Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Sede Ibarra

ESCUELA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y AMBIENTALES

INFORME FINAL DEL PROYECTO

TEMA:

"Cuantificación de absorción de CO_2 de las especies *Weinmannia fagaroides* y *Alnus acuminata* dentro del área de conservación privada Cerro Blanco"

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE

INGENIERO AMBIENTAL

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:

Manejo Sostenible de Recursos Naturales

SUBLINEA: Ambiente y biodiversidad

AUTOR: STEVEN MATEO RUIZ RUIZ

ASESOR: Mgs. MARÍA FERNANDA LÓPEZ

IBARRA, FEBRERO 2024

Ibarra, 10 de febrero de 2024

Mgs. María Fernanda López

ASESOR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final de investigación, el mismo que se ajusta a las normas vigente en la Escuela de Ciencias Agrícolas y Ambientales (ECAA), de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra (PUCESI); en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f)

Mgs. María Fernanda López

C.C.: 1002509600

PÁGINA DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

El jurado examinador, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra (PUCESI):



(f)……

Mgs. María Fernanda López

C.C.: 1002509600



(f)……

Mgs. Paola Alexandra Chávez Guerrero

C.C.: 1002744090



(f)……

PhD. Ellana Boada

C.C.: 1719312892

ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS

Yo STEVEN MATEO RUIZ RUIZ, declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 165 de Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, que manifiesta textualmente: “Se reconoce facultad de los autores y demás titulares de derecho de disponer de sus derechos o autorizar de sus obras o prestaciones, a título gratuito u oneroso, según las condiciones que determinen. Esta facultad podrá ejercerse mediante licencias libres, abiertas y otros modelos alternativos de licenciamiento o la renuncia”.

Ibarra, 10 de febrero del 2024



f): …….

STEVEN MATEO RUIZ RUIZ

C.C.: 1050158623

AUTORÍA

Yo, STEVEN MATEO RUIZ RUIZ, portador de la cédula de ciudadanía N° 1050158623, declaro que la presente investigación es de total responsabilidad del autor, y eximo expresamente a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra de posibles reclamos o accione legales.



f): …….

STEVEN MATEO RUIZ RUIZ

C.C.: 1050158623

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, STEVEN MATEO RUIZ RUIZ, con C.C.: 1050158623, autor del trabajo de grado intitulado: CUANTIFICACIÓN DE ABSORCIÓN DE CO_2 DE LAS ESPECIES *Weinmannia fagaroides* Y *Alnus acuminata* DENTRO DEL ÁREA DE CONSERVACIÓN PRIVADA CERRO BLANCO previo a la obtención del título profesional de Ingeniería Ambiental, en la Escuela de Ciencias Agrícolas y Ambientales.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tiene la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra, de conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la Pontifica Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra a difundir a través de sitio web de la Biblioteca de la PUCESI el referido trabajo de graduación, respetando las políticas de propiedad intelectual de Universidad.

Ibarra, 10 de febrero del 2024



f): …….

STEVEN MATEO RUIZ RUIZ

C.C.: 1050158623

DECLARACIÓN DE COMPORTAMIENTO ÉTICO EN LA ELABORACIÓN, DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Por medio de la presente declaro conocer y aplicar en la elaboración, desarrollo y evaluación de Proyecto de Titulación: CUANTIFICACIÓN DE ABSORCIÓN DE CO_2 DE LAS ESPECIES *Weinmannia fagaroides* Y *Alnus acuminata* DENTRO DEL ÁREA DE CONSERVACIÓN PRIVADA CERRO BLANCO, lo propuesto en el Código de Ética de la investigación y el aprendizaje de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, aprobado por el Consejo Superior de la PUCE con fecha 13 de febrero de 2023

Para constancia firma:



f): ……

Steven Mateo Ruiz Ruiz
Estudiante que ejecuta el trabajo de Titulación
C.C/ Pasaporte: 1050158623
Carrera: Ingeniería Ambiental

Ibarra, 10 de febrero del 2024

DEDICATORIA

Dedico este trabajo primeramente a Dios y a la Virgen Santísima por brindarme la vida, salud, sabiduría y fortaleza para afrontar los retos, compromisos y adversidades a lo largo de mi vida universitaria.

A mi madre Gladis, por ser la persona más importante y el pilar fundamental de mi vida, es quien, gracias a su amor, consejos, paciencia, sacrificio y valores impartidos, he podido culminar este trabajo de investigación y los retos planteados a lo largo de mi vida.

A mi padre Carlos, por todo el cariño recibido, y por enseñarme el significado de la responsabilidad, el trabajo arduo, la lucha y el compromiso frente a los contratiempos y obstáculos presentados durante la vida.

A mi hermano Mauricio, quien es mi modelo a seguir, y gracias a sus consejos y enseñanzas sinceras me motiva a seguir mejorando como persona y como hermano día a día.

Steven Mateo Ruiz Ruiz

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra (PUCEI) por ser el centro de mi formación académica y personal, en donde pude adquirir los conocimientos necesarios para el desarrollo de mi trabajo de investigación y mi desenvolvimiento en el ámbito profesional.

A mi asesora de tesis, la Mgs. María Fernanda López, quien es la persona que me impartió los conocimientos, y me brindó la orientación y las herramientas necesarias para llevar a cabo mi investigación.

A mis amigos y compañeros con quienes he vivido experiencias inolvidables durante esta etapa de mi vida, y de quienes guardaré gratos recuerdos.

A mi familia por los mensajes de aliento y motivación brindada, y quienes gracias a su ayuda he podido culminar mi trabajo de investigación.

A todos los maestros de la Escuela de Ciencias Agrícolas y Ambientales (ECAA), por los conocimientos impartidos y los consejos brindados a lo largo de mi formación universitaria.

Por último, pero no menos importante, a la empresa UNACEM, que me brindó la confianza de llevar a cabo esta investigación, por la apertura brindada a sus instalaciones y sitios de campo, y por los recursos que me permitieron llevar adelante este proyecto.

Steven Mateo Ruiz Ruiz

ÍNDICE

CERTIFICA: ii

PÁGINA DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL iii

ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS iv

AUTORÍA v

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN vi

DECLARACIÓN DE COMPORTAMIENTO ÉTICO EN LA ELABORACIÓN, DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN vii

DEDICATORIA viii

AGRADECIMIENTO ix

ÍNDICE x

ÍNDICE DE TABLAS xiv

ÍNDICE DE FIGURAS xv

ÍNDICE DE ANEXOS xviii

RESUMEN 19

ABSTRACT 20

CAPÍTULO I 21

INTRODUCCIÓN 21

CAPÍTULO II 23

OBJETIVOS 23

2.1. Objetivo general 23

2.2. Objetivos específicos 23

2.3. Pregunta Directriz 23

CAPÍTULO III 24

ESTADO DEL ARTE 24

3.1. Cambio Climático 24
3.1.1. Efectos del Cambio Climático 25
3.1.2. Impactos del Cambio Climático en la sociedad 27
3.2. Gases de Efecto Invernadero 28
3.3. Dióxido de Carbono ($CO2$) 29
3.3.1. Ciclo del Carbono 31
3.3.2. Carbono en ecosistemas forestales 32
3.4. Biomasa Arbórea 32
3.4.1. Biomasa Arbórea frente al Cambio Climático 33
3.4.2. Métodos de estimación de la Biomasa Arbórea 35
3.4.3. Selección de Árboles Plus 35
3.4.4. Altura total del árbol 36
3.4.4.1. Métodos para la medición de alturas 36
3.4.4.2. Clinómetro de Abney 37
3.4.5. Diámetro del árbol 37
3.4.6. Perfil de Sotobosque 38
3.5. Los Bosques en el Ecuador 39
3.6. Compensación de las emisiones de Carbono 40
CAPÍTULO IV 41
MATERIALES Y MÉTODOS 41
4.1. Materiales 41
4.2. Fase de Campo 42
4.2.1. Localización del área de estudio 42
4.2.2. Método Descriptivo 43
4.2.3. Identificación de las especies vegetales 43

4.2.4. Establecimiento de parcelas 43
4.2.5. Mensuración Forestal 44
4.2.5.1 Medición del Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) 44
4.2.5.2 Medición de la Altura total del árbol 45
4.2.6. Recolección de Muestras 47
4.2.6.1 Selección de Árboles plus 47
4.2.6.2 Recolección del Material Vegetativo 47
4.2.7. Estimación del Área basal 48
4.2.8. Estimación del volumen 48
4.2.9. Estimación de la Biomasa sobre el suelo 48
4.2.10. Estimación de la Biomasa total 49
4.2.11. Estimación del Carbono almacenado en el bosque 49
4.2.12. Población y muestra 50
4.3. Fase de Laboratorio 50
4.3.1. Método Experimental 50
4.3.2. Secado y determinación de humedad 50
4.3.3. Calcinación de las muestras 51
4.3.4. Estimación del Carbono y $CO2$ 51
CAPÍTULO V 53
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 53
5.1. Fase de Campo 53
5.1.1. *Weinmannia fagaroides* 53
5.1.1.1 Información taxonómica 53
5.1.2. *Alnus acuminata* 54
5.1.2.1 Información taxonómica 55

5.1.3. Identificación de las especies en el Área de Conservación Privada Cerro Blanco ..56
5.1.4. DAP de los árboles 57
5.1.5. Altura de los árboles 63
5.1.6. Área Basal 69
5.1.7. Volumen Forestal 71
5.1.8. Biomasa en la superficie 72
5.1.9. Biomasa total 73
5.1.10. $CO2$ almacenado 75
5.2. Fase de Laboratorio 79
5.2.1. Porcentaje de humedad 79
5.2.2. $CO2$ almacenado 80
5.3. Discusión 83
CAPÍTULO VI 84
CONCLUSIONES 84
CAPÍTULO VII 85
RECOMENDACIONES 85
CAPÍTULO VIII 87
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 87
ANEXOS 94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Materiales para la fase de campo.....41

Tabla 2 Materiales para la fase de laboratorio.....44

Tabla 3 Coordenadas parcelas establecidas.....41

Tabla 4 Promedio de DAP de las parcelas de la especie Weinmannia fagaroides.....58

Tabla 5 Promedio de DAP de las parcelas de la especie Alnus acuminata.....60

Tabla 6 Promedio de altura de las parcelas de la especie Weinmannia fagaroides.....64

Tabla 7 Promedio de altura de las parcelas de la especie Alnus acuminata.....66

Tabla 8 Cantidad de CO2 absorbido por la especie Weinmannia fagaroides.....76

Tabla 9 Cantidad de CO2 absorbido por la especie Alnus acuminata.....78

Tabla 10 Pesos promedio de cada especie.....80

Tabla 11 Porcentaje de humedad por especie.....80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tendencias de calentamiento en el período 1951-2010 25

Figura 2 Promedio global de la temperatura 26

Figura 3 Emisiones de CO2 (megatoneladas) 30

Figura 4 Emisiones de CO2 en la industria cementera 34

Figura 5 Mapeo del carbono en el Ecuador ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 6 Medición de la altura de árboles ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 7 Medición del diámetro de los árboles 54

Figura 8 Zona experimental 55

Figura 9 Trazado de las parcelas 44

Figura 10 Cálculo de la altura del árbol 46

Figura 11 Especie *Weinmannia fagaroides* 42

Figura 12 Especie *Alnus acuminata* ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 13 Sitios de muestreo establecidos en el Área de Conservación Privada Cerro Blanco 56

Figura 14 DAP *Weinmannia fagaroides* parcela 1 57

Figura 15 DAP *Weinmannia fagaroides* parcela 2 58

Figura 16 Promedio DAP *Weinmannia fagaroides* 59

Figura 17 DAP *Alnus acuminata* parcela 1 59

Figura 18 DAP *Alnus acuminata* parcela 2 60

Figura 19 Promedio DAP *Alnus acuminata* 61

Figura 20 Relación entre la especie y el DAP 61

Figura 21 Histograma de frecuencia del DAP 62

Figura 22 Altura *Weinmannia fagaroides* parcela 1 63

Figura 23 Altura *Weinmannia fagaroides* parcela 2 64

Figura 24 Promedio Altura *Weinmannia fagaroides* 65

Figura 25 Altura *Alnus acuminata* parcela 1 65

Figura 26 Altura *Alnus acuminata* parcela 2 66

Figura 27 Promedio altura *Alnus acuminata* 67

Figura 28 Relación entre la especie y la altura 67

Figura 29 Histograma de frecuencia de la altura 68

Figura 30 Relación entre DAP y altura 69

Figura 31 Relación entre la especie y el Área basal 69

Figura 32 Histograma de frecuencia del Área basal 70

Figura 33 Relación entre la especie y el Volumen 71

Figura 34 Histograma de frecuencia del Volumen 71

Figura 35 Relación entre la especie y la Biomasa sobre el suelo 72

Figura 36 Histograma de frecuencia de Biomasa sobre el suelo 73

Figura 37 Relación entre la especie y la Biomasa total 73

Figura 38 Histograma de frecuencia de la Biomasa total 74

Figura 39 CO_2 secuestrado *Weinmannia fagaroides* parcela 1 75

Figura 40 CO_2 secuestrado *Weinmannia fagaroides* parcela 2 76

Figura 41 CO_2 secuestrado *Alnus acuminata* parcela 1 77

Figura 42 CO_2 secuestrado *Alnus acuminata* parcela 2 78

Figura 43 Relación entre la especie y la cantidad de CO_2 capturado 79

Figura 44 Cantidad de CO_2 absorbido por partes del árbol *Weinmannia fagaroides* 80

Figura 45 Cantidad de $CO2$ absorbido por partes del árbol *Alnus acuminata*.....81

Figura 46 Relación entre la especie y la cantidad de $CO2$ absorbido.....81

Figura 47 Cantidad de $CO2$ absorbido por hectárea.....82

Figura 48 Cantidad de $CO2$ absorbido por hectárea por año.....82

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Área de Conservación Privada Cerro Blanco 94

Anexo 2. Ficha para levantamiento de campo.....95

Anexo 3. Resultados mediciones en campo 96

Anexo 4. Mediciones de campo 102

Anexo 5. Datos fase experimental.....103

Anexo 6. Mediciones en Laboratorio 105

RESUMEN

El trabajo de investigación se llevó a cabo en el Área de Conservación Privada Cerro Blanco, ubicada en el cantón Otavalo provincia de Imbabura, cerca de las instalaciones de la empresa UNACEM, la cual produce millones de sacos de cemento al año. El objetivo fue evaluar el porcentaje de absorción de CO_2 de las especies *Weinmannia fagaroides* y *Alnus acuminata* en respuesta a los efectos del cambio climático y al aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera debido a actividades antropogénicas, buscando determinar cuál de estas especies tiene una mayor capacidad de captura de carbono en su estructura vegetal; este estudio proporcionó información relevante para el proyecto "1 Millón de Árboles" impulsado por la PUCE y la política de Carbono Cero implementada por empresas en todo el mundo. Como parte de la metodología se establecieron dos parcelas para cada especie en sitios seleccionados después de una inspección preliminar del área de estudio, se designaron árboles plus en cada parcela y se tomaron muestras de la copa de los árboles. Se utilizó el método de calcinación para determinar el porcentaje de carbono absorbido por cada especie a través del análisis de cenizas. Además, se estimó la cantidad de CO_2 que se almacenará en el área durante las próximas décadas mediante un método no destructivo, basado en la medición de variables como la altura y el DAP de los árboles dentro de las parcelas. Los resultados indicaron que la especie *Alnus acuminata* almacena 0,22 toneladas de carbono en su estructura en comparación con la especie *Weinmannia fagaroides*, que secuestra un valor de 0,10 toneladas en cada uno de sus individuos, por lo que la especie *Alnus acuminata* mostró una mayor absorción de CO_2 por individuo en comparación con *Weinmannia fagaroides*.

Palabras clave: Dióxido de carbono, Efecto invernadero, Bosque, UNACEM.

ABSTRACT

The research work was carried out in the “Cerro Blanco” Private Conservation Area, located in the Otavalo canton of Imbabura province, near the facilities of the UNACEM company, which produces millions of cement bags a year, which are distributed throughout the country. The objective was to evaluate the carbon absorption percentage of the *Weinmannia fagaroides* and *Alnus acuminata* species in response to the effects of climate change and the increased concentration of greenhouse gases in the atmosphere due to anthropogenic activities, seeking to determine which of these species has the highest carbon capture capacity in their plant structure; this study provided relevant information for the "Million Trees" project and the Zero Carbon policy implemented by companies worldwide. As part of the methodology, two plots were established for each species at selected sites after a preliminary inspection of the study area, plus trees were designated on each plot and samples were taken from the tree bowl. The calcination method was used to determine the percentage of carbon absorbed by each species through ash analysis. In addition, the amount of CO_2 that will be stored in the area over the next few decades was estimated using a non-destructive method, based on the measurement of variables such as the height and DAP of trees within the plots. The findings indicated that the *Alnus acuminata* species stores 0.22 tons of carbon in its structure compared to *Weinmannia fagaroides*, which sequesters a value of 0.10 tons per individual. Thus, the *Alnus acuminata* species exhibited higher CO_2 absorption per individual compared to *Weinmannia fagaroides*.

Keywords: Carbon dioxide, Greenhouse effect, Forest, UNACEM.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Con el surgimiento de la Revolución Industrial, las actividades antropogénicas de las industrias o fábricas han liberado una gran cantidad de gases contaminantes de efecto invernadero a la atmósfera, provocando un incremento en la temperatura global; y con las consecuencias que conlleva a los ecosistemas y a la conservación de la biodiversidad. (EPA, 2022).

Los principales gases que producen el efecto invernadero en la atmósfera son el CO_2, el NO_2, y el metano, los cuales durante las últimas décadas han ido aumentando considerablemente debido al modelo de producción del hombre, que busca una creciente expansión de las industrias, quema de combustibles fósiles, la rápida urbanización en las ciudades, y el aumento de vehículos en cada uno de los centros urbanos; afectando la calidad de aire y produciendo enfermedades respiratorias en cada vez más personas, especialmente niños y adultos mayores. En el año 2017, los niveles de CO_2 en la atmósfera representaron el 81,6% de las emisiones totales de GEI en los Estados Unidos. (EPA, 2022).

Ante esta problemática global, la mitigación del cambio climático se ha convertido en una prioridad tanto para gobiernos como para la sociedad civil y el sector empresarial. Una de las estrategias más importantes para reducir las emisiones de GEI y estabilizar el clima es el secuestro de carbono, proceso mediante el cual los ecosistemas absorben y almacenan CO_2 de la atmósfera, contribuyendo así a reducir su concentración y mitigar los efectos del cambio climático. (Pardos, 2016, p. 321).

La investigación tuvo como objetivo cuantificar la cantidad de carbono capturado por las especies vegetales *Weinmannia fagaroides* y *Alnus acuminata* dentro del Área de Conservación Privada Cerro Blanco, determinando cuál de ellas posee un mayor porcentaje de absorción de CO_2, siendo de relevancia para futuros proyectos de reforestación en la zona o

cerca a lugares que hayan sido deforestados para la instalación de fábricas o industrias; contribuyendo a la lucha contra el cambio climático.

La elección de investigar la especie *Alnus acuminata* como parte central de este estudio se basó en su predominancia en el área de conservación, lo que aseguró la efectividad del análisis, además, esta especie vegetal se destaca como una opción principal para la reforestación en los ecosistemas andinos, lo que añadió relevancia a nuestra investigación. En cuanto a la especie *Weinmannia fagaroides*, su amplia distribución en el bosque protector la convirtió en un punto de estudio clave. Es importante resaltar que, a pesar de su importancia ecológica, no se han realizado estudios previos sobre su capacidad para almacenar CO_2.

La metodología aplicada en la investigación tuvo un enfoque descriptivo al medirse variables de las especies como altura y DAP de 76 individuos de la especie *Weinmannia fagaroides* y 26 árboles de la especie *Alnus acuminata* luego del establecimiento de parcelas en puntos de predominancia de los árboles, con esto se aplicaron fórmulas para determinar la cantidad de carbono almacenado en cada una de las parcelas de las 2 especies; también se aplicó un método experimental para estimar el porcentaje de absorción de CO_2 en estas especies tras la colecta de muestras vegetales de los árboles plus seleccionados en cada parcela, y se realizó el análisis en laboratorio a través del método de calcinación para determinación de cenizas.

Los resultados de este estudio indicaron que la especie *Weinmannia fagaroides* absorbe un valor de 0,105 toneladas de CO_2 en la estructura vegetal de cada individuo, mientras que la especie *Alnus acuminata* absorbe 0,25 toneladas en cada uno de los árboles; así mismo hay un almacenamiento de 16,25 ton por cada hectárea de *Weinmannia fagaroides*, y de 12,93 toneladas en cada hectárea de la especie *Alnus acuminata*.

CAPÍTULO II

OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar el porcentaje de absorción de carbono de las especies *Weinmannia fagaroides* y *Alnus acuminata* en el área de conservación privada Cerro Blanco.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar el área de estudio por medio de herramientas de georreferenciación para la colecta de las especies *Weinmannia fagaroides* y *Alnus acuminata* en los puntos de muestreo establecidos.
- Cuantificar la cantidad de carbono presente en las especies *Weinmannia fagaroides* y *Alnus acuminata* por medio del análisis de su biomasa para el establecimiento de matrices comparativas que demuestren su importancia.

2.3. Pregunta Directriz

¿Cuál de las especies vegetales *Weinmannia fagaroides* y *Alnus acuminata* predominantes en el Área de Conservación Privada Cerro Blanco presenta una mayor captura de carbono en su estructura vegetal?

CAPÍTULO III

ESTADO DEL ARTE

3.1. Cambio Climático

El cambio climático se refiere a las variaciones de las condiciones climáticas y a su variabilidad durante un período de tiempo, y que puede producirse por factores internos naturales como erupciones volcánicas, cambios de los ciclos solares; o factores externos como actividades antropogénicas en industrias, uso de automóviles, o cambios en el uso del suelo. (IPCC, 2018, p. 75).

> Este cambio climático es producido principalmente por la quema de combustibles fósiles como el petróleo, el gas y el carbón, que emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, calentando la superficie de la misma, y contribuyendo a elevar la temperatura global. (IPCC, 2014, p. 9).

Debido al crecimiento de las actividades industrializadas en el planeta, la temperatura media global ha aumentado medio grado desde el comienzo de siglo, y con las políticas de la actualidad se prevé un incremento de la temperatura de más de 2,8°C para finales de siglo. (IPCC, 2014, p. 13).

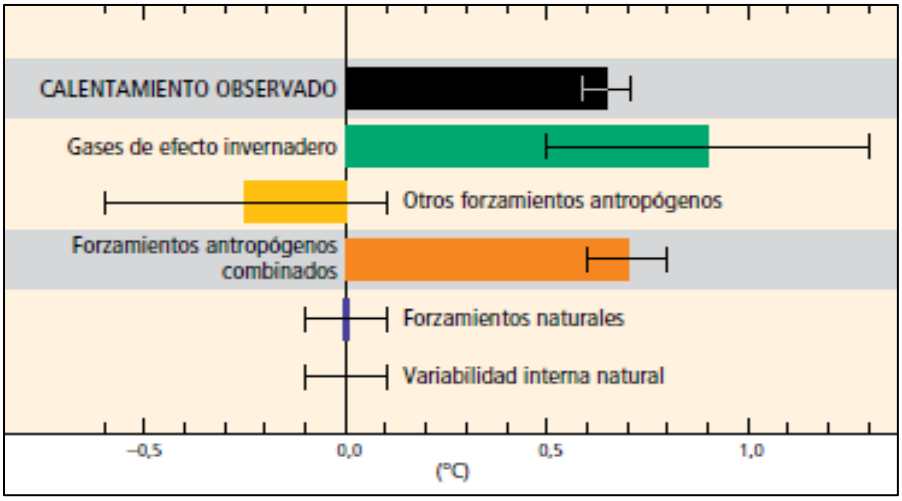
La producción anual de cemento ha tenido un repunte en la década de 1950, posterior a la finalización de la Segunda Guerra Mundial; y en regiones como Asia, a partir de los años 90 la cantidad del concreto usado ha aumentado exponencialmente para la construcción de edificaciones. En la actualidad se espera que la mayor demanda de cemento se dé en las zonas del sudeste asiático y el África subsahariana, ya que son zonas que vienen experimentando un crecimiento económico acelerado. (Rodgers, 2018).

En el país, existen tres empresas cementeras que fabrican 6,6 millones de toneladas anuales de cemento, HOLCIM, UNACEM, y UCEM, las cuales a través de los últimos años han aumentado su producción, llegando a la necesidad de importar clínker, que es la materia prima

necesaria para la producción de cemento, y debido a la estabilización de la economía nacional, y facilidades para obtener un crédito de vivienda, el país se ha posicionado en el tercer puesto de consumo de cemento per cápita en Latinoamérica, solo por detrás de países más industrializados como Trinidad y Tobago y Panamá. (Revista Líderes, 2017).

Figura 1

Tendencias de calentamiento en el período 1951-2010



Nota. La figura 1 representa el calentamiento debido a los GEI, forzamientos antropógenos, y forzamientos naturales. Tomado de *Contribuciones al cambio observado en la temperatura en superficie de 1951 a 2010* (p.51), por Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2014, Cambio climático 2014.

3.1.1. Efectos del Cambio Climático

El cambio climático puede tener severas consecuencias en la salud de las personas, disminuir la tierra aprovechable para los cultivos, aumentando el riesgo de hambrunas, las sequías e inundaciones serán cada vez más intensas y prolongadas, y millones de personas que habitan en las costas serán desplazadas de sus hogares debido al incremento del nivel del mar. (IPCC, 2014, p. 16).

