



UNL

Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad Agropecuaria y Recursos Naturales Renovables

Carrera de Ingeniería Forestal

Estimación de los contenidos de carbono en un área de restauración pasiva de bosque montano de la reserva "El Cristal" cantón y provincia de Loja

Trabajo de Integración Curricular,
previo a la obtención del título de
Ingeniero Forestal

AUTOR:

Jorge Luis Chavez Campos

DIRECTOR:

Ing. Paúl Alexander Eguiguren Velepucha, PhD.

Loja – Ecuador

2024

Certificación



UNL

Universidad
Nacional
de Loja

Sistema de Información Académico
Administrativo y Financiero - SIAAF

CERTIFICADO DE CULMINACIÓN Y APROBACIÓN DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, **Eguiguren Velepucha Paul Alexander**, director del Trabajo de Integración Curricular denominado **Estimación de los contenidos de carbono en un área de restauración pasiva de bosque montano de la reserva "El Cristal" cantón y provincia de Loja**, perteneciente al estudiante **JORGE LUIS CHAVEZ CAMPOS**, con cédula de identidad N° **1150207924**.

Certifico:

Que luego de haber dirigido el **Trabajo de Integración Curricular**, habiendo realizado una revisión exhaustiva para prevenir y eliminar cualquier forma de plagio, garantizando la debida honestidad académica, se encuentra concluido, aprobado y está en condiciones para ser presentado ante las instancias correspondientes.

Es lo que puedo certificar en honor a la verdad, a fin de que, de así considerarlo pertinente, el/la señor/a docente de la asignatura de **Integración Curricular**, proceda al registro del mismo en el Sistema de Gestión Académico como parte de los requisitos de acreditación de la Unidad de Integración Curricular del mencionado estudiante.

Loja, 5 de Marzo de 2024



Firmado digitalmente por:
PAUL ALEXANDER
EGUIGUREN VELEPUCHA

F) _____
DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR



Certificado TIC/TT.: UNL-2024-000865

1/1
Educamos para Transformar

Autoría

Yo, **Jorge Luis Chavez Campos**, declaro ser autor del presente Trabajo de Integración Curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi Trabajo de Integración Curricular en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.



Firma:

Cédula de identidad: 1150207924

Fecha: 06 de septiembre del 2024

Correo electrónico: jorge.l.chavez@unl.edu.ec

Teléfono: 0989212682

Carta de autorización por parte del autor para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Integración Curricular.

Yo, **Jorge Luis Chavez Campos** declaro ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Estimación de los contenidos de carbono en un área de restauración pasiva de bosque montano de la reserva "El Cristal" cantón y provincia de Loja**, como requisito para optar el título de **Ingeniero Forestal**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Integración Curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los seis días del mes de septiembre del año dos mil veinticuatro.



Firma:

Autor: Jorge Luis Chavez Campos

Cédula: 1150207924

Dirección: Borja, Loja

Correo electrónico: Jorge.l.chavez@unl.edu.ec

Teléfono: 0989212682

DATOS COMPLEMENTARIOS :

Director del Trabajo de Integración Curricular:

Ing. Paúl Alexander Eguiguren Velepucha, PhD.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis seres más querido a mi madre: Julia María Campos y padre: Gonzalo Chavez, por su apoyo constante, consejos y sacrificios que hicieron posible el inicio y fin de esta etapa académica. De igual estoy eternamente agradecido por inculcarme buenos valores y responsabilidades desde temprana edad, ya que experimente desde primera persona el valor de las cosas.

A mis hermanos y sobrinos, que con su aprecio, cariño y buenas vibras, me motivaron a seguir adelante, de esta manera convirtiéndose en el motor de mi vida.

A mis amigos más cercanos: Yuley, Kellyn y Anderson que me enseñaron el significado de amistad y lealtad, que a pesar de las adversidades estuvieron siempre ahí.

Finalmente, a todas aquellas personas que de alguna manera me inspiraron en esta etapa académica, ya sea por medio de sus historias de vida o consejos. Este logro se los dedico a cada uno de ustedes.

Jorge Luis Chavez Campos

Agradecimiento.

Agradezco infinitamente a mis padres por inculcarme buenos valores y llevarme por el camino del bien, estoy eternamente agradecido con Dios, por darme vida, salud, sabiduría y fortaleza en el proceso de mi formación académica.

