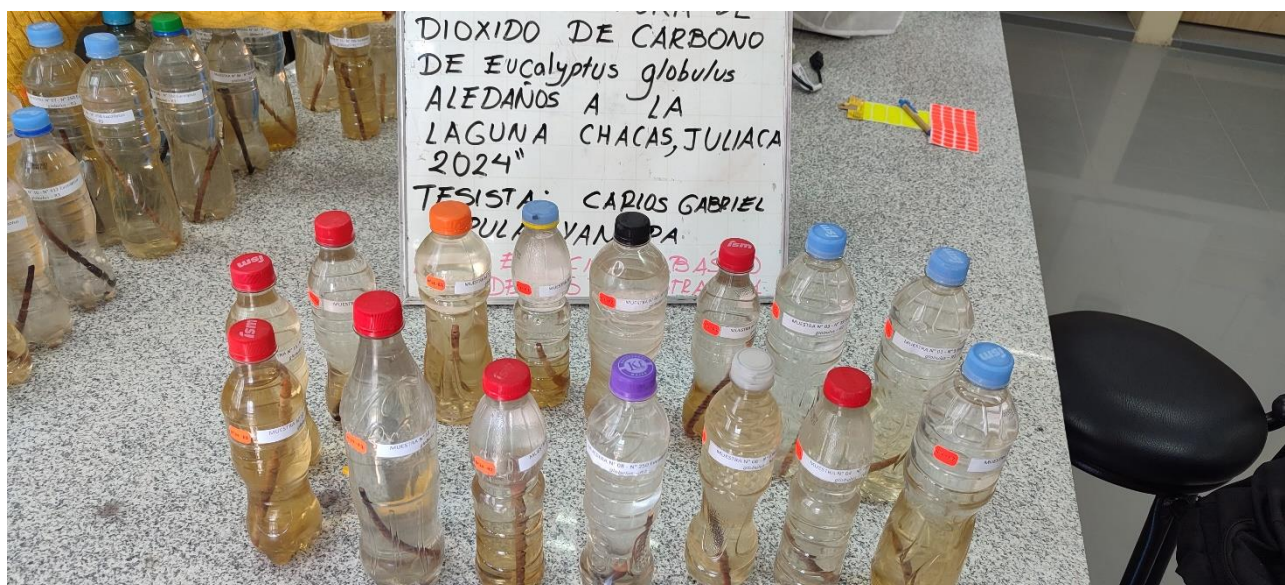
Codificación de las muestras obtenidas de los diferentes rodales evaluados



Fuente: Elaboración propia

Figura 11.

Muestras para determinar contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

Figura 12. Organización de muestras obtenidas de los tres rodales

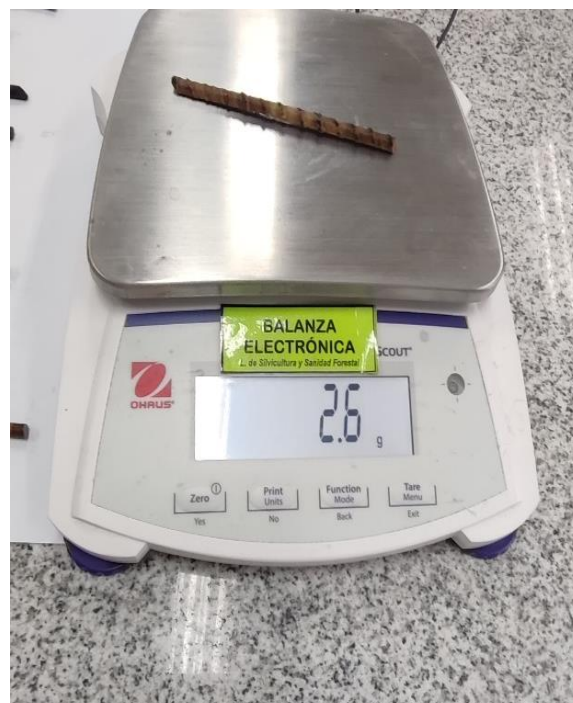
Organización de muestras obtenidas de los tres rodales



Fuente: Elaboración propia

Figura 13.

Determinación del peso de muestras de madera de Eucalyptus globulus

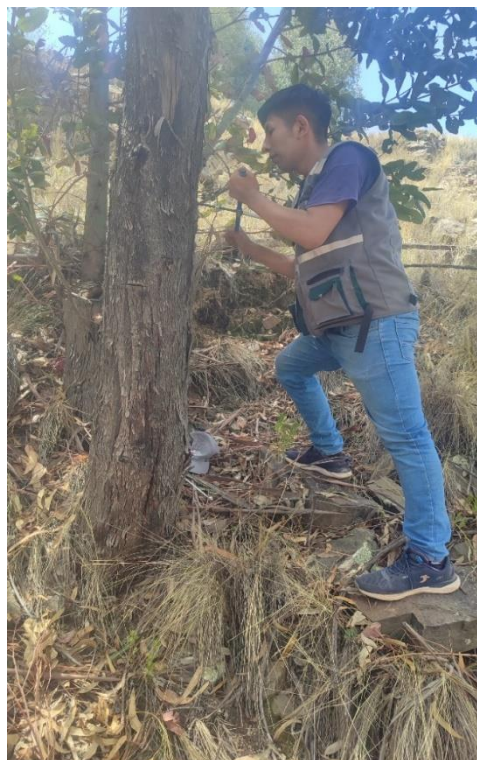




Fuente: Elaboración propia

Figura 14.

Extracción de testigos con el barreno de Pressler



Fuente: Elaboración propia

Figura 15.

Secado de muestras para poder obtener contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

Figura 16.

Extracción de muestras de suelo para análisis de materia orgánica



Fuente: Elaboración propia

Figura 17.

Medición de alturas usando hipsómetro.



Fuente: Elaboración propia

Figura 18.

Mediciones en los rodales de Eucalyptus globulus



Figura 19.

Etiquetado de las muestras de suelo obtenido en los rodales



Fuente: Elaboración propia

Figura 20.

Determinación de altura de muestreo de suelos en los rodales



Fuente: Elaboración propia

Figura 21.

Medición de DAP en los rodales de Eucalyptus globulus



Fuente: Elaboración propia