Durante las últimas décadas, el cambio climático ha causado diversas afectaciones a los sistemas naturales y humanos del planeta, lo que muestra la sensibilidad de estos sistemas al

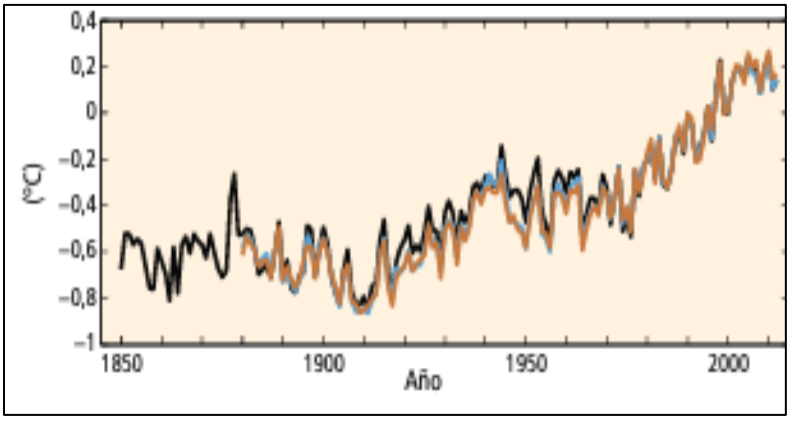
cambio del clima, como la disminución de las temperaturas frías extremas, el aumento de temperaturas cálidas extremas, el incremento del nivel del mar, y un mayor número de precipitaciones intensas en diversos continentes del mundo, asociándose también a influencias antropogénicas. (IPCC, 2014, pp. 6,7). Estos efectos generan impactos significativos en los medios de subsistencia económicos, de salud y alimentarios a nivel mundial, dentro de estos se destacan:

- **Elevación de las temperaturas**

A medida que aumenta la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, también se incrementa la temperatura en la superficie terrestre; durante la última década, se ha registrado la más fuerte tendencia de calentamiento a nivel global, y desde 1980 cada década ha sido más cálida que la anterior, con una proyección de días más calurosos y con una mayor frecuencia en casi todas las regiones. El aumento de la temperatura en 1,1 °C provoca un mayor índice de enfermedades en la población relacionadas con las olas de calor, además, en estas condiciones es más probable la aparición de incendios. (IPCC, 2019, p. 7).

Figura 2

Promedio global de la temperatura



Nota. La figura 2 representa a los cambios del promedio global de temperaturas en la superficie terrestre y oceánica. Tomado de *Anomalía del promedio global de temperaturas en superficie, terrestres y oceánicas, combinadas* (p.3), por Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2014, Cambio climático 2014.

- **Sequías**

Con el cambio climático las temperaturas en los continentes se han elevado, por lo que la humedad en el suelo se ha reducido, y aunque la cantidad de precipitación no se modifique en ciertas regiones, el nivel de evaporación de agua del suelo sí se incrementará, produciendo suelos más secos y cada vez menos aptos para la agricultura. Al existir períodos prolongados de sequía, la capacidad de captura de CO_2 en bosques húmedos se ha visto afectada, ya que la vegetación nativa de estas zonas no está adaptada a la poca disponibilidad de agua provocada por las sequías. (Banqué, 2017, p. 1).

- **Pérdida de la biodiversidad**

Con el cambio climático, las especies de flora y fauna están desapareciendo a un ritmo 1000 veces mayor al de otras épocas geológicas de la Tierra, en la actualidad más de un millón de especies están siendo amenazadas, ya que no disponen con tanta facilidad de recursos como el agua y alimento, además experimentan la fragmentación de su hábitat, lo cual tiene repercusiones en las poblaciones que dependen directa o indirectamente de los servicios ecosistémicos que estas especies proporcionan. (WWF-UK, 2021, p. 8).

3.1.2. Impactos del Cambio Climático en la sociedad

Los distintos efectos del cambio climático descritos anteriormente tienen múltiples consecuencias en varias de las esferas de la sociedad, como las siguientes:

- **Impactos en la Salud**

Las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera acaban con la vida de 13 millones de personas anualmente debido al aumento de la incidencia de enfermedades respiratorias, cardiovasculares, cáncer de pulmón, e incluso estrés en la población; los fenómenos meteorológicos como tormentas e inundaciones producen miles de muertes cada año, el aumento de la temperatura y las olas de calor favorecerán la aparición de mosquitos transmisores de enfermedades como la malaria o el dengue, y la escasez de agua provocará que un mayor número de personas tenga que abastecerse de un agua contaminada, y no apta para el consumo humano. (National Geographic, 2022).

- **Impactos en la agricultura**

La desertificación y la erosión del suelo afectan de manera directa a la agricultura global al reducir la productividad de los cultivos, por otro lado, la disminución de la población de polinizadores debido al aumento de la temperatura tiene un impacto significativo en los cultivos que dependen de la polinización; además, la salinización y la pérdida de materia orgánica en el suelo son factores adicionales que provocan la deforestación de bosques en busca de nuevas áreas destinadas para la agricultura. (Greenpeace, 2018, p. 52).

- **Impactos en la energía**

La escasez de agua en los ríos afectará directamente a la generación de energía hidroeléctrica, produciendo aún más dependencia de las fuentes de origen fósil; la energía térmica experimenta mayores dificultades para refrigerar el agua usada en su proceso ya que se encuentra caliente, y el aumento de la temperatura global de 3,8 °C en invierno y 6 °C en verano producirá una mayor demanda del aire acondicionado, incrementando el consumo de energía entre un 5 % y un 6 % anualmente en los meses más cálidos. (Greenpeace, 2018, p. 47).

3.2. Gases de Efecto Invernadero

Se refieren a los elementos gaseosos de la atmósfera, tanto de origen natural como antropogénico, que absorben y liberan radiación en específicas longitudes de onda del espectro infrarrojo proveniente de la superficie terrestre, la atmósfera y las nubes. (Benavides y León, 2007, p. 36).

Los principales gases de efecto invernadero (GEI) presentes en la atmósfera producto de las actividades antropogénicas determinados por el Protocolo de Kioto son: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), hidrofluorocarbonos (HCF), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF_6), óxido nitroso (N_2O); estos gases tienen un origen natural y sin ellos la temperatura media del planeta sería de -18°C, aunque en las últimas décadas las concentraciones de cada uno de estos gases han ido aumentando drásticamente por las actividades humanas, sobrepasando los niveles máximos permisibles, y provocando el incremento de la temperatura

media global, con consecuencias para los ecosistemas y la biodiversidad del planeta. (WWF, 1998, p. 4).

3.3. Dióxido de Carbono (CO_2)

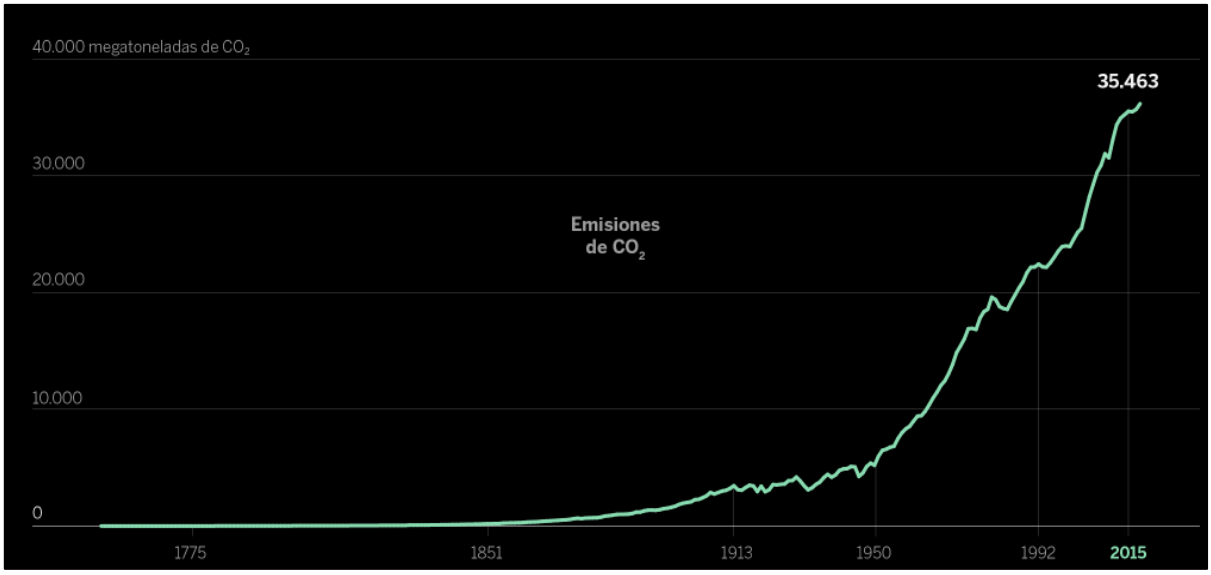
Es el gas de efecto invernadero (GEI) de mayor concentración en la atmósfera, el cual se encuentra de forma natural en las erupciones volcánicas, acción de la biósfera, o metamorfismo de las rocas, encontrándose en niveles de 170 a 330 partes por millón, siendo importante para el desarrollo del planeta; aunque con el surgimiento de la Revolución Industrial, estas concentraciones se han incrementado, hasta alcanzar niveles actuales de 415 partes por millón. (Sardá, 2021).

Los sectores que emiten una mayor cantidad de CO_2 a la atmósfera son los de transporte (28%), de industria (26%), generación de electricidad (23%), edificaciones urbanas (13%), y cambios de uso de suelo por prácticas agrícolas (12%). (Sardá, 2021). Debido a la expansión demográfica y el crecimiento económico de los países en vías de desarrollo, las emisiones de este contaminante se han repuntado a partir de la pandemia por coronavirus, y en la actualidad países como China, Estados Unidos, Rusia, India y Japón representan el 62,9 % de emisiones globales, con más de 1000 billones de toneladas emitidas por cada uno. (DW, 2022).

Las emisiones de CO_2 por parte de la industria cementera a nivel global fueron de aproximadamente 2900 millones de toneladas, con un aumento de cerca del 200% durante los últimos 20 años, correspondiendo al 8% de emisiones globales totales de los gases de efecto invernadero. (Rodgers, 2018).

Figura 3

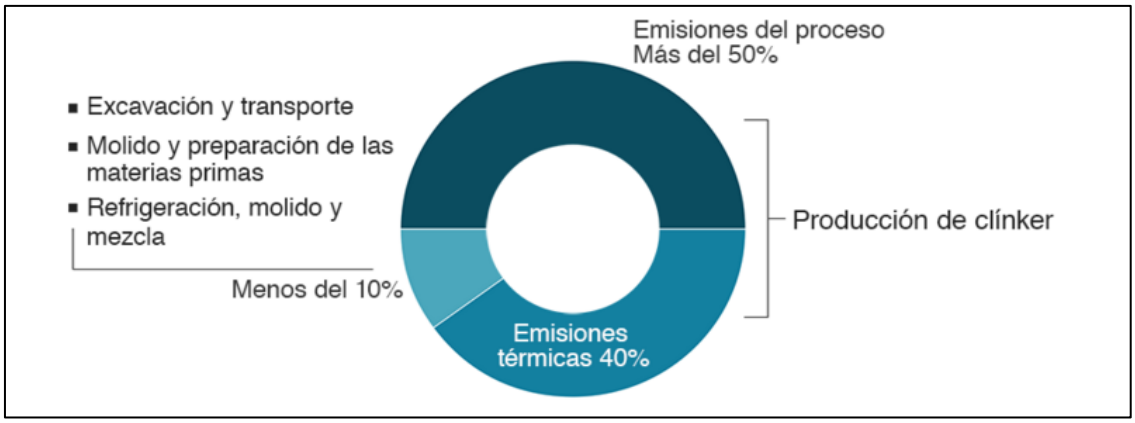
Emisiones de CO_2 (megatoneladas)



Nota. La figura 3 representa el incremento de las emisiones de CO_2 a partir de la Revolución Industrial. Tomado de *Emisiones de CO_2* [Fotografía], por M. Planelles, 2022, El País (https://elpais.com/especiales/2019/el-co2-en-el-cambio-climatico/).

Figura 4

Emisiones de CO_2 en la industria cementera



Nota. La figura 4 representa el porcentaje de emisiones de CO_2 en las distintas fases de la industria cementera. Tomado de *La fabricación de clínker supone la mayor parte de las emisiones de CO_2 de la producción de cemento* [Fotografía], por L. Rodgers, 2018, BBC (https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783).

3.3.1. Ciclo del Carbono

El carbono constituye un elemento vital para la vida en el planeta, encontrándose tanto en la litósfera, hidrósfera, biósfera al constituir las moléculas orgánicas de los seres vivos, y en la atmósfera en forma de CO_2, una parte de este gas que se emite al ambiente es producto de las actividades biológicas de vegetales y animales en los ecosistemas terrestres, además de la interacción biológica propia en los suelos. (Martínez y Fernández, 2004, p. 77).

El carbono se encuentra en un flujo constante a través de estas esferas que actúan como depósitos naturales, y se mueve formando compuestos como el CO_2 o el metano, con una función importante en la regulación del clima global y la formación de combustibles fósiles (Martínez y Fernández, 2004, p. 83), así, se desplaza mediante los siguientes procesos:

- Fotosíntesis: las plantas absorben el CO_2 de la atmósfera a través de los estomas de las hojas, incorporándolo a su estructura formando carbohidratos, este carbono se transfiere a otros organismos a través de la cadena alimenticia, y se libera mediante la respiración. (Martínez y Fernández, 2004, pp. 78,79).
- Respiración: los heterótrofos emiten CO_2 a través de la respiración, mientras que los autótrofos liberan el 50 % del dióxido de carbono absorbido, que no ha sido utilizado para la fotosíntesis.
- Descomposición: el carbono de la biomasa muerta se libera a la atmósfera a través de organismos descomponedores como bacterias y hongos.
- Combustión: los incendios naturales o provocados liberan carbono de las estructuras de la biomasa vegetal, también la quema de combustibles fósiles, o las actividades industriales y energéticas incrementan el nivel de CO_2 en la tropósfera.
- Liberación: el ciclo biogeoquímico de carbonato-silicato disuelve el CO_2 de la atmósfera en las precipitaciones, transformando el ácido carbónico en carbonato de calcio, el cual se reintroduce a la atmósfera en las erupciones volcánicas e hidrotermales. (Martínez y Fernández, 2004, pp. 79,80).

3.3.2. Carbono en ecosistemas forestales

Cerca del 50 % del carbono presente a nivel terrestre se almacena en el suelo y en la biomasa forestal, por lo que la vegetación de estos ecosistemas cumple una función importante en la captura de carbono atmosférico; los bosques tropicales acumulan una mayor cantidad de este elemento en su vegetación con respecto al suelo, mientras que los bosques en zonas templadas y frías almacenan un 20 % más de carbono a nivel de suelo que en la vegetación arbórea, además de capturar un menor porcentaje de carbono en comparación a los bosques tropicales, debido a las condiciones climáticas que afectan la actividad de los microorganismos del suelo. (Gallardo y Merino, 2007, p. 50).

El 70 % del carbono almacenado en la vegetación se encuentra en los ecosistemas forestales, entre los cuales los que más capturan el carbono son los bosques tropicales ocupando más de la mitad de la biomasa terrestre (200 Mg C/ha), bosques templados (150 Mg C/ha), y bosques boreales (90 Mg C/ha). Con respecto a las plantaciones forestales, éstas capturan carbono a un ritmo más elevado que los bosques naturales, aunque al ser de rápido crecimiento su ciclo de vida es menor y el carbono se devuelve más rápidamente a la atmósfera con respecto a árboles con crecimientos lentos como robles o castaños. (Gallardo y Merino, 2007, pp. 51,52).

3.4. Biomasa Arbórea

Hace referencia a la masa viva presente en un espacio físico delimitado, incluyendo la materia orgánica viva y muerta, también es conocida como la materia que se encuentra dentro de una superficie, incluyendo los organismos vivos, y los materiales inorgánicos, constituyéndose en un sumidero de carbono muy importante al contribuir al almacenamiento de este elemento tanto en el organismo vegetal como en el suelo, a través de la acumulación y descomposición de la materia orgánica; la medición de la biomasa arbórea permite conocer la cantidad de CO_2 que puede ser retenido de la atmósfera con la ayuda de la siembra de especies vegetales. (Castells, 2012, p. 745). Según el IPCC (2005) existen 4 tipos de depósitos de carbono:

- Biomasa viva: se refiere a toda la biomasa viva del suelo, incluido los tallos, tocones, ramas, corteza, semillas y follaje.
- Biomasa subterránea: es toda la biomasa que se encuentra en raíces vivas, debido a que con frecuencia no se pueden distinguir de la materia orgánica del suelo, a veces se excluyen raíces finas de menos de 2 mm de diámetro.
- Materia orgánica muerta: comprende toda la biomasa boscosa no viva ya sea que se encuentre en pie, superficial o en el suelo, en varios estados de descomposición sobre el suelo mineral u orgánico.
- Suelos constituidos por la materia orgánica del suelo: es el carbono orgánico en suelos minerales y orgánicos a una profundidad específica. (p. 26).

3.4.1. Biomasa Arbórea frente al Cambio Climático

La biomasa arbórea cumple una función importante en la lucha de mitigación contra el cambio climático, ya que, con su proceso metabólico, pueden absorber dióxido de carbono en sus tallos en su fase de crecimiento; los sistemas forestales tienen la capacidad de almacenar el carbono no solo en su biomasa, sino también en el suelo a través de la descomposición de materia orgánica como hojas caídas. (Kuebler, 2022).

Se determina que al combinar estrategias de lucha contra el cambio climático, como la reforestación, los bosques pueden convertirse en un sitio de almacenamiento neto de carbono durante los próximos 100 años, llegando a capturar entre un 20 % a 50 % de las emisiones totales de CO_2 liberadas a la atmósfera de las actividades antropogénicas. (Robert, 2002, p. 29). El carbono almacenado en la biomasa arbórea es la cantidad de carbono que se retiene en el organismo vegetal, al momento de cuantificar el carbono almacenado en la biomasa se toma en cuenta las hojas, las ramas, el fuste, y el carbono almacenado en la materia orgánica muerta del suelo. (García, 2017, p. 1057).

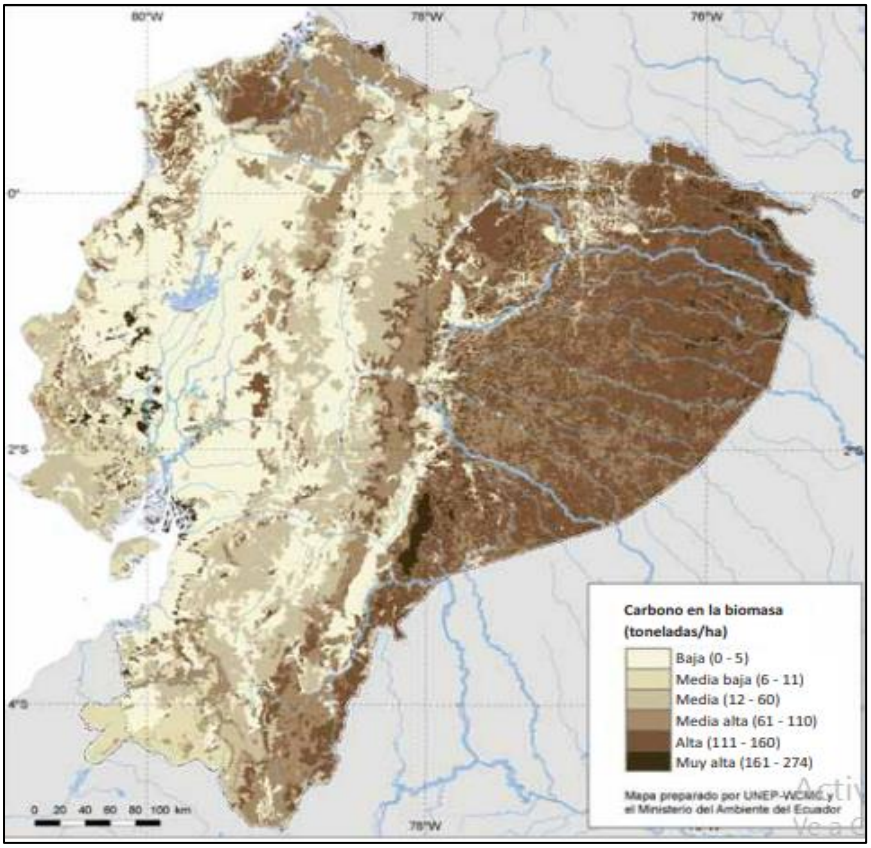
Según Pardos (2016) los ecosistemas forestales poseen el más alto contenido de carbono en su biomasa, ya que secuestran el carbono presente en la atmósfera por medio de la fotosíntesis y la respiración celular, y con un correcto manejo de los sistemas forestales, se mejorará la

absorción de CO_2, evitando que se convierta en una fuente emisora de gases de efecto invernadero. La cantidad de carbono secuestrada por una especie vegetal en su biomasa arbórea varía de acuerdo a la especie de árbol a estudiar, el tipo de suelo, la topografía de la zona, y las prácticas de manejo implementadas en el bosque para su conservación. (p. 43).

La biomasa arbórea es fundamental debido a los beneficios ambientales que brinda, entre ellos, sirve como almacén de carbono y otros elementos químicos en su estructura, por ello es importante su medición, ya que proporciona datos de cuánto carbono queda almacenado en su estructura, la cantidad de CO_2 fijado en el área analizada, y la dosis potencial de carbono que será liberado a la atmósfera, en caso de que la cobertura vegetal sea removida. De esta manera las prácticas de conservación de los bosques se han convertido en un servicio ambiental en los países que se encuentran en vías de desarrollo. (Rubio y Calama, 2023).

Figura 5

Mapeo del carbono en el Ecuador



Nota. El gráfico representa la cantidad de carbono presente en la biomasa de los ecosistemas del país. Tomado de *Mapa actualizado del carbono en la biomasa de la República del Ecuador* (p.4), por UNEP World Conservation Monitoring Centre, 2011, Carbono, biodiversidad y servicios ecosistémicos: explorando los beneficios múltiples.

3.4.2. Métodos de estimación de la Biomasa Arbórea

La determinación de la biomasa permite evaluar la integridad de los ecosistemas y la eficiencia de los bosques como partícipes del ciclo del carbono, por lo que se han desarrollado varios métodos de estimación, y que se aplican según la cantidad de información disponible y el componente específico del bosque que se desea estudiar, estas metodologías son:

- **Método Destructivo:** consiste en cortar los árboles para la extracción de ramas, hojas, y fustes, para luego ser secadas y obtener su peso seco, es el método de mayor precisión.
- **Método Indirecto:** se aplican fórmulas alométricas para calcular variables como el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura, así como la información de inventarios forestales según la especie.
- **Estimación con sensores remotos:** se utilizan imágenes satelitales para reconocer especies del bosque, generar mapas forestales con información de coberturas, e inventarios de absorción de gases de efecto invernadero en los ecosistemas. (Juárez, 2014, pp. 41,42).

3.4.3. Selección de Árboles Plus

Los árboles plus son individuos con características fenotípicas superiores y que son de interés económico, como la altura, diámetro a la altura del pecho (DAP), volumen, densidad de la madera, ramificaciones, etc.; para establecer las variables de importancia en estos árboles se debe identificar el objetivo del estudio de acuerdo a condiciones como, presentar una variación genética, que sean de relevancia económica para el proyecto, y que muestren rangos aceptables de control genético. (Ipinza, 1998, p. 105).

Se recomienda seleccionar dos o tres características de importancia, en donde se deberán ponderar con valores mínimos cada una de ellas, fuera de los cuales los individuos no sean seleccionados, y se aplicarán los métodos de selección en base a los objetivos que se esperan alcanzar, recursos disponibles, nivel de experiencia del personal, o tipo de especie; siendo uno de los más comunes el método de árboles de comparación, en el que las características de un individuo son comparadas con las de otros árboles en un área cercana. (Ipinza, 1998, p. 107).

3.4.4. Altura total del árbol

Se define como altura total del árbol en pie (h) a la distancia entre su base en contacto con el suelo y su punto más alto denominado "cima", esta cima o ápice es la parte más alta de la copa del árbol, la cual está en prolongación del eje del tronco. La medición de esta variable es importante ya que permite estimar otros datos de importancia como el volumen de la madera, biomasa, crecimiento anual, área basal, e incluso su estado de salud. (Juárez, 2014, p. 22).

Todos los instrumentos de medición de altura en basan en la observación directa a la base y a la copa del árbol desde una distancia conocida; en los individuos que tengan un ápice bien definido, como las coníferas, no existe dificultad al momento de determinar su altura, mientras que, en especies de tipo latifoliadas, la dificultad es mayor ya que su copa no está bien definida. (Juárez, 2014, p. 23).

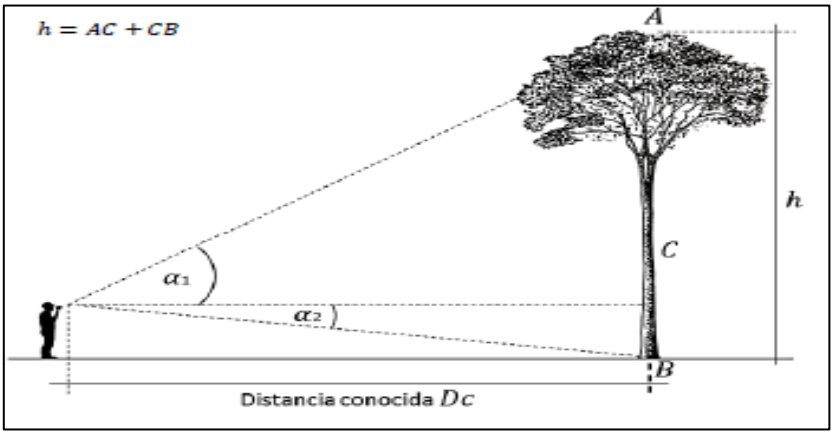
3.4.4.1. Métodos para la medición de alturas

Los métodos de medición de altura de los árboles se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Medición directa: las mediciones no pueden realizarse a distancia, por lo que el procedimiento más común es trepar a los árboles y utilizar pértigas telescópicas.
- Medición indirecta: la medición se ejecuta desde una distancia establecida a través de la ayuda de hipsómetros, que pueden funcionar mediante la aplicación de principios trigonométricos, o principios geométricos, estos últimos tienen un rango de error del 5 % del valor real. (Juárez, 2014, p. 24).