Con mayor énfasis quiero expresar mi gratitud a mi madre, ya que ha sido y será el pilar de mis logros alcanzados. A mi padre, por enseñarme desde niño el valor de las cosas por medio del trabajo y sacrificio.

De igual manera agradezco a mi Director de Trabajo de Integración Curricular, Ing. Paúl Alexander Eguiguren Velepucha Mg. Sc, y a su compañero el Ing. Darío Alfredo Veintimilla Ramos, por su orientación y comentarios constructivos que fueron la base para la elaboración de mi trabajo de titulación.

Finalmente, Agradezco al Dr. Gustavo Samaniego propietario de la Reserva “El Cristal” por proporcionar los recursos y el entorno propicio para llevar a cabo esta investigación.

Jorge Luis Chavez Campos

Índice de contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas	x
Índice de figuras	xi
Índice de anexos	xiii
1. Título	1
2. Resumen	2
Abstract	3
3. Introducción	4
4. Marco teórico	6
4.1. Los bosques montanos del Ecuador.....	6
4.2. Estándares de la Sociedad de Restauración Ecológica (SER).....	7
4.2.1. <i>Principios de los estándares de la Sociedad de Restauración Ecológica</i>	7
4.3. Restauración ecológica	7
4.3.1. <i>Tipos de restauración ecológica</i>	7
4.4.1. <i>La restauración ecológica para la mitigación del cambio climático</i>	9
4.4.2. <i>Cambio climático y sus impactos en los bosques</i>	10
4.5. El ciclo de carbono	11
4.6. Compartimientos del contenido de carbono	11
4.6.1. Biomasa	11
4.6.2. <i>Carbono en la biomasa aérea</i>	11
4.6.3. <i>Carbono en la necromasa</i>	12

4.7.	Métodos para el inventario de carbono	12
4.8.	Métodos de estimación de carbono en biomasa aérea	13
4.8.1.	<i>Métodos indirectos o no destructivos</i>	13
4.8.2.	<i>Método directo o destructivo</i>	13
4.9.	Métodos de estimación de carbono en necromasa.....	14
4.10.	Estudios similares al almacenamiento de carbono en bosques montanos	14
5.	Metodología	16
5.1.	Área de estudio	16
5.2.	Metodología para la evaluación del contenido de carbono de la biomasa aérea de un área de restauración pasiva del bosque montano de la reserva “El Cristal”	17
5.1.1.	<i>Estimación de los contenidos de carbono en la biomasa</i>	17
5.2.	Metodología para la estimación del contenido de carbono de necromasa de un área de restauración pasiva del bosque montano de la reserva “El Cristal”	18
5.2.1.	<i>Hojarasca</i>	18
5.2.2.	<i>Árboles muertos en pie</i>	18
5.2.3.	<i>Madera muerta caída</i>	19
6.	Resultados	21
6.1.	Evaluación del contenido de carbono de la biomasa aérea de un área de restauración pasiva del bosque montano de la reserva “El Cristal”	23
6.2.	Estimación de carbono por clase diamétricas de un área de restauración pasiva del bosque montano de la reserva “El Cristal”.....	24
6.3.	Estimación del contenido de carbono de necromasa de un área de restauración pasiva del bosque montano de la reserva “El Cristal”	26
7.	Discusión	29
7.1.	Carbono almacenado en biomasa aérea y necromasa en un área de restauración pasiva del bosque montano de la reserva “El Cristal”	29
7.2.	Carbón almacenado en la necromasa	31
7.2.1.	<i>Carbono almacenado en hojarasca</i>	32
7.2.2.	<i>Carbono almacenado en árboles muertos en pie</i>	33
7.2.3.	<i>Carbono almacenado en madera muerta caída</i>	33

8.	Conclusiones	34
9.	Recomendaciones	35
10.	Bibliografía	36
11.	Anexos	47

Índice de tablas:

Tabla 1. Cuadro resumen de la cantidad promedio de carbono almacenado (tC/ha) por cada componente muestreado en un área de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”..... 21

Índice de figuras:

Figura 1. Ubicación de las parcelas de estudio en el bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.....	16
Figura 2. Porcentaje de carbono almacenado por cada componente (biomasa aérea y necromasa) en un área de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.	21
Figura 3. Total de carbono almacenado por parcelas de diferentes años de restauración pasiva (biomasa aérea y necromasa) del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.....	22
Figura 4. Cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea por parcelas de diferentes años de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.....	23
Figura 5. A. Cantidad de individuos. B. carbono almacenado por clase diamétricas en 4 parcelas muestreadas en un área de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.....	24
Figura 6. Familias botánicas que almacenan mayor cantidad de carbono en un área de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”	25
Figura 7. Especies botánicas que almacenan mayor contenido de carbono en un área de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.	25
Figura 8. Porcentaje de carbono almacenado en cada uno de los componentes correspondientes a necromasa de las áreas de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.....	26
Figura 9. Promedio de carbono almacenado y porcentaje en cada uno de los componentes correspondientes a necromasa de las áreas de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”	26

Figura 10. Cantidad de carbono almacenado en hojarasca de parcelas de diferentes años de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.	27
Figura 11. Carbono almacenado de árboles muertos en pie en parcelas con diferentes años de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.	27
Figura 12. Carbono almacenado en la madera muerta caída en parcelas con diferentes años de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.	28

Índice de anexos:

Anexo 1. Hoja de campo para recolección de datos de individuos arbóreos.	47
Anexo 2. Carbono almacenado por familia botánica en biomasa aérea en un área de restauración pasiva bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.	47
Anexo 3. Carbono almacenado por especie botánica en biomasa aérea en un área de restauración pasiva bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.	49
Anexo 4. Certificado de traducción del resumen	52

1. Título

Estimación de los contenidos de carbono en un área de restauración pasiva de bosque montano de la reserva "El Cristal" cantón y provincia de Loja

2. Resumen

Los bosques montanos poseen una gran biodiversidad de flora y fauna, pese a su importancia biológica son afectados por la deforestación e incendios forestales, en donde el principal conductor es el cambio y uso del suelo con fines agropecuarios. El resultado de este origina la formación de bosques secundarios, los mismos que forman parte de los procesos de restauración ecológicos influenciando en la recuperación de los servicios ecosistémicos como el almacenamiento de carbono. Bajo este contexto el presente estudio tiene como objetivo estimar los contenidos de carbono en la biomasa aérea y necromasa en áreas de restauración pasiva de bosque montano de la reserva “El Cristal”. Para evaluar el carbono almacenado en la biomasa aérea se establecieron cuatro parcelas permanentes de 50 × 50 m, dividida en 4 subparcelas de 25 × 25 m; a partir del (DAP \geq 5 cm) a 1,30 cm, altura total (Ht) y la densidad de la madera obtenida de la base de datos del *Wood Density Database*. Para estimar la biomasa aérea se usó la ecuación de Chave et al, (2014), para el cálculo de carbono se multiplicó la biomasa por el factor de conversión 0,47. Para estimar el carbono almacenado en la necromasa se clasifico en tres subcomponentes: hojarasca, árboles muertos en pie y madera muerta caída. Para la hojarasca se instalaron subparcelas de 1 × 1 m, se pesó todo el material muerto dentro de la subparcela, se recolecto 300 g para estimar el contenido de carbono. Para la madera muerta gruesa se estimó el carbono a partir de los árboles muertos en pie \geq 10 cm DAP y madera muerta caída con diámetros \geq 10 cm en cada una de las subparcelas de 25 × 25 m. Los resultados obtenidos del presente estudio nos da a conocer que el área de restauración pasiva captura en promedio 40,00 tC/ha, donde el 78 % pertenece a la biomasa aérea (31,30 tC/ha) y 22 % necromasa (8,68 tC/ha). Las especies que presentan mayor contenido de carbono son: *Alnus acuminta* y *Myrsine sodiroana*. En conclusión, el área de restauración pasiva almacena un 41,43 % (40,00 tC/ha) del contenido de carbono en relación al bosque siempreverde andino montano (96,53 tC/ha), lo que demuestra que la estrategia de restauración pasiva es primordial para la recuperación de los servicios ecosistémicos a largo plazo en especial para los contenidos carbono a nivel de paisaje.

Palabras claves: Dióxido de carbono, sumideros de carbono, regeneración natural y estrategias de restauración.