Figura 6

Medición de la altura de árboles



Nota. La figura 6 representa la medición de la altura de un árbol aplicando los principios trigonométricos. Tomado de *Instrumentos basados en principios trigonométricos* (p.27), por F. Juárez, 2014, Dasometría.

3.4.4.2. Clinómetro de Abney

Es un instrumento utilizado en trabajos topográficos para la medición de ángulos verticales, y muy útil para la estimación de la altura de los árboles. Está formado por dos semicírculos con graduaciones, uno en grados y el otro en porcentaje; este artefacto consta de un tubo telescópico de sección cuadrangular o cilíndrica, un anillo con una tangente multiplicada por 100 % y en grados de 0° a 90°, tiene un nivel de burbuja que se desplaza por una barra, la cual sirve de referencia para realizar las mediciones. (Juárez, 2014, p. 31).

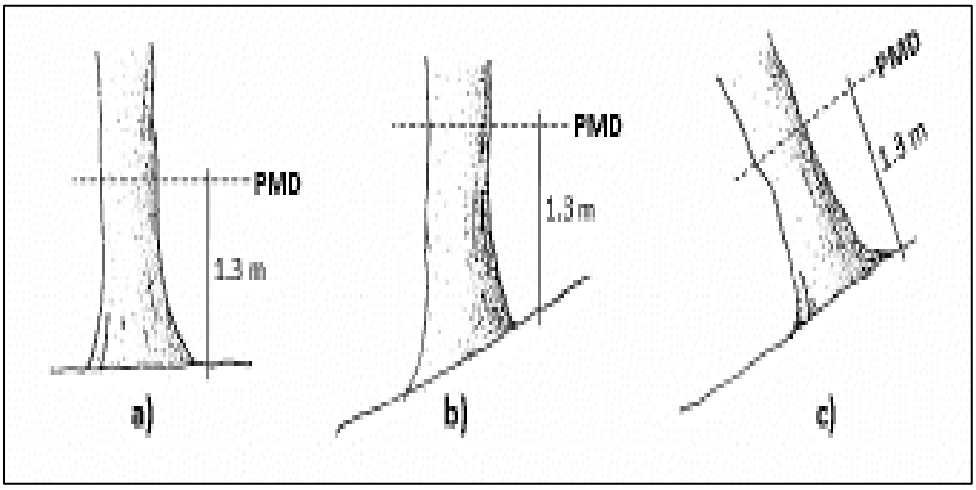
3.4.5. Diámetro del árbol

Es la variable más importante y la que se mide con mayor frecuencia en los inventarios forestales, su análisis proporciona datos sobre el crecimiento del grosor del árbol, el volumen, edad, área basal, biomasa, o el área de proyección de copa; la medición internacional estándar del diámetro en un árbol es la que se realiza a nivel del pecho (DAP), a 1,30 m sobre el nivel del suelo. (Juárez, 2014, p. 13).

Para su medición se utilizan varios instrumentos, como la cinta diamétrica, la cual tiene graduación en mm y en unidades π, lo que facilita la medición directa del diámetro al rodear el tronco con la cinta, asegurándose que ésta se ubique perpendicularmente al eje longitudinal del fuste. Dado que la sección transversal del fuste la mayoría de veces no es circular, se pueden obtener diferentes lecturas de diámetro según la dirección en la que se realice la medición, por lo tanto, para reducir errores, estas mediciones del diámetro se suelen realizar en dos ejes diferentes. (Juárez, 2014, p. 17).

Figura 7

Medición del diámetro de los árboles



Nota. La figura 7 representa la medición del diámetro a la altura del pecho (DAP) de un árbol en diferentes condiciones del terreno. Tomado de *Cómo localizar la altura normal y medir el diámetro* (p.16), por F. Juárez, 2014, Dasometría.

3.4.6. Perfil de Sotobosque

El sotobosque se refiere a la cubierta forestal que crece por debajo del dosel superior, y que está formado por árboles, arbustos, hierbas y otras especies vegetales; la mayor parte de la diversidad biológica en los bosques ocurre en el sotobosque. Es de gran importancia ya que funciona como hábitat y fuente de alimento para las comunidades de animales que allí habitan; también participa en el ciclo de nutrientes, brinda soporte a la productividad, la regeneración, y sucesión ecológica dentro del bosque. Los cambios en las especies dentro del sotobosque están

sujetas a procesos complejos, que dependen de factores como el tipo de bosque, especies introducidas, clima, tipo de suelo, altitud, presencia de actividades humanas, e incluso el cambio climático. (Antos, 2004, pp. 3,4).

3.5. Los Bosques en el Ecuador

Ecuador es un país que cuenta con una alta cobertura vegetal y una gran biodiversidad, alrededor del 50% del territorio nacional se encuentra cubierto por bosques, los cuales almacenan en su biomasa 1,63 Gt/C. (Bertzky et al., 2011, p. 1). El 58% de la biomasa de carbono fijado en los bosques ecuatorianos se encuentra ubicado en la región Amazónica, cubriendo alrededor de un tercio de la superficie total del país, aunque actualmente este ecosistema se encuentra amenazado por la explotación indiscriminada de recursos y la tala ilegal de árboles, para aprovechamiento del suelo por prácticas agrícolas y ganaderas, convirtiendo al Ecuador en uno de los países con mayores tasas de deforestación en América Latina. (La Vanguardia , 2011).

En la provincia de Imbabura se deforestan 1240 hectáreas de bosques anualmente, por lo que durante los últimos años muchos de éstos han entrado en la categoría de Bosques Protectores para frenar la deforestación, así actualmente la provincia cuenta con 18 Bosques Protectores, protegiendo una superficie de 37543,97 hectáreas, que corresponde al 7,48 % de la superficie de la provincia. (Amay et al., 2021).

En el Acuerdo de París sobre el Cambio Climático, el Ecuador se comprometió en reducir sus emisiones de carbono neto en un 20,9%. (ONU, 2015, p. 4). En el 2008, en el país se elaboró un mapa de carbono forestal, el cual se basa en la estratificación de la vegetación y en estimaciones de la biomasa; actualmente se muestra información georreferenciada del contenido de carbono presente por hectárea en el mapa de estratos potenciales del bosque, determinando que más del 50% del carbono que se almacena en la biomasa de los árboles se encuentra en zonas catalogadas de muy alta capacidad de almacenamiento de carbono, según su composición vegetal y propiedades del suelo. (MAE, 2020, p. 26).

3.6. Compensación de las emisiones de Carbono

Esta idea se refiere a la posibilidad de reducir al máximo las emisiones de CO_2 a la atmósfera como consecuencia de las actividades industriales y productivas, a través de la financiación de proyectos ambientales como la reforestación, inversión en energías renovables, o créditos de carbono, buscando que la cantidad de carbono liberado a la atmósfera sea igual o menor a la que se absorbe mediante los sistemas naturales del planeta, alcanzando un punto de neutralidad. (Crespo, 2022).

En el país ha surgido el "Programa Ecuador Carbono Cero" para que las empresas puedan establecer medidas de reducción, mitigación y compensación de sus emisiones de carbono en su proceso productivo, con una mejora de su imagen corporativa, reducción de costos de operación, mayores incentivos tributarios, y la posibilidad del uso de marca Punto Verde. (Green Wise, 2022, p. 3).

CAPÍTULO IV

MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales

Tabla 1

Materiales para la fase de campo

Materiales	Equipos	Software
Clinómetro	GPS	ArcGIS 10.5
Cinta métrica	Cámara fotográfica	Google Earth
Estacas de madera		
Piola		
Libreta de campo		
Podadora aérea		
Mallas de invernadero		
Bolsas plásticas		

Tabla 2

Materiales para la fase de laboratorio

Materiales	Equipos
Fundas de papel	Balanza analítica
Tijera	Estufa
Bandejas de papel	Triturador
Vaso de precipitación	Horno Mufla
Papel aluminio	Desecador
Marcador	
Crisoles de porcelana	
Pinzas de crisol	

Muestras vegetales

Guantes de nitrilo

4.2. Fase de Campo

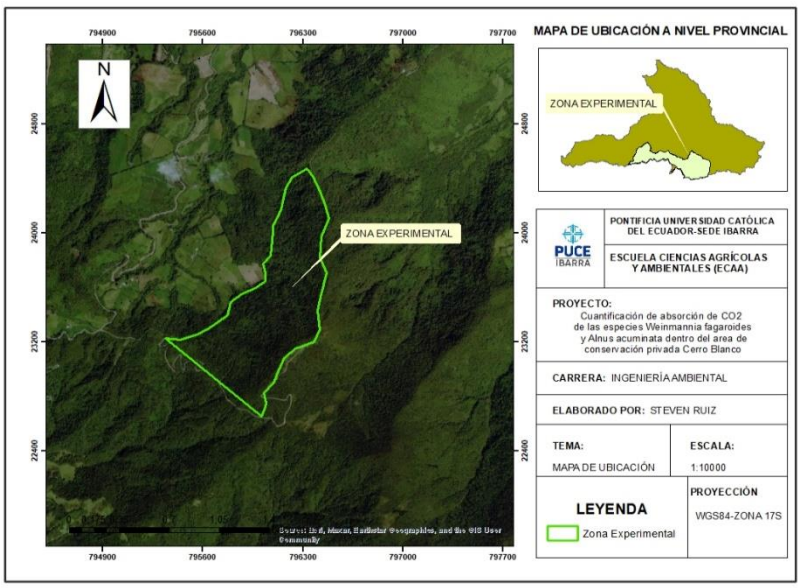
La fase de campo del proyecto de investigación se desarrolló mediante el establecimiento de dos etapas de trabajo ejecutadas de manera secuencial.

4.2.1. Localización del área de estudio

El trabajo de investigación se desarrolló en el Área de Conservación Privada Cerro Blanco, que se encuentra en la parroquia de San José de Quichinche, cantón Otavalo, provincia de Imbabura. Este bosque de 83 hectáreas es parte de las áreas de conservación privadas del Ecuador, recibiendo la catalogación de Bosque de Producción de Agua; esta área se ubica en las coordenadas: 796300, 10023153. (UNACEM, 2020, p. 74). En el transcurso del camino se puede observar diversidad de flora y fauna característica del sector, así como una vista del lago San Pablo, laguna de Cuicocha, y las ciudades de Cotacachi y Otavalo.

Figura 8

Zona experimental



4.2.2. Método Descriptivo

En el proyecto de investigación se aplicó el método descriptivo para la identificación de las especies vegetales en los puntos de muestreo establecidos, y la medición de variables de interés como altura y diámetro a la altura del pecho (DAP) de las especies seleccionadas, para su posterior recolección.

4.2.3. Identificación de las especies vegetales

Se realizó una visita inicial al Área de Conservación Privada Cerro Blanco, en donde se aplicó la técnica de observación directa para una inspección primaria del lugar y reconocimiento de las especies *Weinmannia fagaroides* y *Alnus acuminata* dentro de la zona*;* una vez determinados los sitios en los que hay mayor predominancia de estas especies, se registró la información de los puntos de muestreo con la ayuda de un GPS, y se elaboró un mapa del área de estudio por medio del software ArcGIS.

4.2.4. Establecimiento de parcelas

Una vez realizada la identificación del área de estudio se marcaron 2 puntos de muestreo por cada una de las especies para una mayor disponibilidad de datos; y se procedió al establecimiento de una parcela en cada sitio de muestreo seleccionado, éstas tuvieron dimensiones de 50 m x 50 m ya que presentan menos problemas con respecto a la presencia o ausencia de árboles dentro y fuera de los bordes y permiten cubrir una superficie equivalente al 0,4 % del bosque de estudio, además fueron de tipo permanentes por ser más eficientes, permitiendo realizar mediciones posteriores, a fin de determinar la dinámica respecto de la fijación de carbono. (Arévalo, 2015, p. 47).

Se utilizó el software Google Earth para identificar el punto central de cada parcela y los límites de cada parcela, luego se colocó la primera estaca, y a partir de allí se midieron las distancias con cinta métrica, cada parcela se acordonó con la ayuda de una piola. (Phillips et al., 2016, p. 6).

Figura 9

Trazado de las parcelas

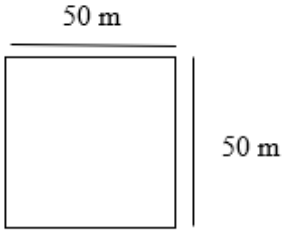


Tabla 3

Coordenadas parcelas establecidas

N° Parcela	Coordenadas UTM		Altitud (m.s.n.m)
	X	Y	
Parcela 1 *"Weinmannia fagaroides"*	795624	10023016	3325
Parcela 2 *"Weinmannia fagaroides"*	795682	10023029	3312
Parcela 1 *"Alnus acuminata"*	795361	10023097	3279
Parcela 2 *"Alnus acuminata"*	795679	10022984	3339

4.2.5. Mensuración Forestal

Para la mensuración forestal, se aplicó el método no destructivo, realizando mediciones directas en el campo del DAP y altura total de los árboles, para luego calcular el volumen, biomasa en la superficie, biomasa total, y cantidad de CO_2 secuestrado en el área de estudio. (Russo, 2009, p. 5,6).

4.2.5.1 Medición del Diámetro a la Altura del Pecho (DAP)

El DAP fue medido a la altura del pecho (1,30 m) ya que es la medida estándar reconocida internacionalmente y que permite determinar el diámetro y la circunferencia del tronco del árbol. Para la medición se utilizó una cinta métrica, obteniendo los datos de la circunferencia a la altura del pecho (CAP), y estos valores se transformaron al DAP, según la siguiente fórmula:

$$DAP = CAP/\pi$$

Cada árbol se enumeró en un formulario de campo de acuerdo al orden en el que fueron medidos, así tuvieran bifurcaciones, y su diámetro fue registrado de forma perpendicular al eje central del tronco, y en terrenos inclinados, la medición se la realizó en la parte superior de la pendiente. (Arévalo, 2015, p. 54).

4.2.5.2 Medición de la Altura total del árbol

La medición de la altura de los árboles se la realizó mediante principios trigonométricos ya que son más precisos que los principios geométricos, y con un clinómetro Abney se determinaron los valores a partir de la siguiente ecuación:

$$H = D\ (\tan a1 + \tan a2)$$

H = Altura total del árbol

D = Distancia horizontal hasta el eje del fuste del árbol

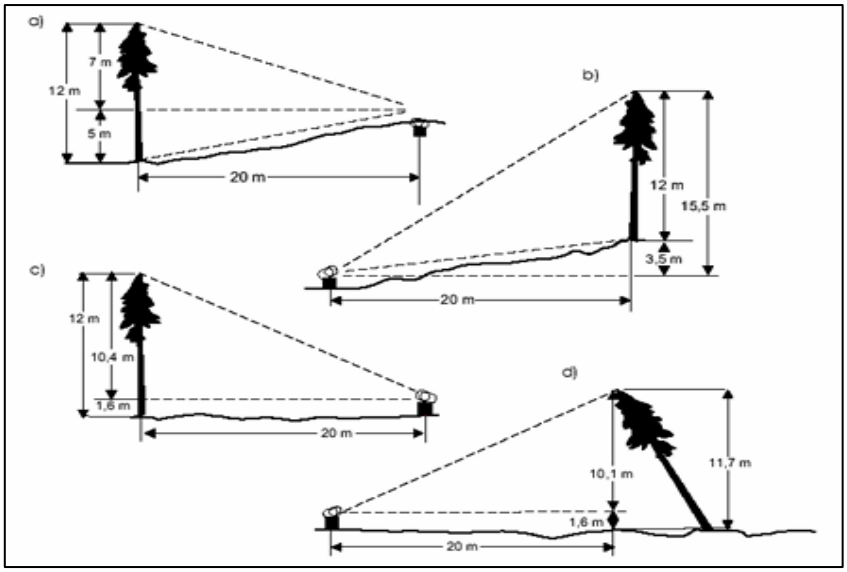
$a1$ = Ángulo a la base del árbol

$a2$ = Ángulo al ápice del árbol

Dependiendo de la posición en la que se realizó la observación y la inclinación del terreno, existieron varios casos de medición, para los que se aplicó diferentes interpretaciones:

Figura 10

Cálculo de la altura del árbol



Nota. La figura 10 representa la medición de la altura de un árbol en diferentes pendientes. Tomado de Medición de la altura de los árboles (p.75), por Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2004, Inventario Forestal Nacional Manual de Campo.

a) Se añadió los resultados por debajo y por encima de la medición horizontal.
b) Se restó del total la distancia entre la base del árbol y la medición horizontal.
c) Se adicionó la distancia sobre la línea horizontal, y la altura desde el suelo hasta la altura del ojo del observador.
d) Se sumó la distancia desde la base, a la medición desde la copa del árbol hasta la línea horizontal. (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2004, p. 75).

Se consideró un margen de error aceptable del 10 % del valor real de la altura debido a posibles inconvenientes al momento de la medición como falta de visibilidad del ápice del árbol, balanceo de las copas o inclinación de crecimiento del tronco; por lo que se hicieron tres lecturas y se obtuvo el promedio de altura de cada árbol, se movió cada tronco para distinguir su ápice,

y se procuró colocarse en un punto con la mejor visión de la base y de la copa del árbol para su medición. (Juárez, 2014, p. 33).

4.2.6. Recolección de Muestras

Luego de la medición de las variables como DAP y altura de los árboles de las dos especies ubicados dentro de cada parcela, se procedió a la toma de muestras vegetales de acuerdo a la siguiente metodología.

4.2.6.1 Selección de Árboles plus

Para la selección de los árboles plus de las especies identificadas dentro de las parcelas, se aplicó el método de árboles de comparación, en donde se realizó una selección fenotípica y dasométrica de los individuos en base a características como el DAP, altura y volumen, comparándolos con sus vecinos más cercanos; se utilizó un formulario de campo para anotar las medidas de cada uno de los árboles y se eliminó a aquellos que no cumplieran con los requisitos mínimos preestablecidos. (Ipinza, 1998, p. 107). Los árboles seleccionados cumplieron con los siguientes requisitos:

- Diámetro y altura superior al promedio del rodal.
- Fuste recto y cilíndrico.
- Árboles que no se visualicen enfermos o con defectos en el fuste o copa.
- Poseer ramas cortas, de poco diámetro y de ángulo de inserción en el fuste lo más cercano a 90 grados.

Una vez seleccionados los árboles plus, se les asignó un código que fue marcado con pintura en una cara del tronco a una altura visible.

4.2.6.2 Recolección del Material Vegetativo

Se procedió al corte y recolección de los árboles plus seleccionados con la ayuda de una podadora aérea, se procuró tomar de 3 a 5 muestras de cada árbol de la periferia de ramas y hojas, se colocaron en mallas de invernadero, y se etiquetaron con su nombre, número de

parcela, y número de árbol plus, para su posterior traslado al laboratorio de Bromatología de la Pucesi. (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2022, p. 8).

4.2.7. Estimación del Área basal

Esta medida comprendió la suma de la sección transversal del fuste a la altura del DAP del árbol. (Juárez, 2014, p. 14)., y se calculó aplicando la siguiente fórmula:

$$AB = \frac{\pi}{4} * DAP^2$$

4.2.8. Estimación del volumen

Este valor se obtuvo mediante los datos del DAP y la altura de los árboles, luego se expandió a la unidad de superficie utilizando el factor de forma de 0,496, definido para casi todas las especies arbóreas, y se aplicó la siguiente fórmula: (Cancino, 2012, p. 36).

Volumen = AB * H * ff

AB = área basal (m^2)

H = altura total (m)

ff = factor de forma (0,496)

4.2.9. Estimación de la Biomasa sobre el suelo

La biomasa aérea de materia seca se calculó a partir del volumen total de madera sobre el suelo y la densidad de la madera, que surge de la relación entre una masa de madera anhidra y su volumen en estado saturado, y para la cual se tomó el valor recomendado de 0,5; el resultado de la biomasa sobre el suelo se obtuvo a partir de la siguiente fórmula: (Juárez, 2014, p. 41).

$$B_a = V * GE$$

Ba = Biomasa aérea en toneladas de materia seca

V = Volumen total del árbol

GE = densidad de la madera (0,5)

4.2.10. Estimación de la Biomasa total

Una vez determinada la biomasa aérea, se integró la parte subterránea de los árboles a partir de la utilización de factores de expansión de las raíces, que para este estudio fue de 1,30 (Arévalo, 2015, p. 61); y se aplicó la siguiente fórmula:

$$B_t = B_a * FEB_S$$

B_t = Biomasa total, aérea y radicular

B_a = Biomasa sobre el suelo

FEB_S = factor de expansión de las raíces (1,30)

4.2.11. Estimación del Carbono almacenado en el bosque

Para la estimación de la cantidad de carbono almacenado en el bosque, se utilizaron los datos de la biomasa total y el contenido de carbono en la materia seca, que para este estudio se aplicó el valor de 0,5; es decir que un 50 % del peso de los individuos es carbono. (Russo, 2009, p. 6). Finalmente, para la conversión de un valor en toneladas de carbono a un valor en toneladas de CO_2 , se multiplicó la masa del carbono por la masa molar de una molécula de CO_2 , es decir que una tonelada de carbono almacenado en la biomasa forestal es equivalente al secuestro de 3,67 toneladas de CO_2 atmosférico, determinado por la siguiente fórmula:

$$Q_{CO2} = Fc * B_t * 3{,}67$$

Q_{CO2} = Cantidad de CO_2 secuestrado en un árbol en toneladas

Fc = fracción de carbono (0,5)

B_t = Biomasa total

4.2.12. Población y muestra

Se identificó una población de 41 individuos de la especie *Weinmannia fagaroides* en la primera parcela, y de 35 en la segunda parcela, de los cuales se hizo la medición de sus características dendrométricas, y para la toma de muestras vegetales se determinó una muestra de 18 árboles en la primera parcela y 13 en la segunda en base al método de selección de árboles plus.

Mientras que para la especie *Alnus acuminata*, hay una población de 12 individuos en la primera parcela, y 14 en la segunda, y en base a la misma metodología se estableció una muestra de 8 árboles en la primera parcela y 7 en la segunda parcela, de los cuales se hizo la extracción de muestras para llevarlas al laboratorio.

4.3. Fase de Laboratorio

4.3.1. Método Experimental

Se aplicó el método experimental dentro de laboratorio para el análisis químico de la biomasa aérea de las muestras vegetales recolectadas de las especies *Weinmannia fagaroides* y *Alnus acuminata* para la determinación del contenido de cenizas por el método de calcinación, y así poder estimar la cantidad de carbono presente en las muestras aplicando factores de conversión.

4.3.2. Secado y determinación de humedad

Una vez que las muestras vegetales fueron recolectadas, se las pesó para determinar su peso húmedo; luego al ser trasladadas al laboratorio en bolsas de papel, se las separó en ramas y hojas y se las colocó en bandejas de papel de 25 x 15 cm, y se las volvió a pesar en una balanza analítica, determinando un segundo peso húmedo.

Luego se colocaron las muestras en la estufa y se las secó a 80° C durante 48 horas para eliminar la humedad, al final se las volvió a pesar, y se determinó el porcentaje de humedad mediante la siguiente fórmula:

$$\% \, humedad = \frac{(Peso \, inicial - Peso \, final)}{Peso \, inicial} * 100$$

4.3.3. Calcinación de las muestras

Este análisis se hizo en base al siguiente proceso:

a) Se trituraron las muestras.
b) Se pesó en una balanza analítica 10 g de muestra molida seca de ramas y hojas por cada uno de los árboles seleccionados.
c) Las muestras se colocaron en crisoles llevados a peso constante, identificando la especie, el número de parcela y árbol de cada uno.
d) Se colocaron los crisoles en la mufla y se los calcinó a una temperatura de 350 °C durante 4 horas, se los dejo enfriar y se los pasó al desecador por 1 hora.
e) Se pesaron los crisoles con la ceniza, y se determinó su contenido mediante la siguiente fórmula: (Catalán, 2021).

$$\% \, Ceniza = \frac{(P1 - P2) * 100}{P - P2}$$

P = peso del crisol más la muestra fresca

P1 = peso del crisol más las cenizas

P2 = Peso del crisol vacío

4.3.4. Estimación del Carbono y CO_2

El porcentaje que se evaporó de cada muestra corresponde a la fracción de carbono presente en los árboles, por lo que se hizo una estimación a partir del valor de porcentaje de cenizas determinado, y se proyectó a la cantidad de CO_2 almacenado multiplicando por el valor de 3,67; aplicando la siguiente ecuación:

$$Q_{CO2} = \frac{(100 - \% \, cenizas)}{100} * P \, muestra * 3{,}67$$

Q_{CO2} = cantidad de $CO2$ secuestrado en un árbol (g)

P muestra = peso de la muestra (g)

Al final se extrapolaron estos valores para conocer el $CO2$ almacenado por hectárea, y por año, mediante las siguientes fórmulas: (Guerrero et al, 2018, pág. 69).

$$CO2_{ha} = \frac{Q_{CO2} * N° \; individuos \; en \; la \; parcela}{N \; ° \; individuos \; muestreados}$$

$$CO2_{ha/año} = \frac{CO2_{ha}}{edad \; promedio}$$

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Fase de Campo

5.1.1. *Weinmannia fagaroides*

Es un árbol que puede alcanzar una altura de hasta 25 metros, consta de un tronco recto y cilíndrico de color marrón oscuro, sus hojas son simples, alternas y de forma ovalada a lanceolada, con márgenes dentados, de color verde brillante en el haz y más pálidas en el envés; las flores son pequeñas, de color blanco o rojizo, las cuales se agrupan en inflorescencias terminales, y su fruto es una cápsula leñosa que contiene varias semillas pequeñas. Se encuentra en las provincias de Carchi, Imbabura, Pichincha, Cañar, Loja, Morona Santiago, Zamora Chinchipe y Napo. Esta especie ayuda a controlar la erosión del suelo por medio de su raíz pivotante, aporta materia orgánica al suelo y retiene la humedad en su estructura. (Puetate, 2017, p. 31).