Abstract

The montane forests have a great biodiversity of flora and fauna, despite their biological importance they are affected by deforestation and forest fires, where the main driver is the change and use of soil for agricultural purposes. The result of this originates the formation of secondary forests, which are part of the ecological restoration procedures, influencing the recovery of ecosystem services such as carbon storage. In this context, the present study aims to estimate the carbon content in the aerial biomass and necromass in passive restoration areas of montane forest in the “El Cristal” reserve. To assess the carbon stored in the aboveground biomass, four permanent plots of 50 × 50 m were established, divided into 4 subplots of 25 × 25 m; based on (DBH >5 cm) at 1.30 cm, total height (Ht) and wood density obtained from the *Wood Density Database*. To estimate aboveground biomass the equation of Chave et al, (2014) was used, for carbon calculation the biomass was multiplied by the conversion factor 0.47. To estimate the carbon stored in the necromass, it was classified into three subcomponents: litter, standing dead trees and fallen dead wood. For leaf litter, 1 × 1 m subplots were installed, all dead material within the subplot was weighed, and 300 g were collected to estimate the carbon content. For coarse dead wood, carbon was estimated from standing dead trees > 10 cm DBH and fallen dead wood with diameters > 10 cm in each of the 25 × 25 m subplots. The results obtained from this study show that the passive restoration area captures an average of 40.00 tC/ha, where 78% belongs to aerial biomass (31.30 tC/ha) and 22% to necromass (8.68 tC/ha). The species with the highest carbon content are: *Alnus acuminta* and *Myrsine sodiroana*. As a conclusion, the passive restoration area stores 41.43 % (40.00 tC/ha) of carbon content in relation to the montane Andean evergreen forest (96.53 tC/ha), which proves that the passive restoration strategy is primordial for the long-term recovery of ecosystem services, particularly for carbon content at the landscape level.

Key words: Carbon dioxide, carbon sinks, natural regeneration and restoration strategies.

3. Introducción

El bosque montano posee ecosistemas frágiles que presentan un alto nivel de biodiversidad tanto de flora como de fauna, en su mayoría endémica, dentro de este ecosistema se han identificado 9 865 especies de plantas vasculares en el territorio Ecuatoriano (Ministerio del Ambiente del Ecuador y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura [MAE y FAO], 2015), por lo tanto, son reconocidos como un *hotspot* de biodiversidad (Tejedor et al., 2012; Marchese, 2015). Sin embargo, esta excepcional diversidad es amenazada por actividades antrópicas relacionados a los incendios forestales, la deforestación en donde el principal conductor es el cambio y uso del suelo con fines agropecuarios tales como agricultura y ganadería, dando como resultado la disminución de la superficie del bosque montano, de esta manera afectando a los servicios ecosistémicos y los contenidos de carbono (Bussmann, 2005).

En el Ecuador el bosque montano ocupa una superficie aproximada de 2 983 673 ha y la tasa de deforestación es de 0,43 % (13 000 ha/año) (MAE y FAO, 2015). Durante el periodo del 2014 – 2016 se registraron elevadas tasas de deforestación para las provincias de Cotopaxi con 3 688 ha, El Oro con 3 905 ha y Loja con 3 459 ha (Ministerio del Ambiente del Ecuador [MAE], 2018), afectando a los servicios ecosistémicos como: regulación hídrica, protección de suelos y principalmente la relación climática mediante el secuestro y el almacenamiento de carbono (CO₂) (Baiker, 2023).

Los bosques primarios y secundarios como sumideros de carbono almacenan tanto en la vegetación como en el suelo grandes cantidades de carbono mediante el proceso de la fotosíntesis (Ortiz, 1997). Aproximadamente, el 90 % de la biomasa acumulada se encuentra en los bosques en forma de fustes, ramas, hojas, raíces y materia orgánica, por otra parte, el CO₂ participa en la composición de la estructura del árbol (Rodríguez et al., 2006).

Los bosques secundarios son el resultado de la sucesión ecológica en diferentes estadios, cuyo grado de recuperación depende de la intensidad de la perturbación, el tipo de uso anterior, tiempo de abandono después de la perturbación y la proximidad de fuentes semilleras (Toledo y Cisneros, 1999). Sin embargo, son eficientes en la mitigación del cambio climático a través de la tasa de fijación de carbono superior en comparación a los bosques primarios (Guariguata y Ostertag, 2001).