Es una especie nativa de regiones templadas de América del Sur, crece en bosques de tipo subpáramo entre los 2800 a 3600 msnm. Su polinización se da por anemofilia, la madera se utiliza para la construcción de cercas, muebles o leña, y sirve como refugio de varias especies de aves. (Global Biodiversity Information Facility, 2023).

5.1.1.1 Información taxonómica

- Familia: Cunnoniaceae
- Género: *Weinmannia*
- Especie: *Weinmannia fagaroides*
- Nombre común: Encenillo

Figura 11

Especie Weinmannia fagaroides



Nota. La figura 11 representa la presencia de la especie *Weinmannia fagaroides* en el área de conservación privada Cerro Blanco.

5.1.2. *Alnus acuminata*

Es una especie de árbol nativa de los Andes, de hasta 20 metros de altura que se puede encontrar en laderas montañosas, riberas de los ríos, pendientes húmedas, y en zonas con mucha neblina, se ubica en áreas con temperaturas entre 4° a 27° y con precipitaciones de 1000 a 3000 mm; tiene aplicaciones en la agroforestería ya que es de rápido crecimiento y aporta grandes cantidades de nitrógeno al suelo; también es una especie idónea para suelos degradados y para proyectos de reforestación ya que absorbe grandes cantidades de CO_2 y óxido nitroso de la atmósfera. Su tronco es cilíndrico con varias ramificaciones, con una copa lisa y con fisuras transversales; y sus hojas son de forma ovalada de 6 a 15 cm de largo y de 3 a 8 cm de ancho. (Guerrero et al., 2018, p. 66).

5.1.2.1 Información taxonómica

- Familia: Betulaceae
- Género: *Alnus*
- Especie: *Alnus acuminata*
- Nombre común: Aliso

Figura 12

Especie Alnus acuminata



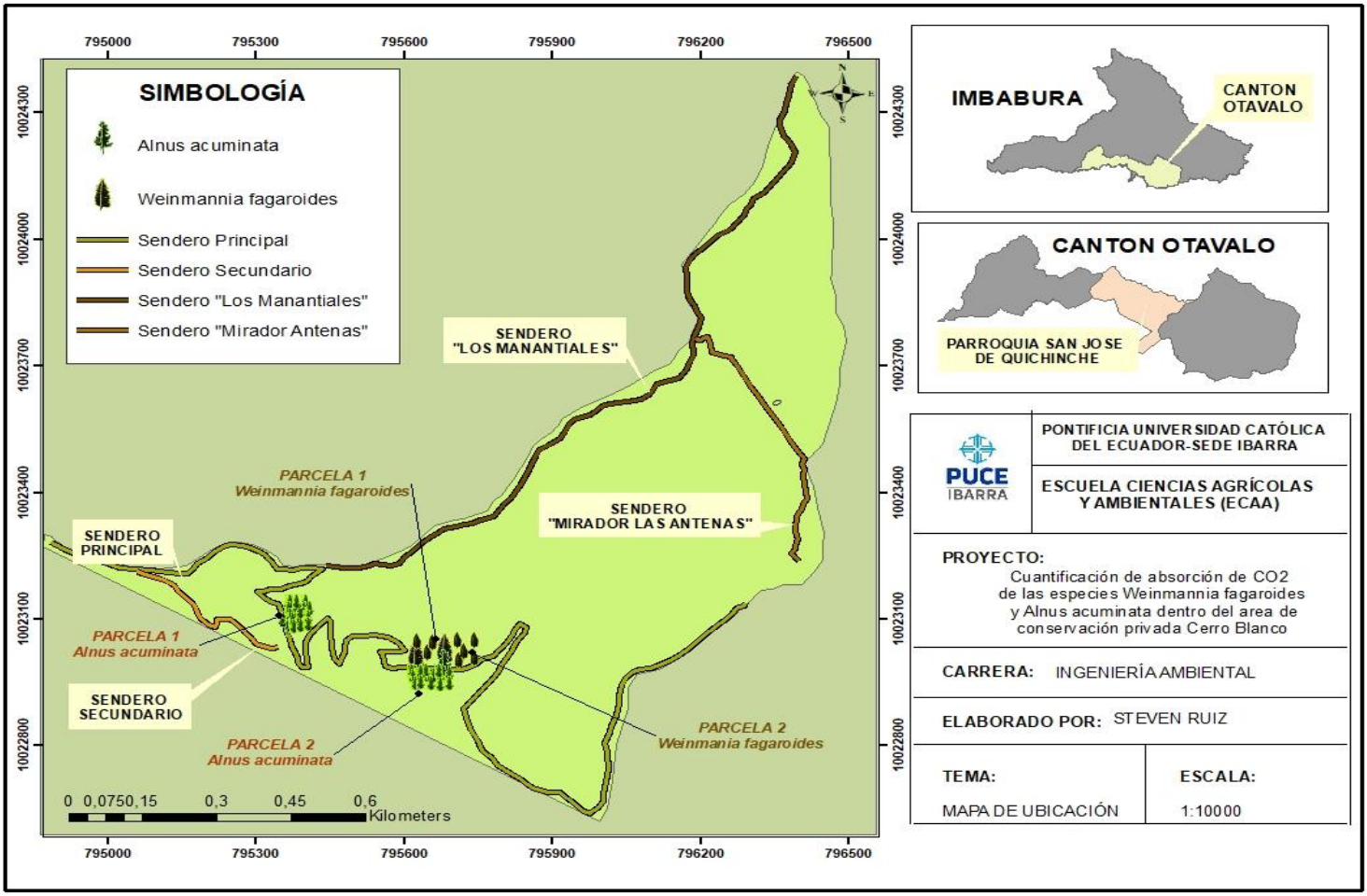
Nota. La figura 12 representa la presencia de la especie *Alnus acuminata* en el área de conservación privada Cerro Blanco.

5.1.3. Identificación de las especies en el Área de Conservación Privada Cerro Blanco

Los sitios de implementación de las 4 parcelas que sirvieron para la medición y colecta de las especies *Weinmannia fagaroides* y *Alnus acuminata* fueron georreferenciadas mediante el software ArcGIS en la siguiente figura.

Figura 4

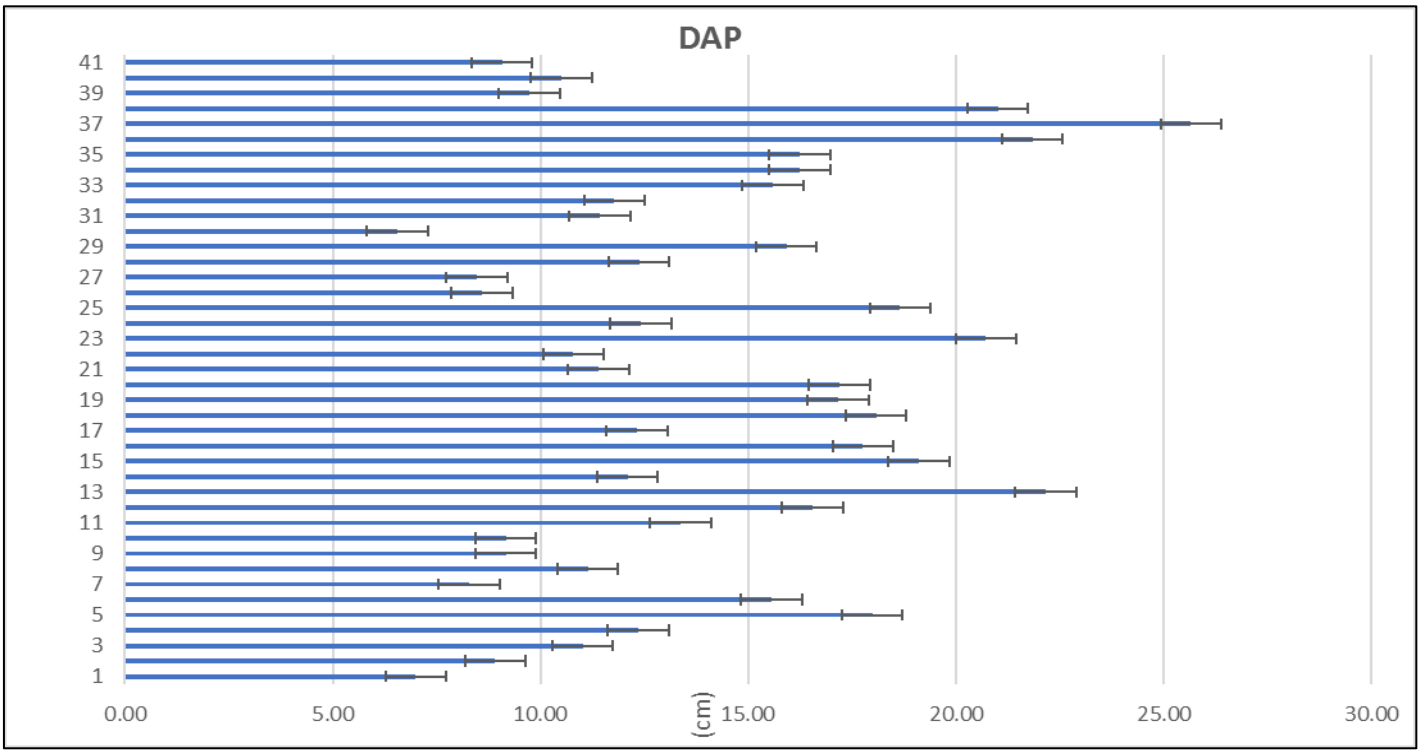
Sitios de muestreo establecidos en el Área de Conservación Privada Cerro Blanco



5.1.4. DAP de los árboles

Figura 5

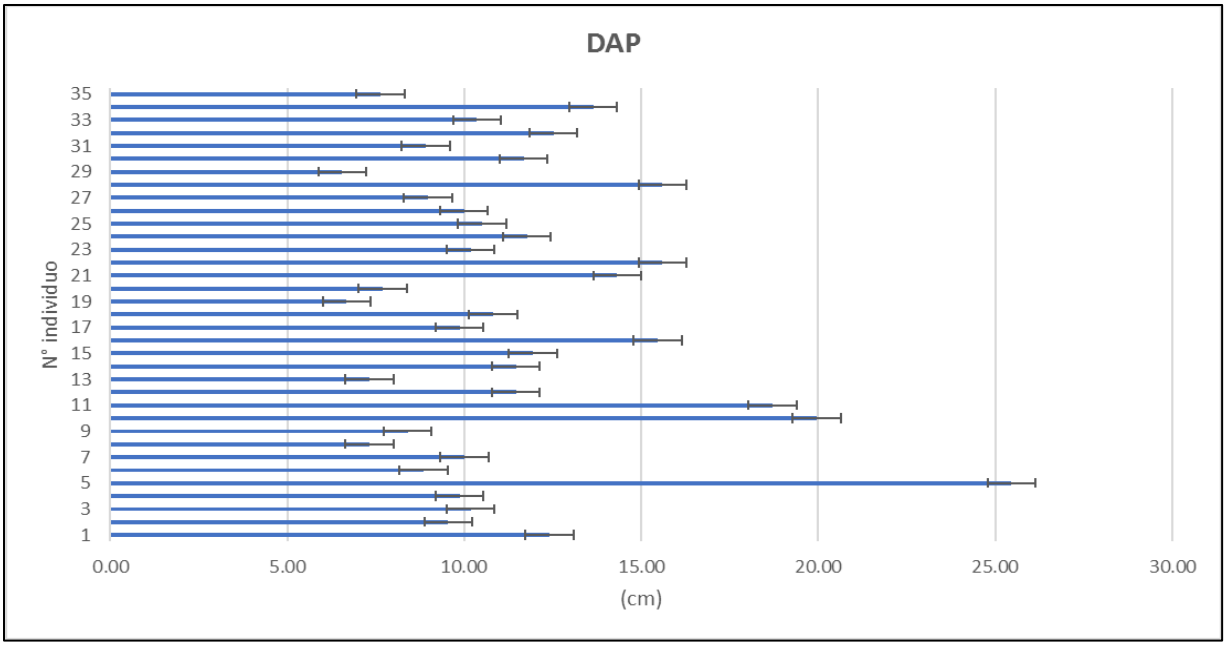
DAP Weinmannia fagaroides parcela 1



Según los datos obtenidos en la figura 14, dentro de la parcela 1 los árboles que presentan un mayor valor de DAP son los árboles 37 con 25,66 cm, el árbol 13 con 22,15 cm, y el árbol 36 con 21,84 cm, mientras que el árbol con un menor valor es el 30 con 6,56 cm; además la media aritmética de todos los árboles se sitúa alrededor de los 13,93 cm, y la desviación estándar en 4,70.

Figura 6

DAP Weinmannia fagaroides parcela 2



Según los datos expresados en la figura 15, dentro de la parcela 2 los árboles que presentan un mayor valor de DAP son los árboles 5 con 25,46 cm, el árbol 10 con 19,96 cm, y el árbol 11 con 18,72 cm; mientras que el árbol con un menor valor es el 29 con 6,56 cm, además de que la media aritmética de todos los árboles se sitúa alrededor de los 11,48 cm, y la desviación estándar es de 4.

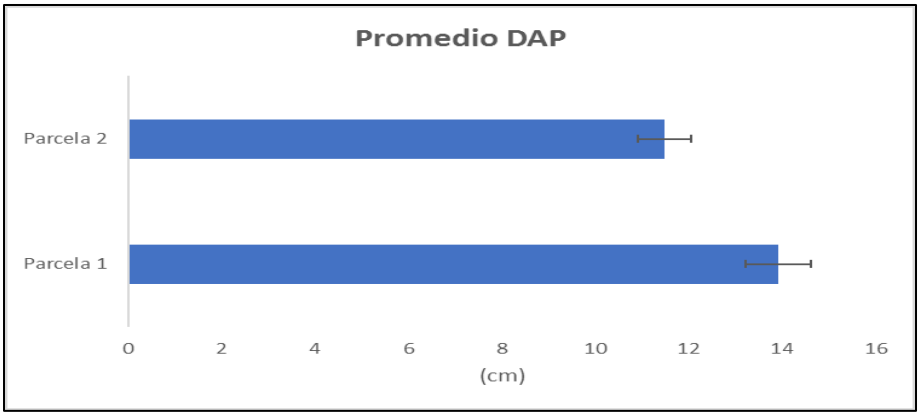
Tabla 2

Promedio de DAP de las parcelas de la especie Weinmannia fagaroides

N° Parcela	Promedio DAP (cm)
Parcela 1	13,93
Parcela 2	11,48

Figura 7

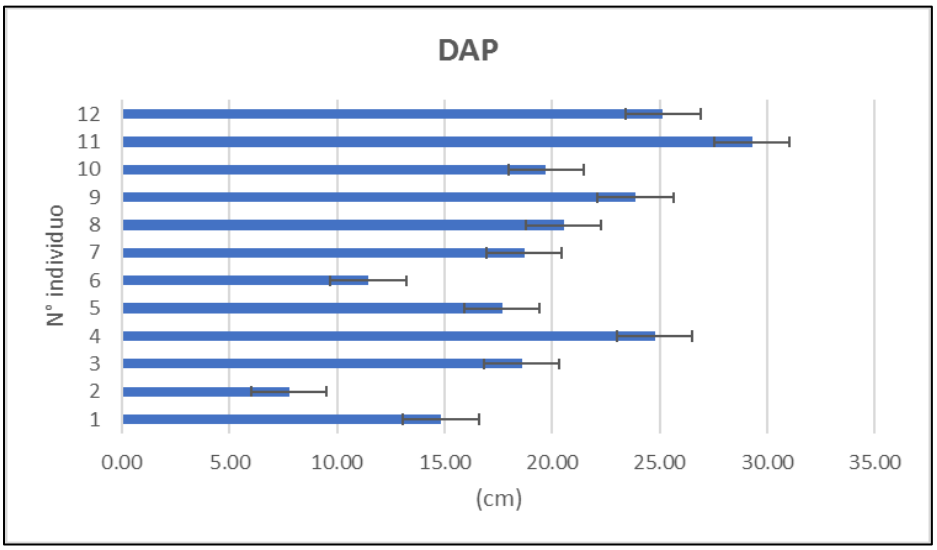
Promedio DAP Weinmannia fagaroides



Según lo indicado en la figura 16, en la parcela 1 se observa un promedio de DAP más alto en comparación con la parcela 2, este fenómeno puede atribuirse a una mayor disponibilidad de luz solar y una competencia menos intensa con otras especies vegetales por los recursos disponibles en el sitio, además, otras condiciones de crecimiento, como la disponibilidad de nutrientes y la edad de los árboles, podrían influir en esta variación en el diámetro a la altura del pecho (DAP) en las 2 parcelas.

Figura 8

DAP Alnus acuminata parcela 1

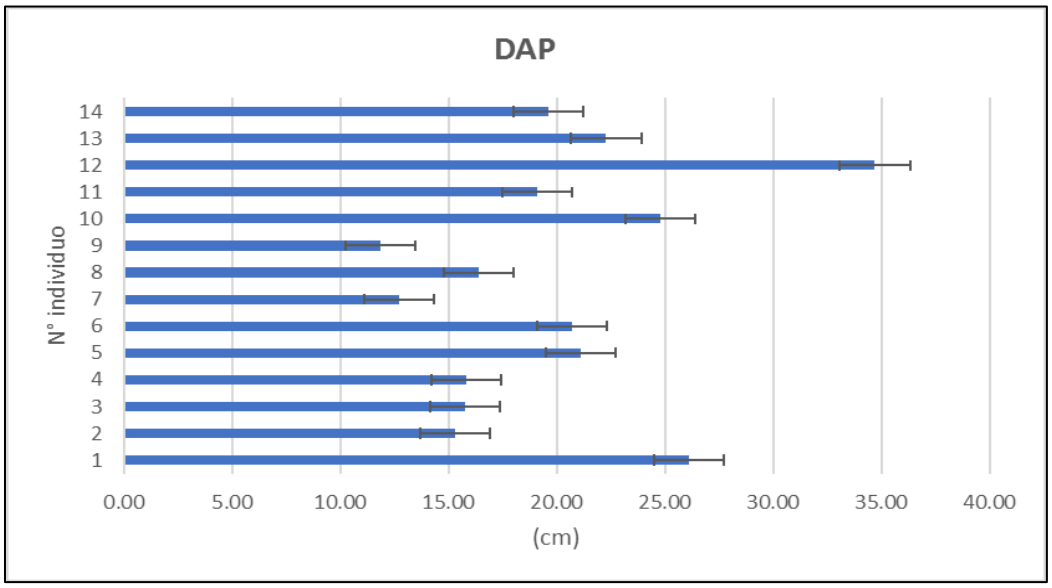


De acuerdo a los datos obtenidos en la figura 17, dentro de la parcela 1 los árboles que presentan un mayor valor de DAP son los árboles 11 con 29,28 cm, el árbol 12 con 25,15 cm, y

el árbol 4 con 24,76 cm, la media aritmética se sitúa alrededor de los 19,36 cm, y el valor mínimo es de 7,77 cm; además hay una desviación estándar de 6,06.

Figura 9

DAP Alnus acuminata parcela 2



Según los datos obtenidos en la figura 18, dentro de la parcela 2 los árboles que presentan un mayor valor de DAP son los árboles 12 con 34,7 cm, el árbol 1 con 26,1 cm; y el árbol 10 con 24,76 cm, además de que la media aritmética de todos los árboles se sitúa alrededor de los 19,72 cm, con un valor mínimo de 11,84 cm, y una desviación estándar de 6,03.

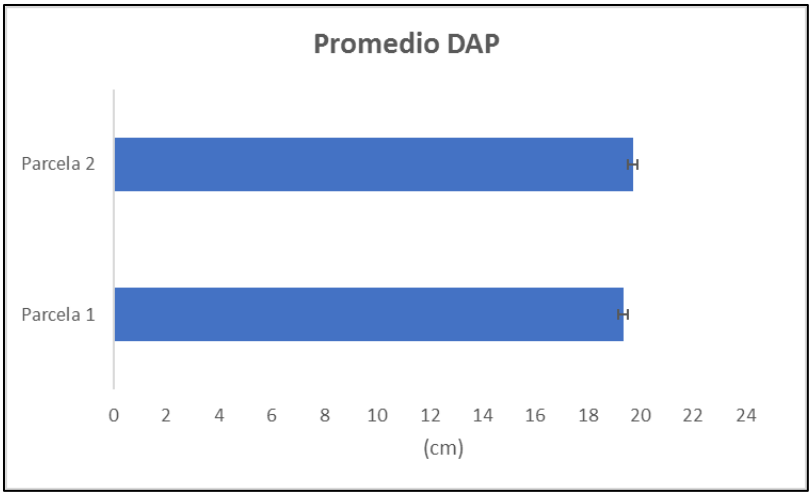
Tabla 3

Promedio de DAP de las parcelas de la especie Alnus acuminata

N° Parcela	Promedio DAP (cm)
Parcela 1	19,36
Parcela 2	19,72

Figura 10

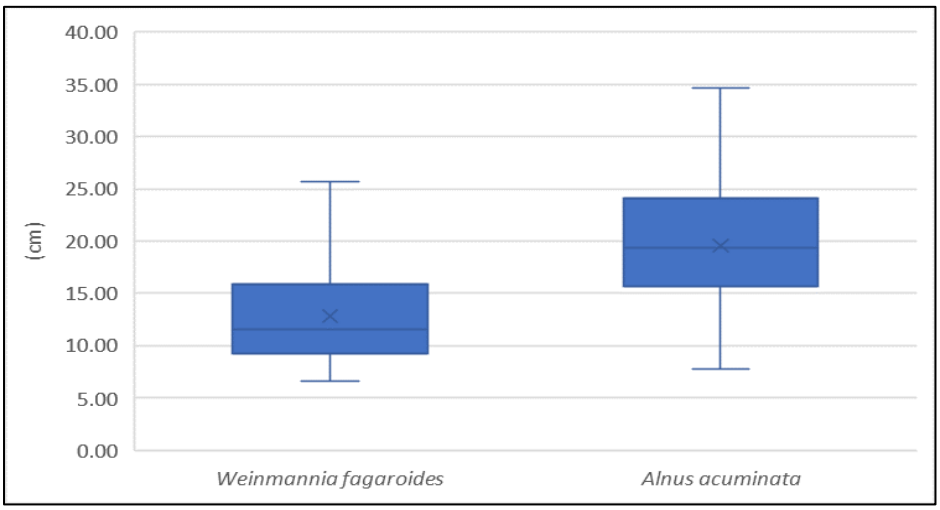
Promedio DAP Alnus acuminata



En base a lo mostrado en la figura 19, los valores de DAP en las 2 parcelas no muestran diferencias significativas, por lo que hay condiciones de crecimiento similares en cada uno de los árboles, además de que pueden tener la misma edad.

Figura 11

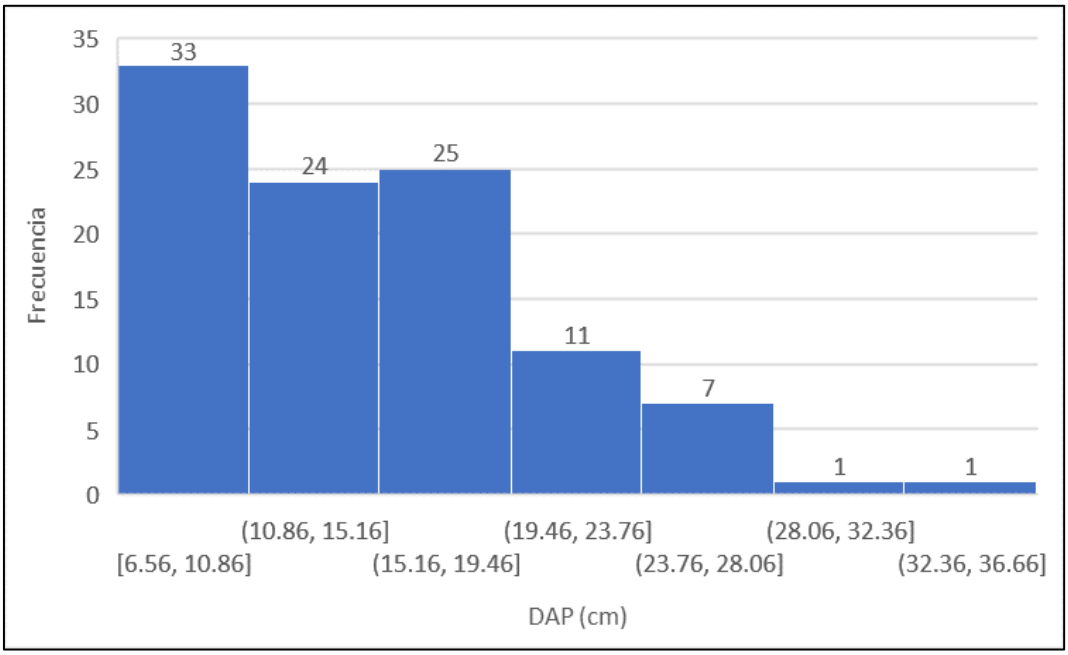
Relación entre la especie y el DAP



Las medias de DAP de cada especie muestran que la especie *Weinmannia fagaroides* centra su valor diamétrico alrededor de los 13 cm, en tanto la especie *Alnus acuminata* posee una media en su concentración diamétrica no mayor a 20 cm, por lo que esta especie muestra un tronco de mayor diámetro.

Figura 12

Histograma de frecuencia del DAP

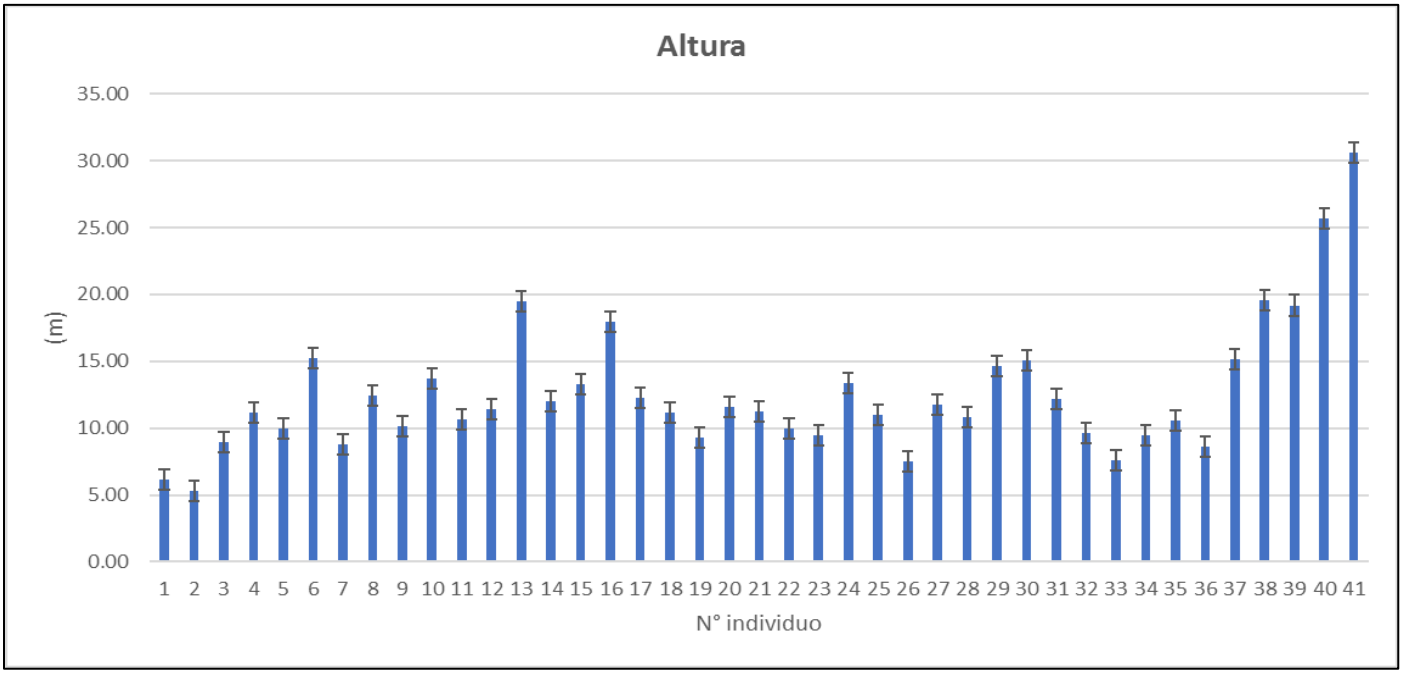


En el resultado del análisis estadístico de los datos del DAP de las especies se obtuvo una media de 14,53 cm, y una desviación estándar de 5,72; la mayor parte de los valores del DAP se ubican en el rango de 6, 56 cm a 10,86 cm.

5.1.5. Altura de los árboles

Figura 13

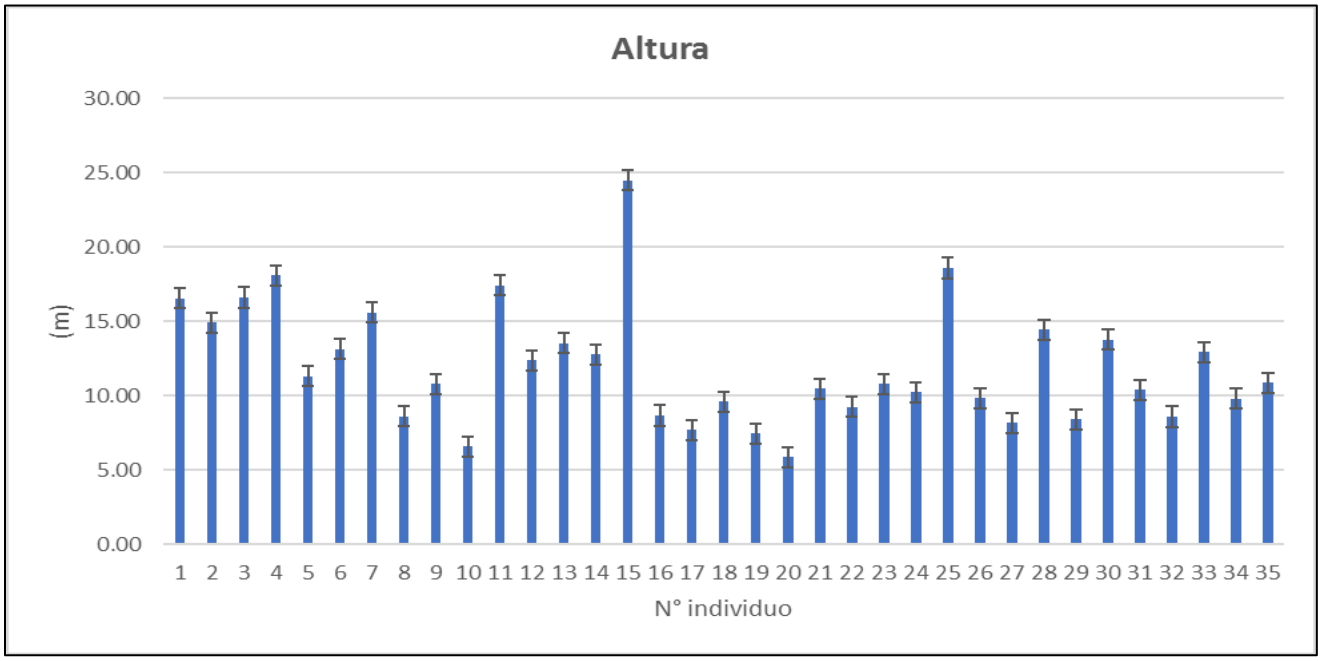
Altura Weinmannia fagaroides parcela 1



De acuerdo a la figura 22, los valores máximos de altura fueron 30,58 m, 25,67 m, y 19,54 m, y el árbol con menor altura registró un valor de 5,27 m; mientras que la media aritmética se situó en 12, 54 m.

Figura 14

Altura Weinmannia fagaroides parcela 2



En la figura 23 se evidencia que los valores más altos de altura fueron de 24,51 m, 18,59 m, y 18,08 m, y el valor mínimo fue de 5,88 m; mientras que la media de altura en esta parcela fue de 11,96 m.

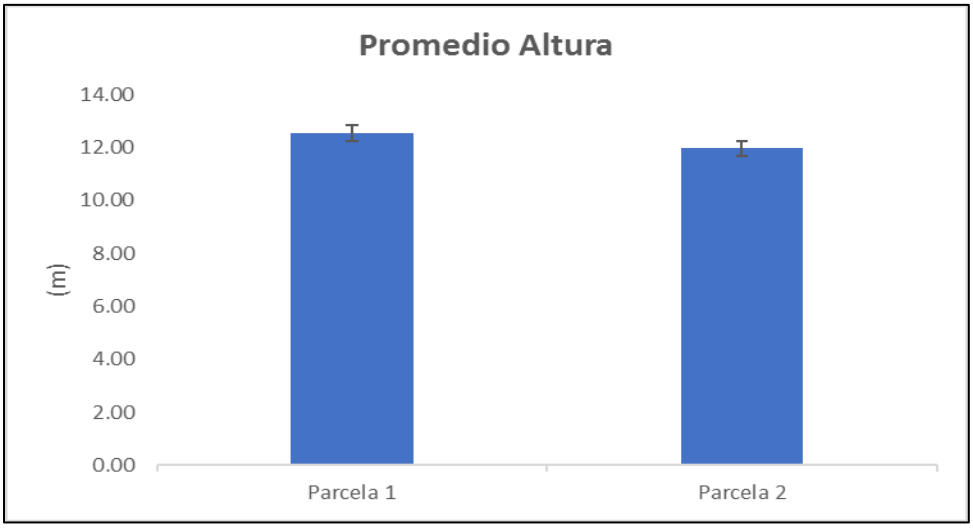
Tabla 4

Promedio de altura de las parcelas de la especie Weinmannia fagaroides

N° Parcela	Promedio Altura (m)
Parcela 1	12,54
Parcela 2	11,96

Figura 15

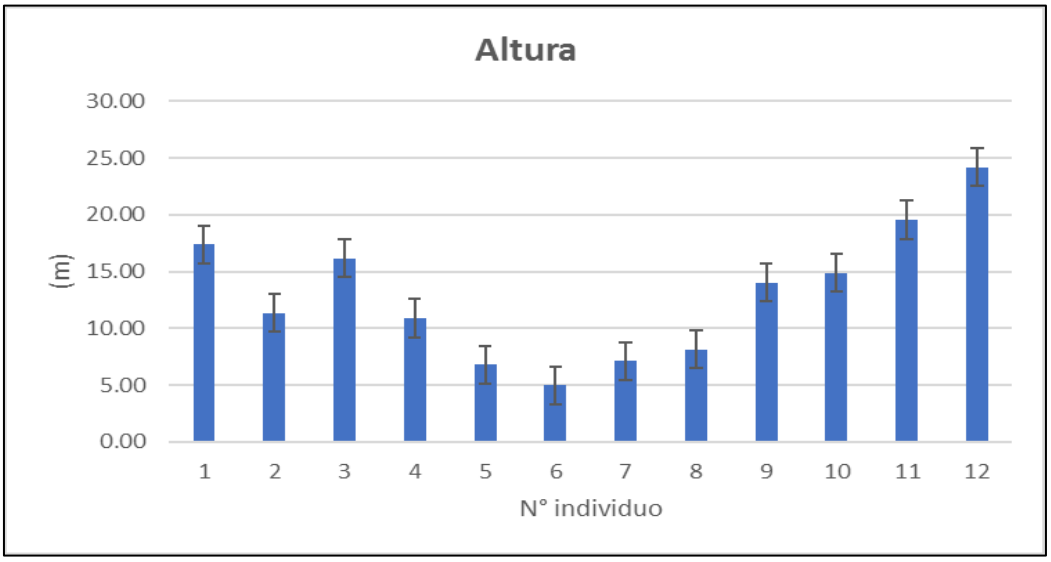
Promedio Altura Weinmannia fagaroides



Según la figura 24, los valores de altura registrados para la especie *Weinmannia fagaroides* son similares, aunque se determina un mayor promedio en la primera parcela, en donde además se observaron más individuos de esta especie.

Figura 16

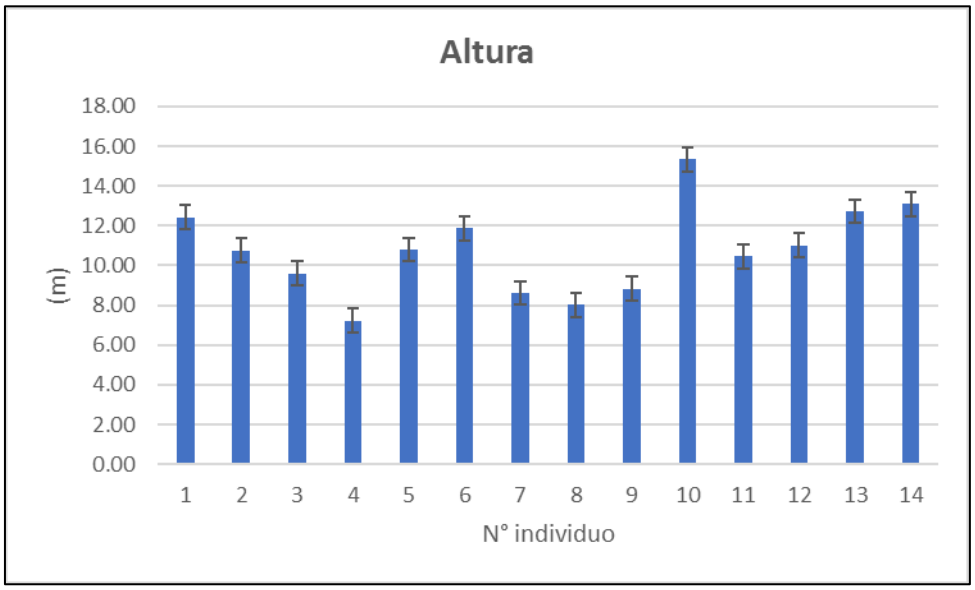
Altura Alnus acuminata parcela 1



A partir de los datos que se obtuvieron en la figura 25, los árboles de *Alnus acuminata* que presentaron una mayor altura fueron el número 12 con 24,21 m, el número 11 con 19,54 m, y el número 1 con 17, 4 m; superando la media de altura de toda la parcela, que es de 12, 96 m.

Figura 17

Altura Alnus acuminata parcela 2



Mediante los datos que se obtuvieron en la figura 26, los árboles de *Alnus acuminata* que presentaron una mayor altura fueron el número 10 con 15,33 m, el número 14 con 13,02 m, y el número 13 con 12,71 m; superando la media de altura de toda la parcela, que es de 10,76 m.

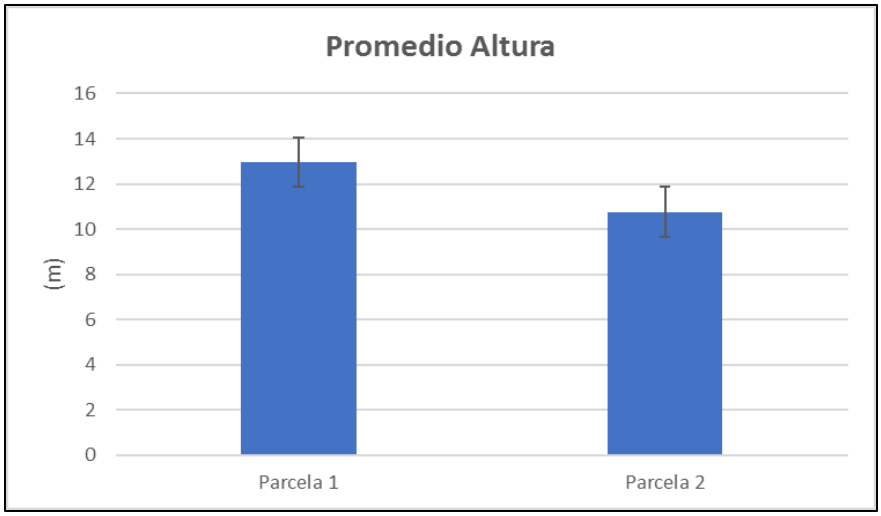
Tabla 5

Promedio de altura de las parcelas de la especie Alnus acuminata

N° Parcela	Promedio Altura (m)
Parcela 1	12,96
Parcela 2	10,76

Figura 18

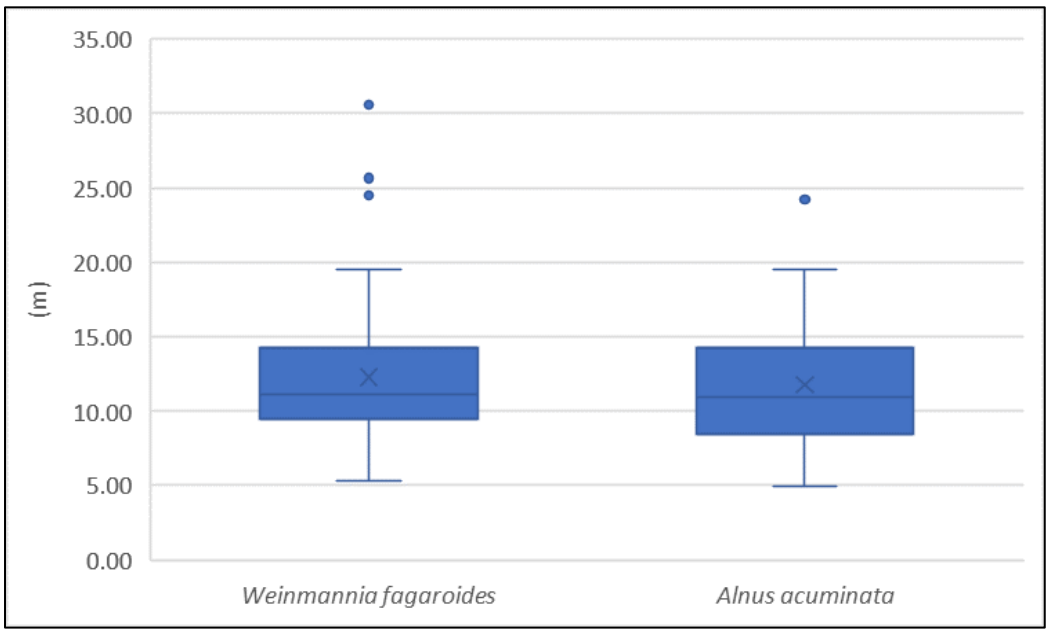
Promedio altura *Alnus acuminata*



De acuerdo a la figura 27, se observó un mayor promedio de altura en los árboles de la parcela 1, en donde se registraron una menor cantidad de individuos, esto puede ser debido a la edad de los árboles, o a una mayor disponibilidad de recursos ambientales para su desarrollo.

Figura 19

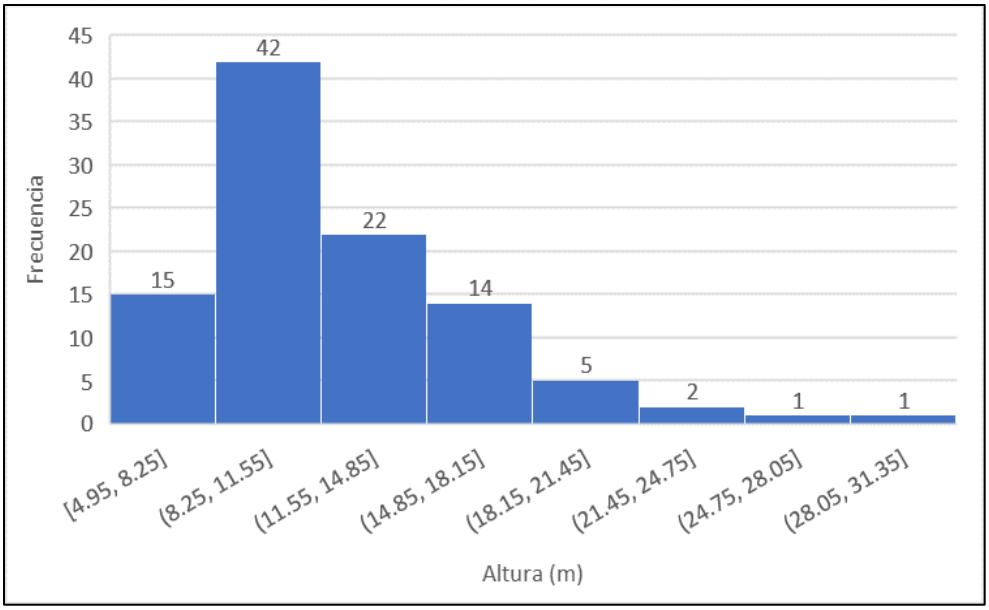
Relación entre la especie y la altura



En la figura 28 la altura de las 2 especies muestra una media similar, con valores cercanos a 14 m, aunque en la especie *Weinmannia fagaroides* se registraron valores atípicos de altura, con datos de hasta 30 m, mientras que en la especie *Alnus acuminata* se identificó un valor atípico de casi 25 m de altura.

Figura 20

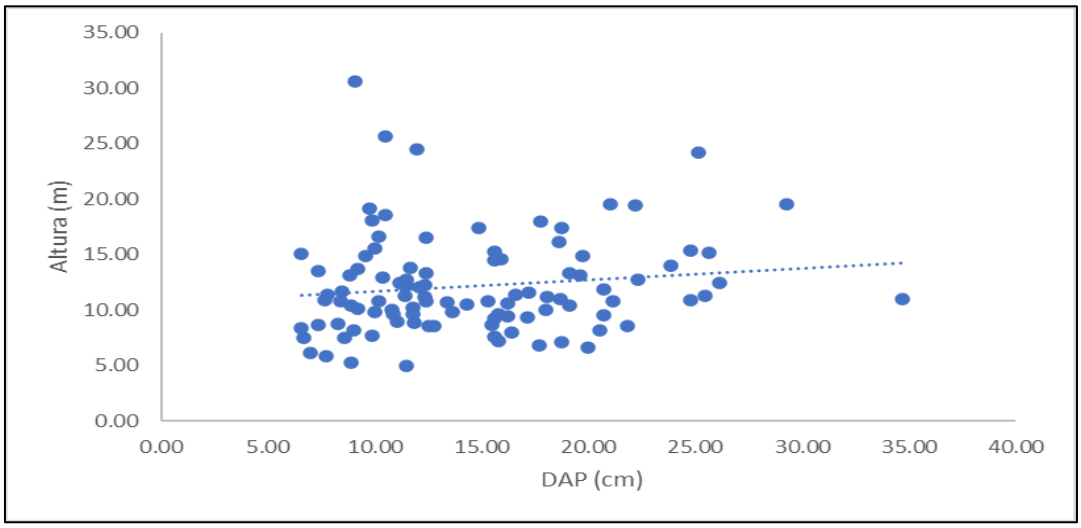
Histograma de frecuencia de la altura



Del análisis de los datos obtenidos, se obtuvo una media de 12,15 m de altura de las especies, una desviación estándar de 4,43; y la mayoría de las especies tienen una altura de 8,25 m a 11,55 m.

Figura 21

Relación entre DAP y altura

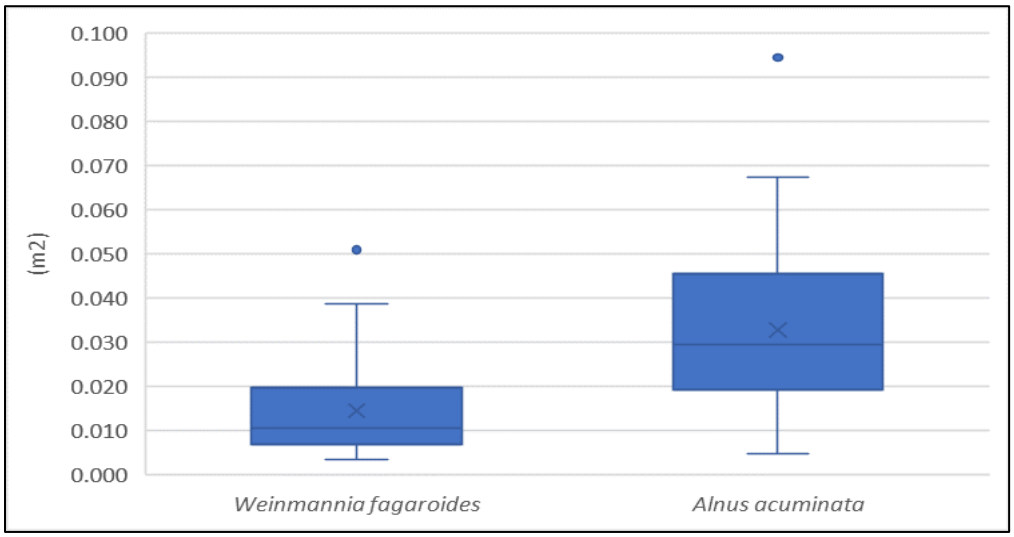


De acuerdo al análisis de la figura 30, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson y se determinó un valor de 0,07 para la especie *Weinmannia fagaroides*, y 0,45 para *Alnus acuminata*, dando como resultado una correlación débil y moderada entre estas variables, por lo que el aumento del DAP no se relaciona de manera consistente con un aumento en la altura de los árboles.

5.1.6. Área Basal

Figura 22

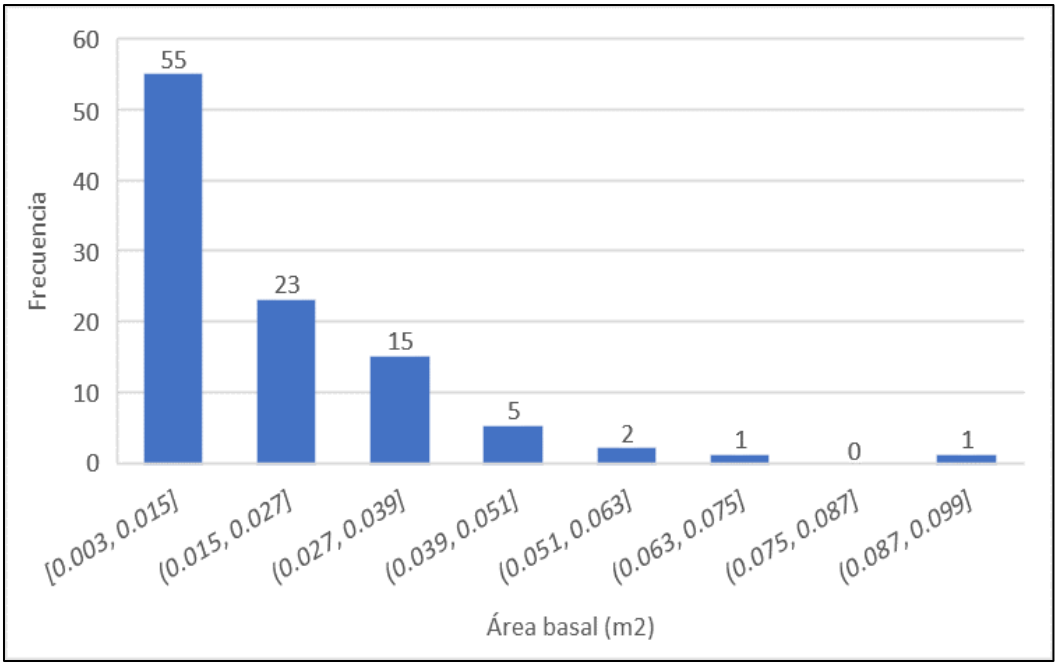
Relación entre la especie y el Área basal



El área basal para la especie *Weinmannia fagaroides* es de aproximadamente 0,015 m^2, mientras que la especie *Alnus acuminata* posee un valor promedio de 0,035 m^2.