Por esta razón, se adoptan estrategias de restauración ecológica entre ellas la restauración pasiva en áreas degradadas, ya que permite que el ecosistema por su propia cuenta a través de la regeneración natural, recupere a mediano y largo plazo la estructura, composición, funcionalidad del ecosistema como el almacenamiento de carbono (Mola et al., 2015; Rojas y

Toribio, 2021). Así, la restauración de ecosistemas es considerada como una medida de mitigación efectiva, debido a que podría eliminar entre 13 a 26 gigatoneladas de dióxido de carbono de la atmósfera para el año del 2030 en una superficie de 350 millones de hectáreas degradadas (Organización de Naciones Unidas [ONU], 2019). Sin embargo, a finales del 2022 el incremento del CO₂ provocados solamente por quema de combustibles fósiles fue de 36,8 gigatoneladas y 321 millones de toneladas en conflictos armados (Caray, 2023). A pesar del incremento del CO₂ Griscom et al. (2017) manifiesta que a través de la restauración se podría eliminar 400 gigatoneladas de carbono para el 2100.

En este contexto, la estimación de los contenidos de carbono en áreas de restauración pasiva en el bosque montano permite valorar los servicios ecosistémicos como sumideros de carbono frente a un escenario del cambio climático. Para ello se planteó la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el contenido de carbono presente en la biomasa área y necromasa en un área restauración pasiva de bosque montano de la reserva “El Cristal”? y por tanto, se establecieron los siguientes objetivos:

Objetivo general

Contribuir con información científica sobre la estimación del contenido de carbono en biomasa aérea y necromasa en un área de restauración pasiva de bosque montano de la reserva El Cristal.

Objetivos específicos

- Evaluar los contenidos de carbono en la biomasa aérea de un área de restauración pasiva de bosque montano de la reserva “El Cristal”.
- Estimar el contenido de carbono en la necromasa de un área de restauración pasiva del bosque montano de la reserva “El Cristal”.

4. Marco teórico

4.1. Los bosques montanos del Ecuador

Los bosques montanos se caracterizan por poseer una gran diversidad de flora y fauna, pese a su importancia biológica son ecosistemas vulnerables, por presentar pendientes pronunciadas lo que provoca riesgos de erosión debido a las intensas lluvias, a esto se suma las actividades antropogénicas que resultan en la deforestación, lo que provoca y da paso al uso del suelo, incendios forestales, crecimiento poblacional y expansión agrícola (Cuesta et al., 2009). Por esta razón, los bosques montanos se encuentran afectados en toda su distribución cubriendo un área de 1 542 644 km² desde Colombia, Venezuela, Ecuador, Perú, Bolivia, Argentina y Chile; conteniendo la mayor parte de los bosques montanos (Josse et al., 2009; Young et al., 2002).

Las actividades antropogénicas contribuyen a acelerar los impactos del cambio climático, influenciando negativamente en los bosques montanos y aumentando su vulnerabilidad climática. Debido a esto se requiere de acciones urgentes para fomentar su conservación y recuperación, ya que brindan múltiples servicios ecosistémicos (Cuesta et al., 2009). Los bosques montanos son indispensables en la regulación del clima y suministro de agua, además atenúan las inundaciones y sequías, frenan las emisiones de GEI (Gases de efecto invernadero) a partir de la captura, transporte y almacenamiento de carbono, actuando como sumideros de carbono que coadyuvan a la mitigación del cambio climático (Cuesta et al., 2009).

4.1.1. Bosque secundario

Se conoce como bosque secundario a aquella vegetación leñosa de rápido crecimiento que se desarrolla en un terreno hostil luego de que la cobertura vegetal original fuera deforestada. La regeneración natural da paso a la sucesión secundaria y a los procesos de restauración ecológica (Henaó, 2015).