Figura 23

Histograma de frecuencia del Área basal

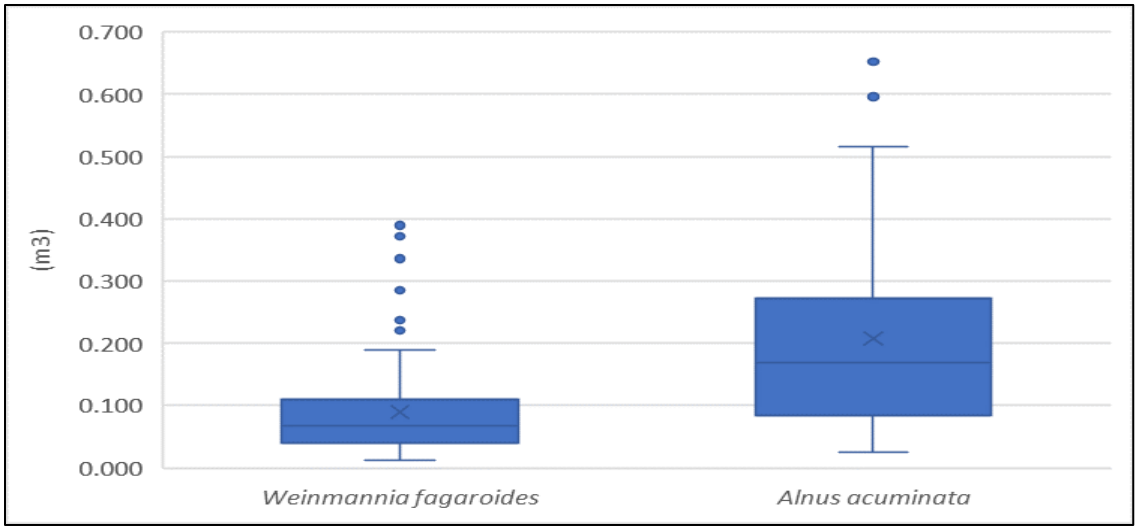


El área basal de los individuos de las 2 especies de estudio tiene una media de 0,019 m^2 y una desviación estándar de 0,015, ubicando la mayor parte de árboles en los rangos de 0,003 a 0,015 m^2, con un 55 % de los individuos, casi un cuarto en el rango de 0,015 a 0,027 m^2, y un pequeño porcentaje (15 %) se encuentra en el intervalo de 0,027 a 0,039 m^2 de área basal.

5.1.7. Volumen Forestal

Figura 24

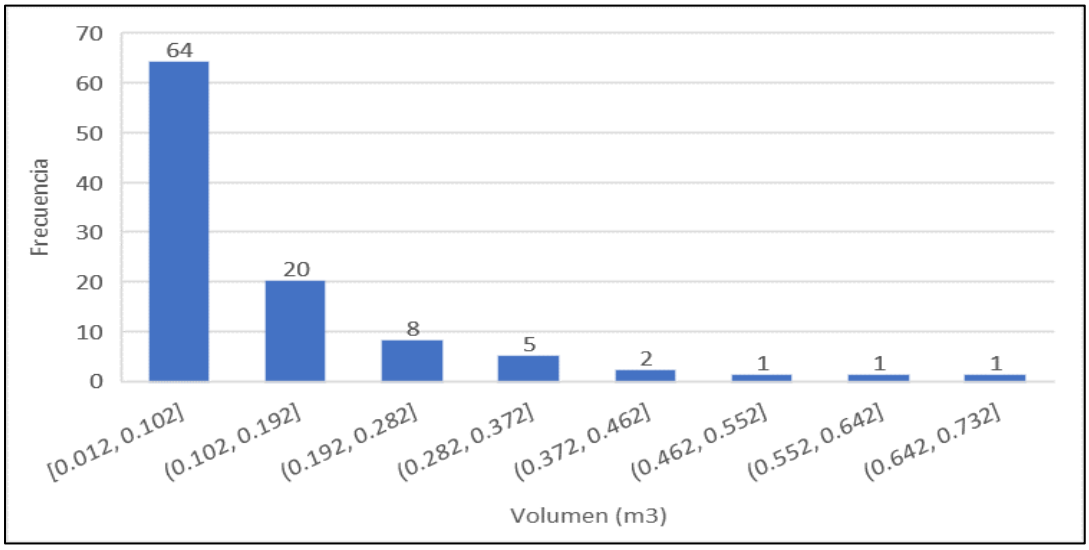
Relación entre la especie y el Volumen



Los resultados representados en la figura 33 revelan que la especie *Weinmannia fagaroides* tiene una media de volumen forestal en torno a los 0,07 m^3, aunque se observan varios valores atípicos en su distribución, en contraste, la especie *Alnus acuminata* presenta una media de aproximadamente 0,18 m^3 de volumen.

Figura 25

Histograma de frecuencia del Volumen

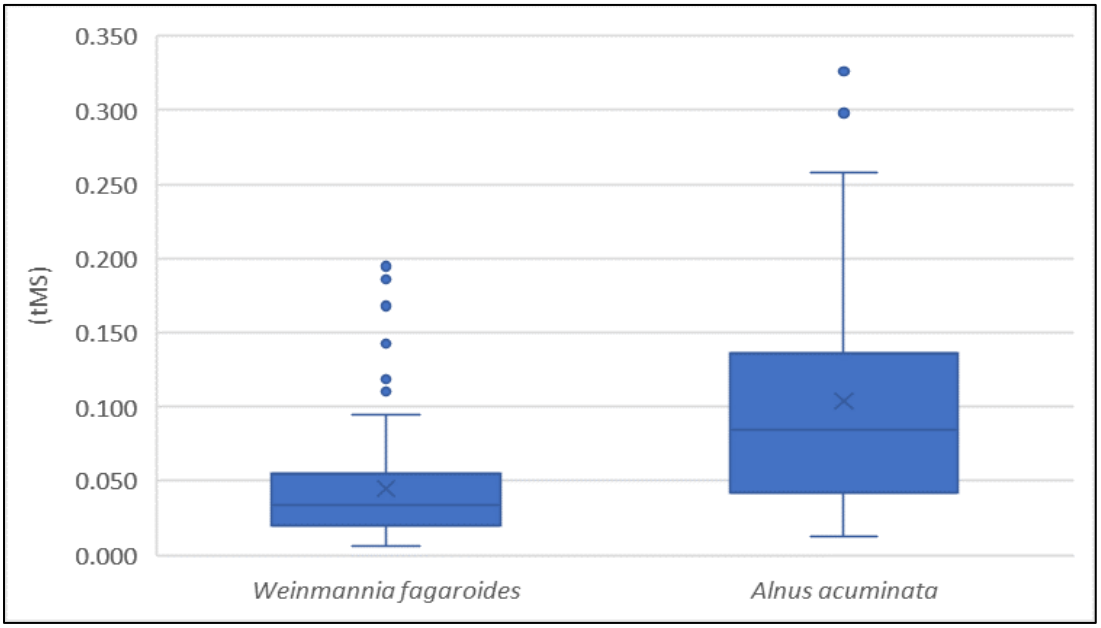


El 64 % de los individuos exhiben un rango de volumen entre 0,012 y 0,10 m^3, mientras que un 20 % presentan volúmenes comprendidos entre 0,10 y 0,192 m^3. Se calculó una media aritmética de 0,12 m^3con una desviación estándar correspondiente del mismo valor.

5.1.8. Biomasa en la superficie

Figura 26

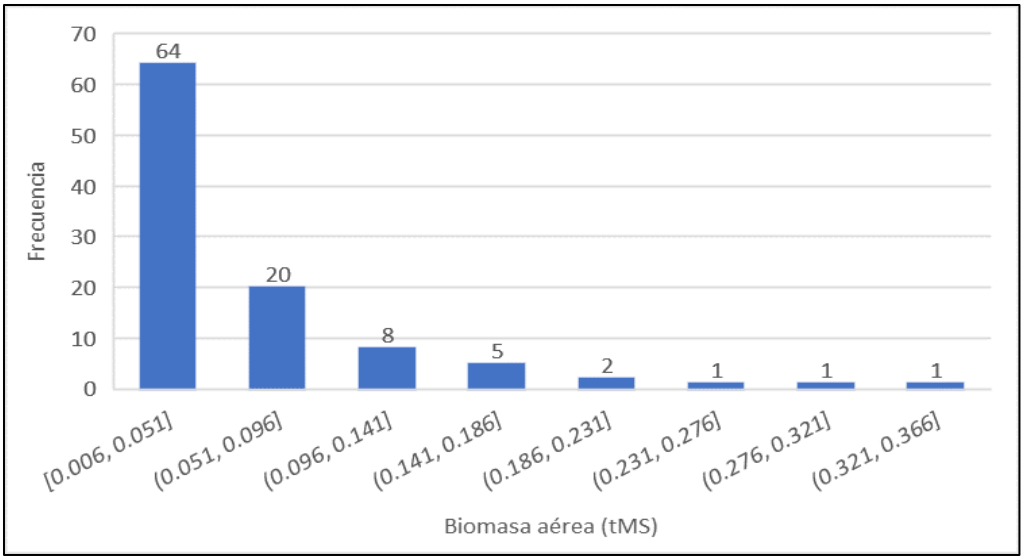
Relación entre la especie y la Biomasa sobre el suelo



De acuerdo a la figura 35, la especie *Weinmannia fagaroides* presenta una menor cantidad de biomasa sobre el suelo, con un promedio de aproximadamente 0,040 tMS, mientras que la especie *Alnus acuminata* tiene un contenido superior de biomasa sobre el suelo, con un dato de 0,085 tMS.

Figura 27

Histograma de frecuencia de Biomasa sobre el suelo

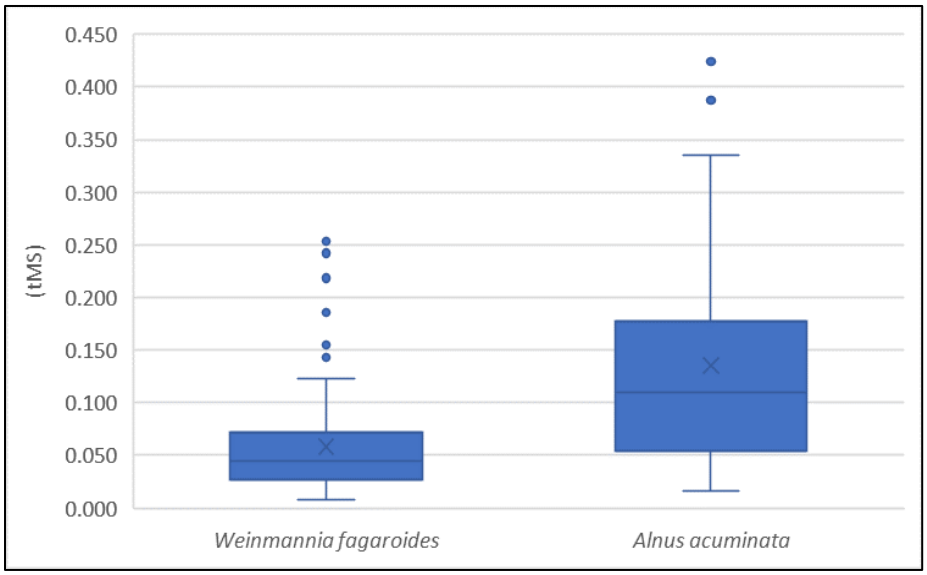


Se alcanzó un promedio de 0,06 toneladas de materia seca para los individuos muestreados con una desviación estándar de 0,06, así mismo la mayor cantidad de individuos (64 %) poseen una biomasa sobre el suelo de entre 0,006 a 0,051 toneladas.

5.1.9. Biomasa total

Figura 28

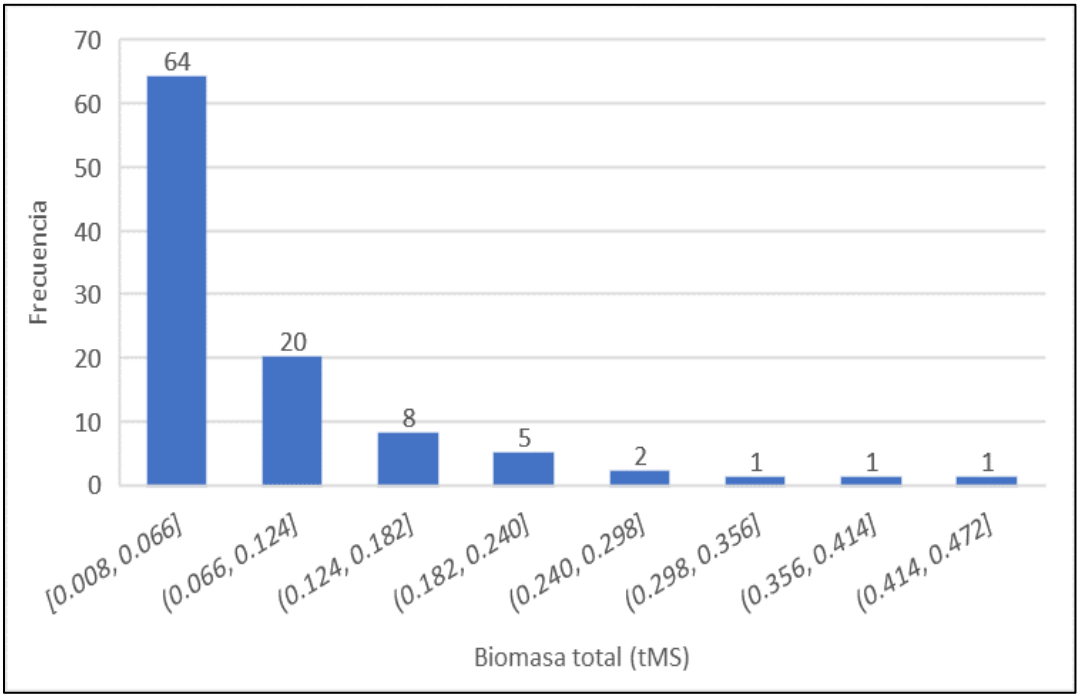
Relación entre la especie y la Biomasa total



Los cálculos para la biomasa total dieron como resultado para la especie *Weinmannia fagaroides* una media de casi 0,050 toneladas de materia seca, y para la especie *Alnus acuminata* un valor promedio de 0,11 toneladas.

Figura 29

Histograma de frecuencia de la Biomasa total

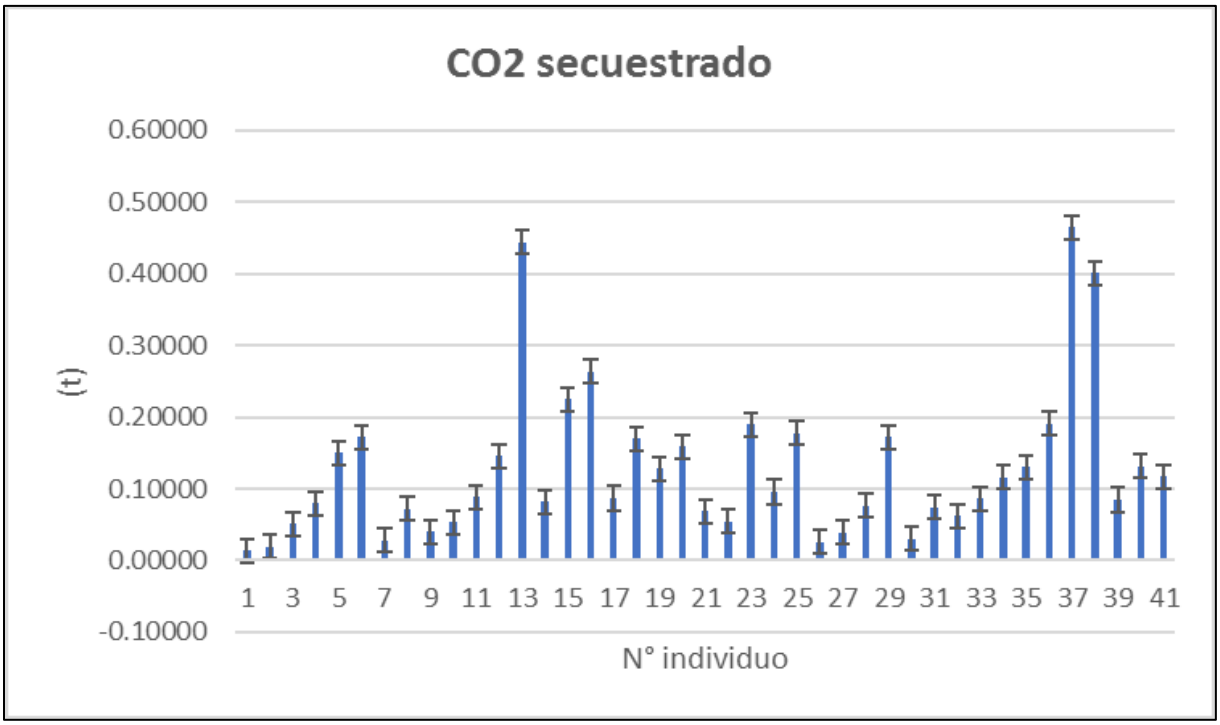


El promedio de la biomasa total en los árboles muestreados es de 0,078 tMS con una desviación estándar de 0,08, así mismo cerca de 2/3 de los individuos poseen una cantidad de biomasa total de 0,008 a 0,066 tMS en sus estructuras.

5.1.10. CO_2 almacenado

Figura 30

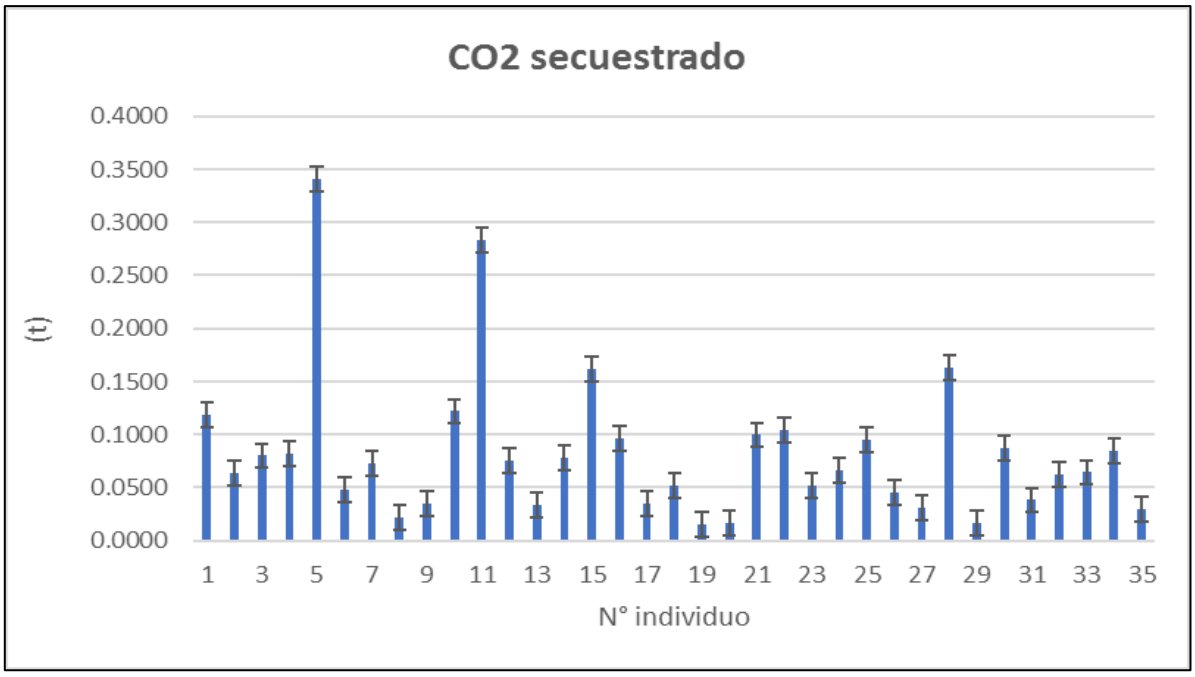
CO_2 secuestrado Weinmannia fagaroides parcela 1



Dentro de la parcela 1 la media aritmética de CO_2 almacenado en los árboles es de 0,128 toneladas, con un valor mínimo de 0,0139 ton y un máximo de 0,464 ton, mientras que la desviación estándar es de 0,11.

Figura 31

CO_2 secuestrado Weinmannia fagaroides parcela 2



De acuerdo a la figura 40, el promedio de CO_2 almacenado en esta parcela es de 0,082 toneladas, con un valor máximo de 0,340 ton y un mínimo de 0,015 ton, así mismo se registró una desviación estándar de 0,069.

Tabla 6

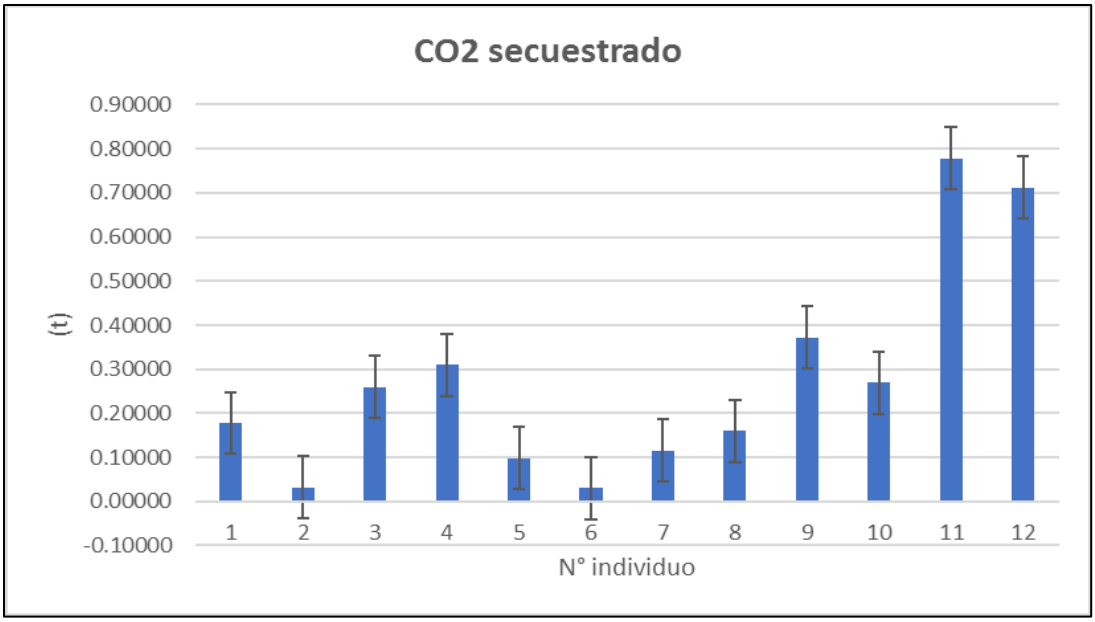
Cantidad de CO_2 absorbido por la especie Weinmannia fagaroides

N° Parcela	Cantidad de CO_2 secuestrado (t)
Parcela 1	5,253
Parcela 2	2,872
Total	**8,125**

Según la tabla 8, hay casi el doble de absorción de CO_2 en los individuos de la parcela 1, con un valor de 5,253 toneladas almacenadas en los 41 árboles que conforman la parcela, debido a una mayor cantidad de individuos en comparación a la parcela 2.

Figura 32

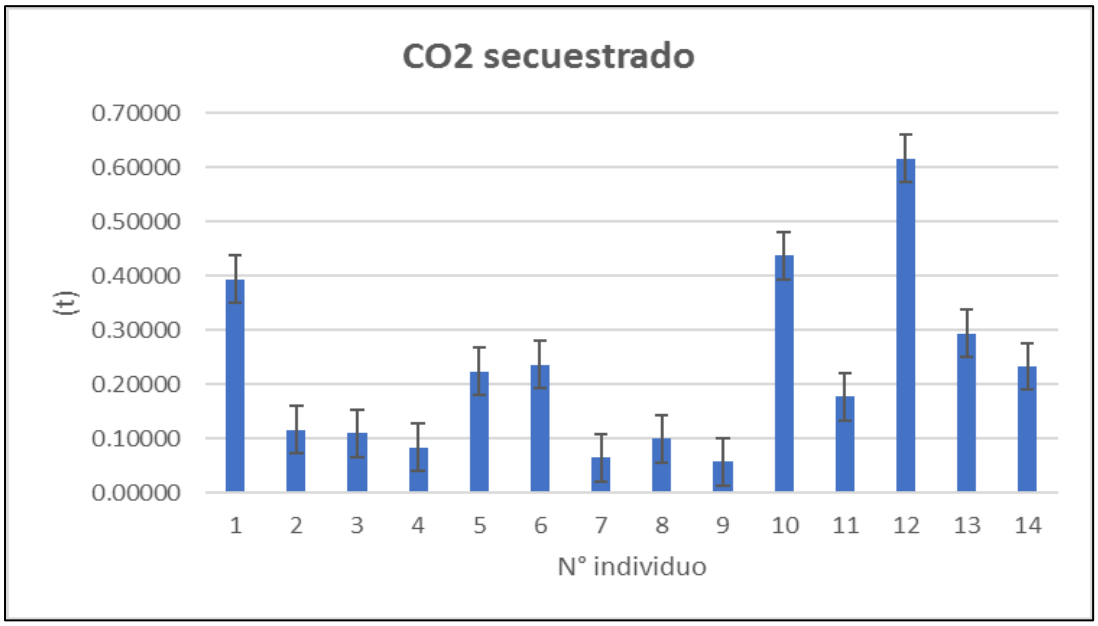
***CO_2** secuestrado Alnus acuminata parcela 1*



De acuerdo a la figura 41, la media de CO_2 almacenado en esta parcela es de 0,276 toneladas, registrando un valor máximo de 0,778 ton y un valor mínimo de 0,030 ton, con una desviación estándar de 0,244.

Figura 33

CO_2 *secuestrado Alnus acuminata parcela 2*



Según el análisis de la figura 42, la media aritmética en esta parcela es de 0,224 ton, con una desviación estándar de 0,163, además el valor máximo es de 0,616 ton, y el mínimo de 0,057 ton.

Tabla 7

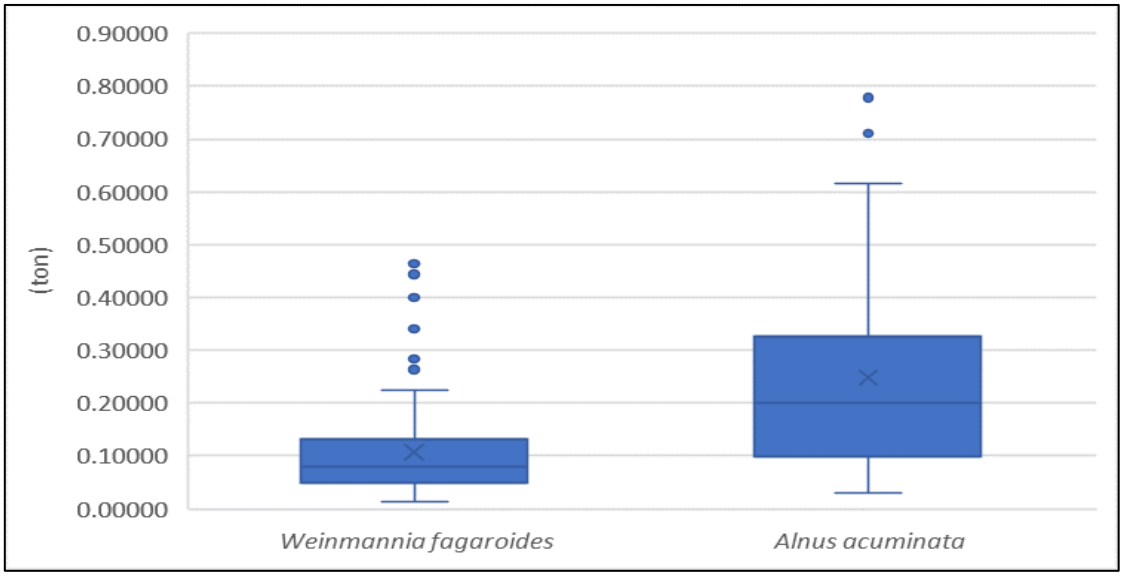
Cantidad de ***CO_2*** *absorbido por la especie Alnus acuminata*

N° Parcela	Cantidad de CO_2 secuestrado (t)
Parcela 1	3,314
Parcela 2	3,142
Total	**6,456**

De acuerdo a la tabla 9, los valores de CO_2 almacenados en las 2 parcelas son similares, debido a que cuentan con casi el mismo número de árboles en cada parcela, y sus características como DAP y altura no difieren demasiado.

Figura 34

Relación entre la especie y la cantidad de $\boldsymbol{CO_2}$ *capturado*



La figura 43 indica que cada individuo de la especie *Weinmannia fagaroides* absorbe una media de 0,10 toneladas de CO_2 en su estructura; mientras que *Alnus acuminata* registra un valor promedio de 0,20 toneladas de CO_2 absorbidas por cada individuo.

5.2. Fase de Laboratorio

5.2.1. Porcentaje de humedad

Tabla 10

Pesos promedio de cada especie

Especie	Peso fresco (g)	Peso deshidratado (g)
Weinmannia fagaroides	80, 49	71,63
Alnus acuminata	101,01	93,27

Tabla 11

Porcentaje de humedad por especie

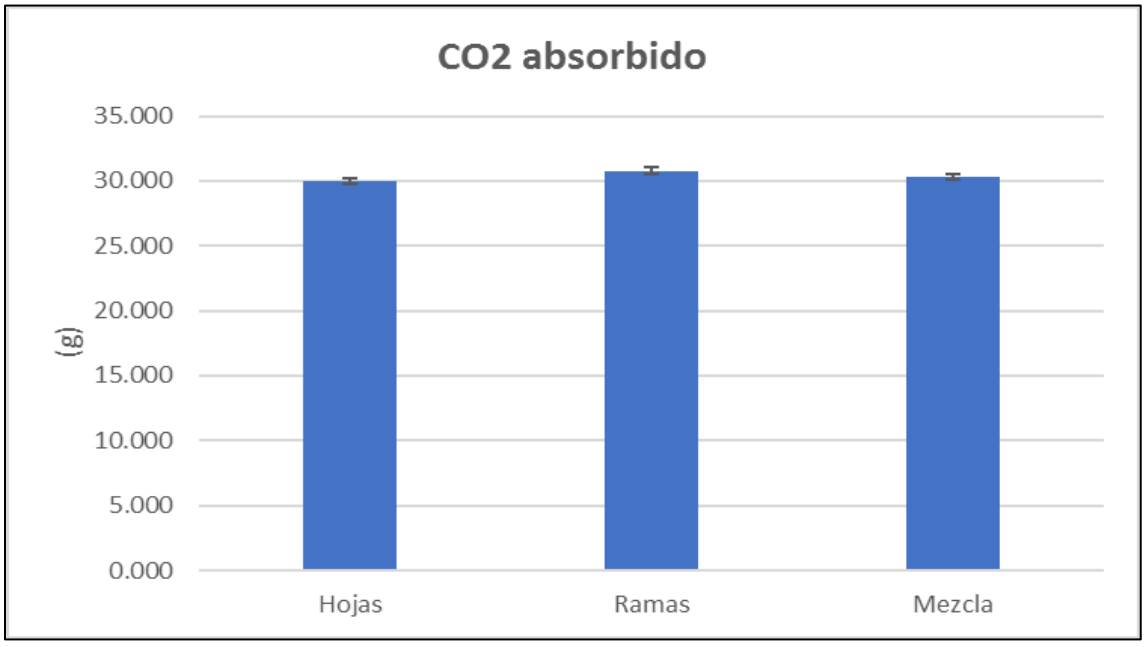
Especie	% de humedad
Weinmannia fagaroides	11,06
Alnus acuminata	7,98

Luego del análisis de los pesos de las 2 especies en laboratorio, se determinó que en la especie *Weinmannia fagaroides* existe un mayor contenido de humedad en su estructura, la cual se perdió luego de la deshidratación de las muestras.

5.2.2. CO_2 almacenado

Figura 35

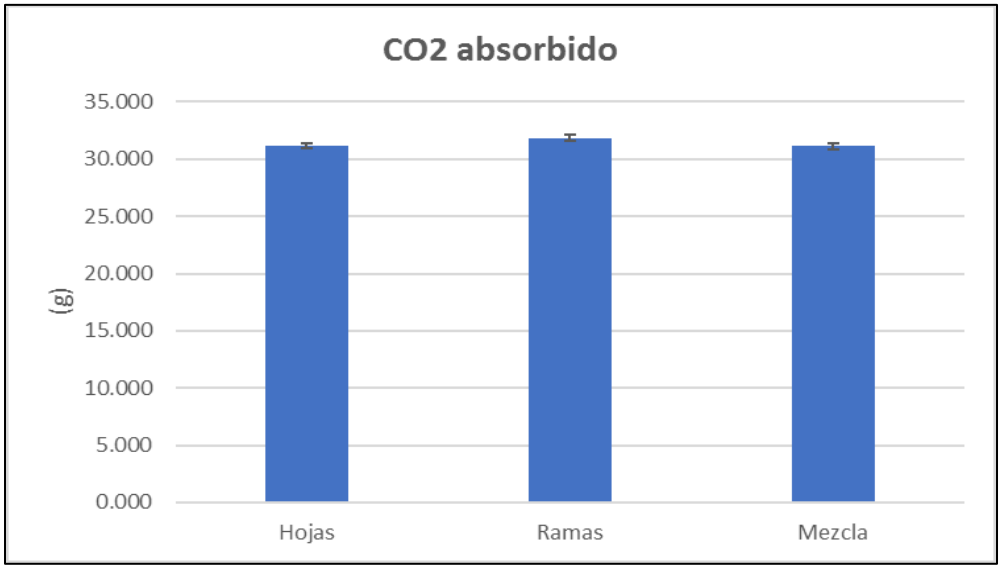
Cantidad de CO_2 absorbido por partes del árbol Weinmannia fagaroides



De acuerdo a la figura 44, no se observaron diferencias significativas en los valores de CO_2 absorbido por las diferentes partes del árbol de la especie *Weinmannia fagaroides*, como se evidencia en la desviación estándar de 0,39.

Figura 36

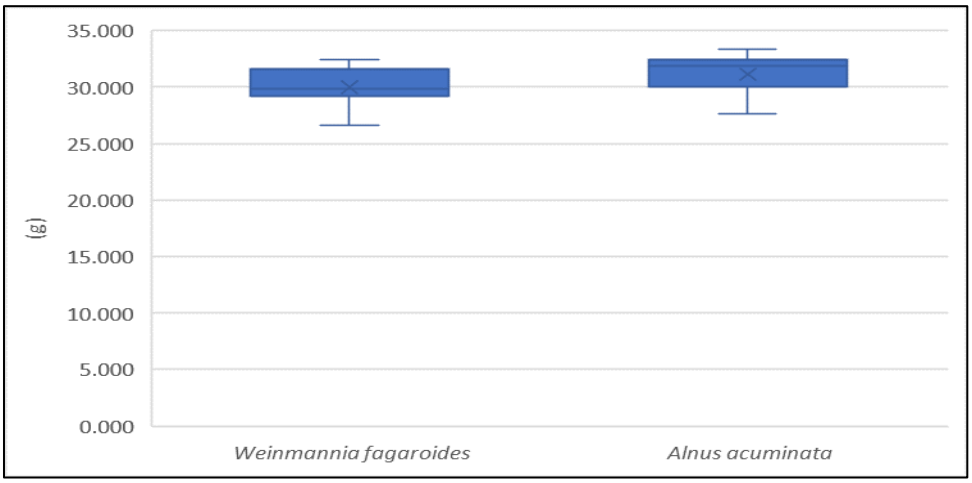
Cantidad de $\boldsymbol{CO_2}$ *absorbido por partes del árbol Alnus acuminata*



Según el análisis de la figura, los valores de absorción de CO_2 a nivel de hojas, ramas y una mezcla de ambos se sitúan dentro del mismo rango, como indica una desviación estándar de 0,42.

Figura 37

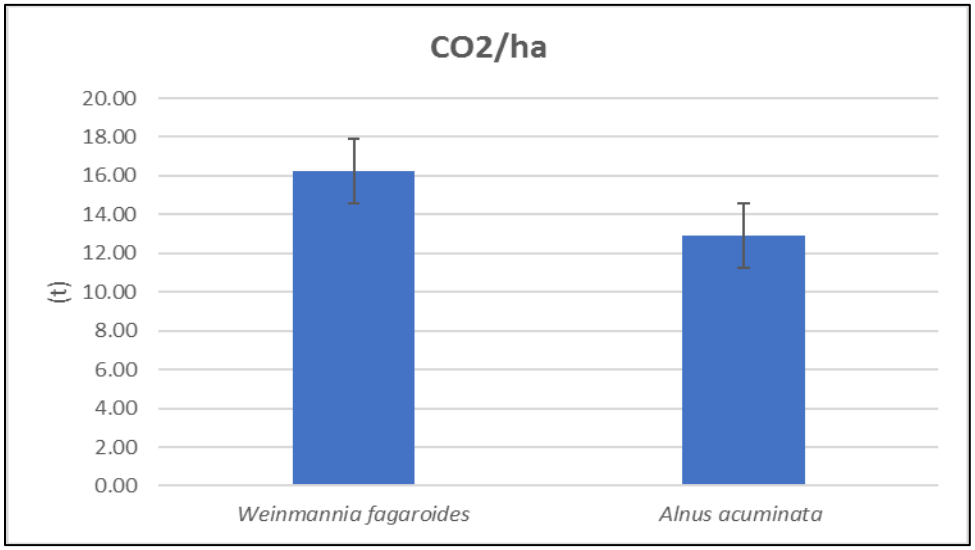
Relación entre la especie y la cantidad de $\boldsymbol{CO_2}$ *absorbido*



De acuerdo al análisis de la figura 46, la especie *Alnus acuminata* presenta una mayor absorción de CO_2, con valores medios de 31 g por árbol, en comparación con *Weinmannia fagaroides*, que registra una media de 30 g. Sin embargo, cabe destacar que luego de un análisis estadístico, estas diferencias no resultaron significativas.

Figura 38

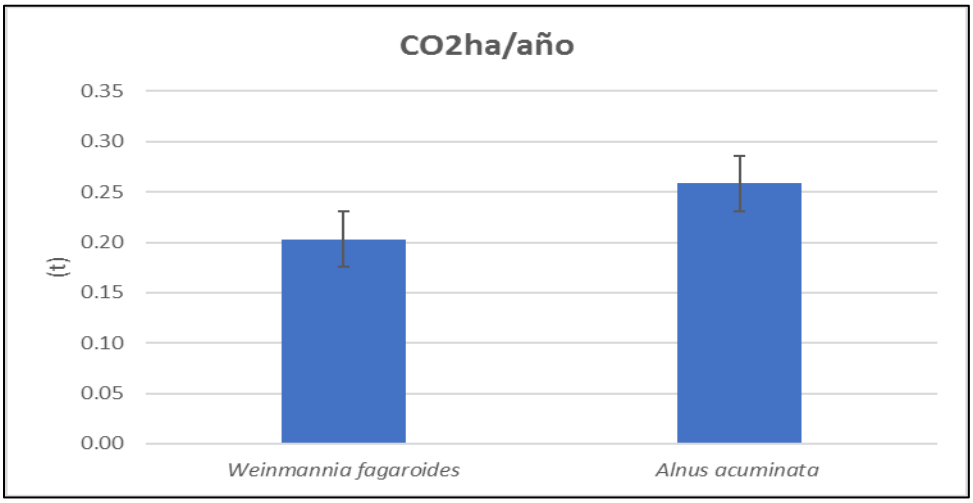
Cantidad de CO_2 absorbido por hectárea



Se registró una mayor cantidad de almacenamiento de carbono por hectárea en la especie *Weinmannia fagaroides*, con un valor cercano a 16 toneladas, mientras que en *Alnus acuminata* el valor es de cerca de 13 toneladas.

Figura 39

Cantidad de CO_2 absorbido por hectárea por año



Según la figura 48, la especie *Weinmannia fagaroides* posee un menor valor de almacenamiento de CO_2 por hectárea por año con casi 0,20 ton, mientras que *Alnus acuminata* registra un valor aproximado de 0,25 ton.

5.3. Discusión

Los valores de carbono almacenado en la biomasa de las especies *Weinmannia fagaroides* y *Alnus acuminata* resultaron superiores a los resultados de la investigación hecha por Guerrero (2018), los cuales en su estudio denominado "*Alnus acuminata kunth*: una alternativa de reforestación y fijación de dióxido de carbono" reportaron valores de 2,05 toneladas de CO_2 almacenado en la estructura de 40 árboles de la especie *Alnus acuminata*, esto debido a que el sector corresponde a un bosque en zona de transición, en el que sus alrededores han sido deforestados para el cultivo de pastos; aunque los valores de carbono almacenado en la biomasa por hectárea y por año son menores, según el estudio realizado, en donde los alisos pueden fijar 85,65 toneladas y 6,15 toneladas anualmente en una superficie conformada por 120 árboles.

Así mismo, los valores obtenidos resultaron menores a los presentados por Arévalo (2015) en un bosque siempreverde montano y siempreverde montano bajo, en los que se registraron valores de 151 ton/ha, mientras que Quinceno (2016) reportó resultados de 174,7 toneladas de CO_2 fijado por las especies en un bosque muy húmedo tropical, debido a que consideraron la biomasa en otros compartimentos de almacenamiento como la hojarasca. De acuerdo con Rodríguez (2016) la fijación del aliso toma importancia al ser comparado con otros ecosistemas naturales, al determinar valores de 21,7 toneladas almacenadas en cada hectárea. Según Quinceno (2016) existen factores que intervienen positiva o negativamente en la estimación de fijación de CO_2 en la biomasa, como el tipo de población a muestrear, y al realizar el estudio en un bosque primario se desconoce parámetros importantes como la edad de los árboles, ya que un árbol maduro almacena más carbono que uno en desarrollo; así mismo un bosque primario puede poseer una mayor densidad de árboles por superficie, en comparación a un bosque secundario o una plantación. Finalmente, *Alnus acuminata* es una especie pionera de baja densidad en la madera, por ende su almacenamiento y fijación de carbono son menores frente a otras especies que poseen valores medios en esta variable, por lo que la estimación de la absorción de CO_2 depende en gran medida de la densidad de la madera de la especie estudiada. (Ordóñez et al, 2015).

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

La especie *Alnus acuminata* mostró una mayor absorción de CO_2 en su estructura fisiológica por individuo en comparación con *Weinmannia fagaroides*, aunque no se encontraron diferencias significativas entre ambas especies ($p>0.05$). Los valores medios de absorción fueron de 31 g por árbol para *Alnus acuminata* y 30 g por árbol para *Weinmannia fagaroides*, mostrando una proporción similar de captura a nivel de hojas y ramas en ambas especies.

Existe una mayor absorción de carbono por árbol en la especie *Alnus acuminata* con un dato medio de 0,22 toneladas, y de 0,10 toneladas en *Weinmannia fagaroides,* aunque los cálculos de almacenamiento de carbono por hectárea revelaron un valor promedio de aproximadamente 16 ton para *Weinmannia fagaroides*, mientras que para *Alnus acuminata* fue de cerca de 13 ton.

La correlación entre el DAP y la altura de los árboles fue débil y moderada para *Weinmannia fagaroides* ($r = 0.07$) y *Alnus acuminata* ($r = 0.45$), respectivamente, sugiriendo que el aumento en el DAP no se relaciona consistentemente con un aumento en la altura de los árboles, y en otras variables como el volumen, área basal, y cantidad de biomasa.

Aunque se observaron diferencias en el almacenamiento de CO_2 extrapolado por hectárea por año, con aproximadamente 0.20 toneladas para la especie *Weinmannia fagaroides* y 0.25 toneladas para *Alnus acuminata,* estas diferencias no fueron estadísticamente significativas ($p>0.05$), debido a que la edad promedio de las 2 especies son similares, con un valor de 50 años aproximadamente.

El árbol de *Alnus acuminata* se presenta como una mejor opción en la lucha contra el calentamiento global en comparación a *Weinmannia fagaroides*; ya que se demostró que el aliso es una especie forestal nativa que puede aportar significativamente en la reducción del CO_2 en la atmósfera, además de ser una especie forestal con un gran interés debido a su excelente desarrollo vegetativo.

CAPÍTULO VII

RECOMENDACIONES

Se recomienda a la empresa UNACEM realizar estudios adicionales sobre el análisis de las tasas de absorción de carbono por parte de las especies vegetales en el Área de Conservación Privada Cerro Blanco, para su comparación con las emisiones de carbono generadas en el proceso productivo de fabricación de cemento, estimando la eficacia de las prácticas de gestión forestal para capturar y almacenar carbono.

Se sugiere informar a las comunidades ubicadas en el área de influencia directa e indirecta de la planta de UNACEM sobre el papel que cumple en el cuidado y preservación del Área de Conservación Privada Cerro Blanco en la lucha contra el cambio climático y la compensación de sus emisiones producidas en las distintas fases de la obtención del cemento; así mismo se recomienda enfocar los esfuerzos del proyecto "Carbono Cero" en potenciar y fortalecer las prácticas de gestión forestal sostenible en esta área.

Es importante realizar estudios complementarios en estas especies como alternativas de reforestación para el proyecto “1 millón de Árboles” en zonas deforestadas o cercanas a plantas industriales, tomando en cuenta necesidades edafológicas, clima, cuidados adicionales, etc.

Realizar investigaciones completas incluyendo valoraciones de necromasa para determinar así cuál es la cantidad de carbono que es capaz de secuestrar un bosque como conjunto.

Se recomienda promover prácticas de manejo forestal sostenible que fomenten el crecimiento y la salud de las especies estudiadas, así como la diversificación de los ecosistemas forestales para aumentar su resiliencia ante los impactos del cambio climático.

Compartir los resultados de esta investigación con las autoridades locales, las comunidades vecinas y otras partes interesadas involucradas en la gestión del Área de Conservación Privada

Cerro Blanco, con el fin de informar la toma de decisiones y promover acciones efectivas para la conservación del medio ambiente.

CAPÍTULO VIII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amay, I., Velásquez, O., Vera, K. y Villalva, S. (27 de Mayo de 2021). *Diagnóstico Estratégico de Imbabura*. https://storymaps.arcgis.com/stories/be2b7b219aa74d1db030677feec63c8a

Antos, J. (2004). *Understory Plants in Temperate Forests.* Encyclopedia of Life Support Systems. http://www.eolss.net/sample-chapters/c10/e5-03-01-08.pdf

Arévalo, C. (2015). *Medición de Carbono del Estrato Arbóreo en un área del Bosque Natural Tinajillas-Limón Indanza.* Universidad Politécnica Salesiana. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8427/1/UPS-CT004932.pdf

Banqué, M. (2017). *Carbono y Cambio Climático.* Centro de Investigación Ecológica y Alicaciones Forestales. https://www.creaf.cat/sites/default/files/creaf_carbono_esp.pdf

Benavides, H. y León, G. (2007). *Información Técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático.* Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf

Bertzky, M., Ravilious, C., Kapos, V., Araujo, A. y Dickson, B. (2011). *Carbono, biodiversidad y servicios ecosistémicos: explorando los beneficios múltiples.* UNEP World Conservation Monitoring Centre. https://www.un-redd.org/document-library/ecuador-carbono-biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos-explorando-los-0

Cancino, J. (2012). *Dendrometría básica.* Universidad de Concepción. http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/407

Castells, X. (2012). *Biomasa y Bioenergía.* Ediciones Díaz de Santos. https://www.google.com.ec/books/edition/Biomasa_y_Bionerg%C3%ADa/zMxp3A1LBO8C?hl=es-419&gbpv=1&dq=biomasa+y+bioenergia+castells&printsec=frontcover

Catalán, R. (31 de Enero de 2021). *Análisis Proximales en Alimentos*. https://tecnosolucionescr.net/blog/278-analisis-proximales-en-alimentos

Crespo, C. (21 de Octubre de 2022). *Rumbo a la neutralidad climática en 2050: ¿Qué es la huella cero de carbono?*. https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/rumbo-a-la-neutralidad-climatica-en-2050-que-es-la-huella-cero-de-carbono

DW. (25 de Octubre de 2022). *Cinco países acaparan casi dos tercios de las emisiones*. https://www.dw.com/es/los-cinco-pa%C3%ADses-m%C3%A1s-contaminantes-acaparan-casi-dos-tercios-de-las-emisiones-mundiales/a-63554843

EPA. (14 de Junio de 2022). *Emisiones de dióxido de carbono*. https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono#:~:text=El%20di%C3%B3xido%20de%20carbono%20(CO,las%20actividades%20del%20ser%20humano.

FAO. (2004). *Inventario Forestal Nacional Manual de Campo.* Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. https://www.fao.org/3/ae578s/ae578s.pdf

Gallardo, J. y Merino, A. (2007). *El ciclo del carbono y la dinámica de los sistemas forestales.* Fundación Gas Natural. https://digital.csic.es/bitstream/10261/35792/1/Elpapel200743.pdf

García, R. (2017). *Almacén de carbono en plantaciones de Pinus patula y Pinus ayacahuite en San Miguel Tenextepec, Amanalco, Estado de México.* Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. https://www.researchgate.net/publication/322448012_Almacen_de_carbono_en_plantaciones_de_Pinus_patula_y_Pinus_ayacahuite_en_San_Miguel_Tenextepec_Amanalco_Estado_de_Mexico

Global Biodiversity Information Facility. (28 de Agosto de 2023). *GBIF Backbone Taxonomy*. https://www.gbif.org/es/species/7333833

Green Wise. (2022). *Aplicación al Programa Ecuador Carbono Cero (PECC).* Green Wise. https://programajuntos.pactoglobal-ecuador.org/doc/Aplicacional-Programa-Ecuador-Carbono-Cero.pdf

Greenpeace. (2018). *Así nos afecta el Cambio Climático.* Greenpeace. https://es.greenpeace.org/es/wp-content/uploads/sites/3/2018/11/GP-cambio-climatico-LR.pdf

Guerrero, E., Jiménez, L., Palacios, J. y Capa, D. (2018). *Alnus acuminata kunth: una alternativa de reforestación y fijación de dióxido de carbono.* Bosques Latitud Cero. https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/495

IPCC. (2005). *Guía de Buenas Prácticas del Uso de la Tierra.* Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/GPG_Sp.pdf

IPCC. (2014). *Cambio Climático 2014.* Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf

IPCC. (2018). *Glosario.* Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15_Glossary_spanish.pdf

IPCC. (2019). *Causas y efectos del cambio climático*. https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change

Ipinza, R. (1998). *Métodos de Selección de Árboles Plus.* Universidad Austral de Chile. https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/89052/mod_resource/content/1/Ipinza%20%C3%A1rboles%20plus.pdf

Juárez, F. (2014). *Dasometría.* Guía de Actividades Prácticas. https://www.academia.edu/35493332/DASOMETR%C3%8DA_Apuntes_de_Clase_y_Gu%C3%ADa_de_Actividades_Pr%C3%A1cticas

Kuebler, M. (7 de Noviembre de 2022). *Bioenergía con captura de CO2: ¿frenará el cambio climático?.* https://www.dw.com/es/puede-la-bioenerg%C3%ADa-con-captura-de-co2-ayudar-a-frenar-el-cambio-clim%C3%A1tico/a-63674999

La Vanguardia . (1 de Octubre de 2011). *Ecuador registra una de las tasas de deforestación más altas de Latinoamérica*. https://www.lavanguardia.com/vida/20240129/9508433/tasa-abandono-escolar-catalunya-cae-tres-puntos-situa-14.html

MAE. (2020). *Nivel de Referencia de Emisiones Forestales por Deforestación del Ecuador.* Ministerio del Ambiente. https://redd.unfccc.int/files/06.01.2020_nivel_de_referencia_de_emisiones_forestales_de_ecuador_2001-2014.pdf

Martínez, J. y Fernández, A. (2004). *Cambio climático: una visión desde México.* Universidad Nacional Autónoma de México. http://www.iies.unam.mx/wp-content/uploads/2016/03/Victor-Jaramillo-Cambio-Climatico-Una-Vision-desde-Mexico-.pdf

National Geographic. (24 de Octubre de 2022). *Cambio climático: qué es, cuáles son sus causas y qué puedes hacer para revertirlo*. https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2022/10/cambio-climatico-que-es-cuales-son-sus-causas-y-que-puedes-hacer-para-revertirlo

ONU. (2015). *Acuerdo de París.* Organización de las Naciones Unidas. https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf

Ordóñez, J., Naranjo, A., Venegas, N. y Hernández, T. (2015). *Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski:*

compilación. Madera bosques. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712015000400006

Pardos, J. (2016). *El carbono, los ecosistemas forestales y el cambio climático.* Sociedad Española de Ciencias Forestales. http://secforestales.org/sites/default/files/archivos/libropardos_definitivo_171221.pdf

Phillips, O., Baker, T., Feldpausch, T. y Brienen, R. (2016). *Manual de Campo para el Establecimiento y la Remedición de Parcelas.* Red Amazónica de Inventarios Forestales. https://forestplots.net/upload/es/recursos/RAINFOR_field_manual_ES.pdf

Puetate, G. (2017). *Translocación de Plántulas de: Weinmannia rollottii, Weinmannia fagaroides, Prunus huantensis y Ocotea infrafaveolata, en un Área Degradada en la parroquia El Carmelo, provincia del Carchi.* Universidad Técnica del Norte. http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/6722

Quinceno, N., Tangarife, M. y Álvarez, R. (2016). *Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el resguardo indígena Piapoco Chigüiro-Chátare de Barrancominas, departamento del Guainía (Colombia).* Luna Azul. https://revistas.ups.edu.ec/index.php/granja/article/view/27.2018.04

Revista Líderes. (1 de Octubre de 2017). *En Ecuador, el consumo de cemento crece a ritmo sostenido*. https://www.revistalideres.ec/lideres/ecuador-consumo-cemento-crece-ritmo.html

Robert, M. (2002). *Captura de Carbono en los Suelos para un mejor manejo de la tierra.* Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. https://www.fao.org/3/bl001s/bl001s.pdf

Rodgers, L. (17 de Diciembre de 2018). *La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías*. https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783

Rubio, A. y Calama, R. (17 de Marzo de 2023). *El papel de los bosques como sumideros de carbono*. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/papel-bosques-como-sumideros-carbono-2_16715

Russo, R. (2009). *Guía Práctica para la Medición de la Captura de Carbono en la Biomasa Forestal.* Universidad Earth. https://www.researchgate.net/publication/236593400_GUIA_PRACTICA_PARA_LA_MEDICION_DE_LA_CAPTURA_DE_CARBONO_EN_LA_BIOMASA_FORESTAL

Sardá, R. (29 de Octubre de 2021). *¿Qué es el dióxido de carbono (CO2) y cómo impacta en el planeta?*. https://www.google.com/search?q=s.a+significado&sca_esv=597555770&ei=CiagZerOIISzqtsP4rehiAQ&oq=s.a+&gs_lp=Egxnd3Mtd2l6LXNlcnAiBHMuYSAqAggAMgUQABiABDILEC4YgAQYxwEYrwEyBRAAGIAEMgUQABiABDIFEAAYgAQyBRAAGIAEMgcQABiABBgKMgUQABiABDIFEAAYgAQyCxAuGIAEGMcBGK8BSKUT

UNACEM. (2020). *Reporte de Sostenibilidad.* UNACEM. https://unacem.com.ec/wp-content/uploads/2022/08/reporte-de-sostenibilidad-2021.pdf

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. (2022). *Protocolo Herbario UPTC.* UPTC. http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/facultades/f_ciencias/pregrado/biologia/inf_adicional/unidad_apoyo/herbario/doc/protocolo_herbario_2022.pdf

WWF. (1998). *Protocolo de Kyoto.* Fondo Mundial para la Naturaleza. http://www.ceida.org/prestige/Documentacion/Protocolo%20Kioto.pdf

WWF-UK. (2021). *Sintiendo el Calor: El destino de la naturaleza más allá de los 1,5 °C de calentamiento global.* Fondo Mundial para la Naturaleza. https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/sintiendo_el_calor_el_destino_de_la_naturaleza_mas_alla_de_los_1_5c_de_calentamien.pdf

ANEXOS

Anexo 1. Área de Conservación Privada Cerro Blanco



Figura 1: Visita inicial a la zona

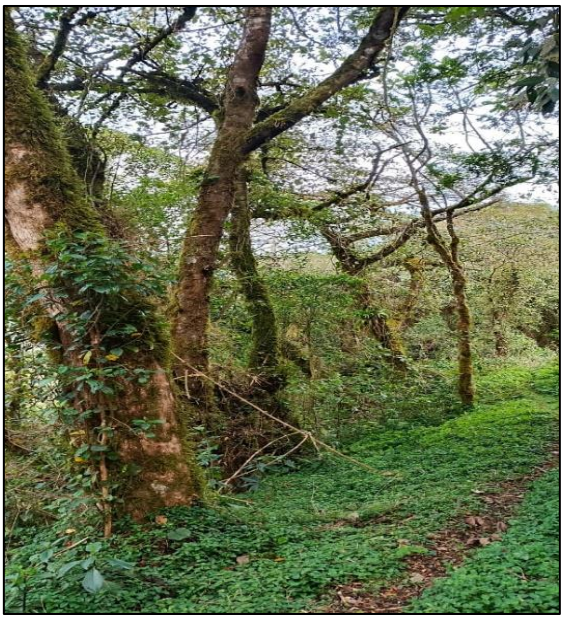


Figura 2: Identificación del sitio de muestreo



Figura 3: Especies vegetales presentes en la zona



Figura 4: Georreferenciación de los puntos de muestreo

Anexo 2. Ficha para levantamiento de campo

FICHA PARA LEVANTAMIENTO VEGETAL										
								Coordenadas		
Zona	*Parcela*	*Nº Individuo*	*Nombre Científico*	*DAP*	*D. Horizontal*	*Ángulo de inc.*	*Altura Fuste*	*x*	*y*	*Altura*

Anexo 3. Resultados mediciones en campo

N° de árbol	Especie	Altura (m)	CAP (cm)	DAP (m)	Área Basal (m2)	Volumen (m3)	Biomasa sobre el suelo (tMS)	Biomasa total (tMS)	Cantidad de CO2 secuestrado (t)
1	*Weinmannia fagaroides*	6.13	22.00	0.070	0.004	0.0117	0.00586	0.00761	0.01397
2	*Weinmannia fagaroides*	5.27	28.00	0.089	0.006	0.0163	0.00816	0.01061	0.01947
3	*Weinmannia fagaroides*	8.99	34.60	0.110	0.010	0.0425	0.02124	0.02761	0.05067
4	*Weinmannia fagaroides*	11.17	38.80	0.124	0.012	0.0664	0.03318	0.04314	0.07916
5	*Weinmannia fagaroides*	9.98	56.50	0.180	0.025	0.1257	0.06287	0.08173	0.14998
6	*Weinmannia fagaroides*	15.24	48.90	0.156	0.019	0.1438	0.07191	0.09349	0.17155
7	*Weinmannia fagaroides*	8.75	26.00	0.083	0.005	0.0233	0.01167	0.01517	0.02784
8	*Weinmannia fagaroides*	12.45	35.00	0.111	0.010	0.0602	0.03010	0.03913	0.07180
9	*Weinmannia fagaroides*	10.11	28.80	0.092	0.007	0.0331	0.01654	0.02151	0.03947
10	*Weinmannia fagaroides*	13.68	28.80	0.092	0.007	0.0448	0.02240	0.02912	0.05343
11	*Weinmannia fagaroides*	10.67	42.00	0.134	0.014	0.0743	0.03716	0.04831	0.08865
12	*Weinmannia fagaroides*	11.43	52.00	0.166	0.022	0.1219	0.06097	0.07926	0.14544
13	*Weinmannia fagaroides*	19.48	69.60	0.222	0.039	0.3724	0.18621	0.24207	0.44420
14	*Weinmannia fagaroides*	12.04	38.00	0.121	0.011	0.0686	0.03432	0.04461	0.08186
15	*Weinmannia fagaroides*	13.29	60.00	0.191	0.029	0.1889	0.09444	0.12277	0.22528
16	*Weinmannia fagaroides*	17.97	55.80	0.178	0.025	0.2208	0.11041	0.14354	0.26339
17	*Weinmannia fagaroides*	12.30	38.70	0.123	0.012	0.0727	0.03635	0.04726	0.08672
18	*Weinmannia fagaroides*	11.16	56.80	0.181	0.026	0.1421	0.07103	0.09234	0.16945
19	*Weinmannia fagaroides*	9.33	53.90	0.172	0.023	0.1069	0.05347	0.06952	0.12756
20	*Weinmannia fagaroides*	11.55	54.00	0.172	0.023	0.1330	0.06649	0.08644	0.15862

21	*Weinmannia fagaroides*	11.28	35.80	0.114	0.010	0.0571	0.02854	0.03710	0.06808
22	*Weinmannia fagaroides*	9.99	33.90	0.108	0.009	0.0453	0.02267	0.02946	0.05407
23	*Weinmannia fagaroides*	9.49	65.10	0.207	0.034	0.1588	0.07938	0.10320	0.18937
24	*Weinmannia fagaroides*	13.34	39.00	0.124	0.012	0.0801	0.04004	0.05205	0.09552
25	*Weinmannia fagaroides*	10.96	58.60	0.187	0.027	0.1485	0.07424	0.09652	0.17711
26	*Weinmannia fagaroides*	7.49	27.00	0.086	0.006	0.0215	0.01077	0.01400	0.02569
27	*Weinmannia fagaroides*	11.71	26.60	0.085	0.006	0.0327	0.01636	0.02126	0.03902
28	*Weinmannia fagaroides*	10.80	38.87	0.124	0.012	0.0644	0.03220	0.04186	0.07681
29	*Weinmannia fagaroides*	14.61	50.00	0.159	0.020	0.1441	0.07206	0.09368	0.17191
30	*Weinmannia fagaroides*	15.07	20.60	0.066	0.003	0.0252	0.01262	0.01640	0.03010
31	*Weinmannia fagaroides*	12.20	35.90	0.114	0.010	0.0621	0.03103	0.04034	0.07402
32	*Weinmannia fagaroides*	9.65	37.00	0.118	0.011	0.0521	0.02606	0.03388	0.06216
33	*Weinmannia fagaroides*	7.61	49.00	0.156	0.019	0.0721	0.03607	0.04689	0.08604
34	*Weinmannia fagaroides*	9.47	51.00	0.162	0.021	0.0972	0.04862	0.06321	0.11599
35	*Weinmannia fagaroides*	10.60	51.00	0.162	0.021	0.1089	0.05443	0.07075	0.12983
36	*Weinmannia fagaroides*	8.61	68.60	0.218	0.037	0.1599	0.07996	0.10395	0.19075
37	*Weinmannia fagaroides*	15.19	80.60	0.257	0.052	0.3895	0.19473	0.25315	0.46453
38	*Weinmannia fagaroides*	19.54	66.00	0.210	0.035	0.3359	0.16796	0.21835	0.40068
39	*Weinmannia fagaroides*	19.18	30.60	0.097	0.007	0.0709	0.03544	0.04608	0.08455
40	*Weinmannia fagaroides*	25.67	33.00	0.105	0.009	0.1103	0.05517	0.07172	0.13160
41	*Weinmannia fagaroides*	30.58	28.50	0.091	0.006	0.0980	0.04902	0.06373	0.11694

N° de árbol	Especie	Altura (m)	CAP (cm)	DAP (m)	Área Basal (m2)	Volumen (m3)	Biomasa sobre el suelo (tMS)	Biomasa total (tMS)	Cantidad de CO2 secuestrado (t)
1	*Weinmannia fagaroides*	16.55	39.00	0.124	0.012	0.0994	0.04969	0.06460	0.11854
2	*Weinmannia fagaroides*	14.92	30.00	0.095	0.007	0.0530	0.02649	0.03444	0.06320
3	*Weinmannia fagaroides*	16.61	32.00	0.102	0.008	0.0671	0.03356	0.04363	0.08007
4	*Weinmannia fagaroides*	18.08	31.00	0.099	0.008	0.0686	0.03429	0.04458	0.08180
5	*Weinmannia fagaroides*	11.31	80.00	0.255	0.051	0.2857	0.14286	0.18572	0.34079
6	*Weinmannia fagaroides*	13.14	27.80	0.088	0.006	0.0401	0.02004	0.02605	0.04780
7	*Weinmannia fagaroides*	15.58	31.45	0.100	0.008	0.0608	0.03042	0.03954	0.07256
8	*Weinmannia fagaroides*	8.62	23.00	0.073	0.004	0.0180	0.00900	0.01170	0.02147
9	*Weinmannia fagaroides*	10.79	26.40	0.084	0.006	0.0297	0.01484	0.01929	0.03540
10	*Weinmannia fagaroides*	6.59	62.70	0.200	0.031	0.1022	0.05110	0.06643	0.12190
11	*Weinmannia fagaroides*	17.44	58.80	0.187	0.028	0.2380	0.11898	0.15467	0.28382
12	*Weinmannia fagaroides*	12.38	36.00	0.115	0.010	0.0633	0.03165	0.04115	0.07551
13	*Weinmannia fagaroides*	13.53	23.00	0.073	0.004	0.0283	0.01413	0.01837	0.03371
14	*Weinmannia fagaroides*	12.77	36.00	0.115	0.010	0.0653	0.03266	0.04245	0.07790
15	*Weinmannia fagaroides*	24.51	37.50	0.119	0.011	0.1360	0.06801	0.08841	0.16224
16	*Weinmannia fagaroides*	8.67	48.60	0.155	0.019	0.0808	0.04040	0.05252	0.09638
17	*Weinmannia fagaroides*	7.70	31.00	0.099	0.008	0.0292	0.01461	0.01900	0.03486
18	*Weinmannia fagaroides*	9.59	34.00	0.108	0.009	0.0438	0.02188	0.02845	0.05220
19	*Weinmannia fagaroides*	7.46	21.00	0.067	0.004	0.0130	0.00649	0.00844	0.01549
20	*Weinmannia fagaroides*	5.88	24.20	0.077	0.005	0.0136	0.00679	0.00883	0.01620
21	*Weinmannia fagaroides*	10.47	45.00	0.143	0.016	0.0837	0.04183	0.05438	0.09978
22	*Weinmannia fagaroides*	9.23	49.00	0.156	0.019	0.0875	0.04375	0.05688	0.10437

23	*Weinmannia fagaroides*	10.78	32.00	0.102	0.008	0.0436	0.02179	0.02833	0.05198
24	*Weinmannia fagaroides*	10.23	37.00	0.118	0.011	0.0553	0.02765	0.03594	0.06596
25	*Weinmannia fagaroides*	18.59	33.00	0.105	0.009	0.0799	0.03996	0.05194	0.09531
26	*Weinmannia fagaroides*	9.84	31.40	0.100	0.008	0.0383	0.01915	0.02489	0.04568
27	*Weinmannia fagaroides*	8.17	28.20	0.090	0.006	0.0257	0.01283	0.01668	0.03060
28	*Weinmannia fagaroides*	14.44	49.00	0.156	0.019	0.1368	0.06842	0.08894	0.16321
29	*Weinmannia fagaroides*	8.41	20.60	0.066	0.003	0.0141	0.00704	0.00915	0.01679
30	*Weinmannia fagaroides*	13.76	36.70	0.117	0.011	0.0731	0.03657	0.04754	0.08724
31	*Weinmannia fagaroides*	10.38	28.00	0.089	0.006	0.0321	0.01606	0.02087	0.03830
32	*Weinmannia fagaroides*	8.59	39.33	0.125	0.012	0.0525	0.02623	0.03410	0.06257
33	*Weinmannia fagaroides*	12.94	32.53	0.104	0.008	0.0541	0.02703	0.03514	0.06448
34	*Weinmannia fagaroides*	9.81	42.87	0.136	0.015	0.0712	0.03559	0.04627	0.08491
35	*Weinmannia fagaroides*	10.88	24.00	0.076	0.005	0.0247	0.01237	0.01608	0.02951

N° de árbol	**Especie**	**Altura (m)**	**CAP (cm)**	**DAP (m)**	**Área Basal (m2)**	**Volumen (m3)**	**Biomasa sobre el suelo (tMS)**	**Biomasa total (tMS)**	**Cantidad de CO2 secuestrado (t)**
1	*Alnus acuminata*	17.40	46.60	0.148	0.017	0.1491	0.07455	0.09692	0.17784
2	*Alnus acuminata*	11.35	24.40	0.078	0.005	0.0267	0.01334	0.01734	0.03182
3	*Alnus acuminata*	16.18	58.40	0.186	0.027	0.2179	0.10893	0.14161	0.25986
4	*Alnus acuminata*	10.88	77.80	0.248	0.048	0.2600	0.12998	0.16898	0.31007
5	*Alnus acuminata*	6.78	55.50	0.177	0.025	0.0825	0.04123	0.05360	0.09836
6	*Alnus acuminata*	4.95	36.00	0.115	0.010	0.0253	0.01267	0.01647	0.03022

7	*Alnus acuminata*	7.10	58.80	0.187	0.028	0.0969	0.04847	0.06301	0.11562
8	*Alnus acuminata*	8.14	64.50	0.205	0.033	0.1337	0.06685	0.08691	0.15948
9	*Alnus acuminata*	14.03	75.00	0.239	0.045	0.3116	0.15580	0.20253	0.37165
10	*Alnus acuminata*	14.90	61.95	0.197	0.031	0.2257	0.11284	0.14669	0.26917
11	*Alnus acuminata*	19.54	92.00	0.293	0.067	0.6529	0.32646	0.42440	0.77877
12	*Alnus acuminata*	24.21	79.00	0.251	0.050	0.5964	0.29822	0.38768	0.71139

N° de árbol	**Especie**	**Altura (m)**	**CAP (cm)**	**DAP (m)**	**Área Basal (m2)**	**Volumen (m3)**	**Biomasa sobre el suelo (tMS)**	**Biomasa total (tMS)**	**Cantidad de CO2 secuestrado (t)**
1	*Alnus acuminata*	12.42	82.00	0.261	0.054	0.3297	0.16487	0.21433	0.39330
2	*Alnus acuminata*	10.75	48.00	0.153	0.018	0.0978	0.04889	0.06356	0.11664
3	*Alnus acuminata*	9.59	49.50	0.158	0.019	0.0928	0.04640	0.06031	0.11068
4	*Alnus acuminata*	7.22	49.64	0.158	0.020	0.0702	0.03512	0.04566	0.08379
5	*Alnus acuminata*	10.79	66.33	0.211	0.035	0.1875	0.09373	0.12185	0.22359
6	*Alnus acuminata*	11.86	65.00	0.207	0.034	0.1978	0.09889	0.12856	0.23591
7	*Alnus acuminata*	8.61	40.00	0.127	0.013	0.0544	0.02718	0.03533	0.06483
8	*Alnus acuminata*	8.01	51.53	0.164	0.021	0.0839	0.04196	0.05455	0.10010
9	*Alnus acuminata*	8.83	37.20	0.118	0.011	0.0482	0.02412	0.03136	0.05754
10	*Alnus acuminata*	15.33	77.80	0.248	0.048	0.3662	0.18311	0.23805	0.43682

11	*Alnus acuminata*	10.45	60.00	0.191	0.029	0.1485	0.07426	0.09654	0.17715
12	*Alnus acuminata*	11.02	109.00	0.347	0.095	0.5167	0.25833	0.33583	0.61625
13	*Alnus acuminata*	12.71	70.00	0.223	0.039	0.2459	0.12293	0.15981	0.29324
14	*Alnus acuminata*	13.08	61.53	0.196	0.030	0.1955	0.09773	0.12705	0.23315

Anexo 4. Mediciones de campo



Figura 5: Establecimiento de parcelas



Figura 6: Medición del CAP de los árboles



Figura 7: Medición de la altura de las especies



Figura 8: Colecta de las muestras vegetales

Anexo 5. Datos fase experimental

N° árbol plus (*Weinmannia fagaroides*)	Cr + Mf (g)	Cr + ce (g)	Cr (g)	Peso muestra (g)	% ceniza	CO2 (g)
5 (hojas)	49.3376	41.2069	39.3333	10.0043	18.73	29.840
5 (ramas)	47.6828	39.2933	37.682	10.0008	16.11	30.789
5 (h+r)	48.0943	39.842	38.089	10.0053	17.52	30.286
6	31.4304	23.6114	21.426	10.0044	21.84	28.696
12	34.9283	26.5415	24.9247	10.0036	16.16	30.780
13	48.3558	39.5256	38.3487	10.0071	11.76	32.407
15	32.2064	23.7402	22.2037	10.0027	15.36	31.071
16	34.0063	25.9511	23.9969	10.0094	19.52	29.563
18	48.0846	40.0606	38.0835	10.0011	19.77	29.448
19	50.7847	42.8545	40.7776	10.0071	20.75	29.104
20	49.341	41.8647	39.3317	10.0093	25.31	27.438
23	33.6932	26.091	23.6874	10.0058	24.02	27.900
25	48.3483	39.8326	38.3479	10.0004	14.85	31.253
29	50.1125	41.5038	40.1052	10.0073	13.98	31.594
33	45.3302	36.7323	35.3237	10.0065	14.08	31.554
34	49.9122	41.2779	39.9054	10.0068	13.72	31.688
35	46.8667	38.2047	36.8622	10.0045	13.42	31.790
36	46.0663	38.8008	36.063	10.0033	27.37	26.664
37	43.5836	36.3182	33.5806	10.003	27.37	26.664
38	32.1021	23.9927	22.1009	10.0012	18.92	29.761

N° árbol plus (*Weinmannia fagaroides*)	Cr + Mf (g)	Cr + ce (g)	Cr (g)	Peso muestra (g)	% ceniza	CO2 (g)
1	29.8063	22.0559	19.805	10.0013	22.51	28.444
5	31.4347	23.8649	21.4259	10.0088	24.37	27.781
10	33.9828	25.9274	23.9812	10.0016	19.46	29.563
11	49.7694	41.1034	39.7649	10.0045	13.38	31.804
15	50.7834	42.1598	40.7789	10.0045	13.80	31.649
16	46.6335	37.8161	36.6292	10.0043	11.86	32.360
21	47.689	38.9982	37.6835	10.0055	13.14	31.895
22	46.8644	38.2209	36.8642	10.0002	13.57	31.722

24	34.9324	26.9438	24.9251	10.0073	20.17	29.318
28	49.3369	41.3462	39.3332	10.0037	20.12	29.326
30	48.0859	40.1027	38.0837	10.0022	20.19	29.298
32	50.1099	42.106	40.106	10.0039	19.99	29.374
34	46.8625	38.7319	36.8619	10.0006	18.70	29.839

N° árbol plus (*Alnus acuminata*)	**Cr + Mf (g)**	**Cr + ce (g)**	**Cr (g)**	**Peso muestra (g)**	**% ceniza**	**CO2 (g)**
1 (hojas)	46.6336	38.275	36.6289	10.0047	16.45	30.676
1 (ramas)	50.7777	42.0942	40.7772	10.0005	13.17	31.868
1 (h+r)	49.7695	41.29	39.7641	10.0054	15.25	31.120
3	29.8128	21.5694	19.805	10.0078	17.63	30.253
4	49.9163	41.1126	39.9124	10.0039	12.00	32.310
8	45.328	36.5486	35.3229	10.0051	12.25	32.220
9	50.1076	41.2609	40.1054	10.0022	11.55	32.467
10	46.0664	38.5297	36.0632	10.0032	24.66	27.660
11	46.8724	37.9552	36.8631	10.0093	10.91	32.726
12	43.5892	35.9605	33.5832	10.0006	23.76	27.997

N° árbol plus (*Alnus acuminata*)	**Cr + Mf (g)**	**Cr + ce (g)**	**Cr (g)**	**Peso muestra (g)**	**% ceniza**	**CO2 (g)**
1	46.6348	38.4278	36.6279	10.0069	17.99	30.120
5	47.689	39.556	37.6829	10.0061	18.72	29.848
6	49.7641	41.6014	39.7635	10.0006	18.38	29.957
10	48.3516	39.2693	38.3498	10.0018	9.19	33.332
12	46.0675	37.3887	36.0638	10.0037	13.24	31.851
13	46.8652	38.0211	36.8633	10.0019	11.58	32.458
14	49.9128	40.9238	39.9126	10.0002	10.11	32.990

Anexo 6. Mediciones en Laboratorio



Figura 9: Pesaje de las hojas



Figura 10: Deshidratación de las muestras



Figura 11: Colocación de las muestras en el horno mufla



Figura 12: Muestras luego de ser calcinadas