Los bosques secundarios se originan a partir del disturbio o perturbación al ecosistema causado de manera natural o antropogénica como el cambio y uso del suelo con fines agropecuarios, estas actividades afectan a una gran superficie del bosque (Smith et al., 1997). Los bosques secundarios presentan características sobresalientes como la variabilidad florística entre rodales de corta distancia, ya sea a nivel de dosel como de vegetación de sotobosque (Zimmermann et al., 1995). Esto es debido a las variaciones fenológicas de las especies colonizadoras en el momento del abandono del terreno y del tipo de regeneración, los cuales pueden influenciar en la composición del sitio, así también se ven influenciados por variables climáticas como la precipitación y elevación determinan la velocidad de la sucesión o recuperación del bosque (Ewel, 1980).

4.2. Estándares de la Sociedad de Restauración Ecológica (SER)

Los estándares definen a la restauración ecológica como cualquier práctica que tiene como meta lograr la recuperación del ecosistema en relación con un modelo de referencia apropiado, independientemente del tiempo para lograrlo (Sociedad internacional para la restauración [SER], 2019).

4.2.1. Principios de los estándares de la Sociedad de Restauración Ecológica

Se establecieron ocho principios, así: los principios 1 y 2 fundamentan la restauración ecológica, estos principios involucran efectivamente a las partes interesadas y utilizan cabalmente el conocimiento científico y ancestral. Los principios 3 y 4 se centran en la restauración ecológica destacando a los ecosistemas de referencia adecuados como objetos de recuperación. El principio 5 hace uso de indicadores para evaluar el proceso de las metas de restauración. Por su parte, el principio 6 menciona que la restauración ecológica debe buscar el nivel más alto de recuperación. El principio 7 demuestra la importancia de la restauración a grandes escalas con el fin de obtener beneficios acumulativos y finalmente el principio 8 esclarece las relaciones con enfoques aliados en un “continuo recuperativo” (SER, 2019).

4.3. Restauración ecológica

La restauración ecológica es aquel proceso que busca mitigar a través de la restauración los impactos negativos causados por las actividades antropogénicas sobre los ecosistemas naturales, de esta manera mejorando la salud, integridad y sostenibilidad del área disturbada (SER, 2016). El papel es activador, debido a que acelera el proceso que facilita la recuperación de estructura, composición y función del ecosistema, teniendo en cuenta su capacidad y estabilización a corto, mediano y largo plazo (Mola et al., 2015).

4.3.1. Tipos de restauración ecológica

a) Restauración pasiva

La restauración pasiva implica en eliminar la perturbación, tensionantes o barreras que impiden la regeneración natural en áreas alteradas por causas naturales y antrópicas (Rios et al., 2012). Una vez de haber eliminado las tensionantes el ecosistema se recupera por si sola mediante los procesos de regeneración natural sin la intervención directa del hombre, en algunos casos, esto no siempre es posible, ya que depende del nivel de degradación del ecosistema (Barrera, 2016). Por esta razón, este tipo de restauración se utiliza cuando el daño del ecosistema es bajo y la resiliencia es alta (Lamb y Gilmour, 2003).

Para la recuperación del ecosistema es importante que existan remanentes y conectividad entre estos para la recolonización, permitiendo que germinen los bancos de semillas y aquellas que son dispersadas naturalmente (Gann et al., 2019).

Para disminuir los tensionantes que afectan a la regeneración natural, primero se debe identificar el tipo de tensionante ya sea ecológico o socioeconómico, seguidamente se debe educar y concientizar sobre los procesos de restauración, y de hacerles conocer sobre el programa socio bosque, que consiste en incentivos monetario a habitante de áreas rurales que se comprometen a la protección y conservación de los diferentes ecosistemas (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2014).

b) Restauración activa

La restauración activa implica la acción directa del ser humano a partir de la plantación de especies arbóreas que contribuyen a recuperar el área perturbada, esta actividad se puede aplicar en ecosistemas donde existe o no la vegetación, además es el proceso más adecuado para aquellos ecosistemas que tienen un alto daño ecosistémicos (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2019).

Por lo que, la restauración activa cuenta con técnicas de restauración ecología como la nucleación, perchas artificiales, refugios artificiales, transposiciones de suelo y siembra de plantas de especies funcionales (Torres, 2020). La nucleación busca originar nuevos microhábitats, así facilitando la regeneración y mejore la interacción entre organismo de así promoviendo la sucesión ecológica (Triana et al., 2023). De igual manera, las perchas artificiales consisten en que aves y murciélagos a través de su excremento trasladan semillas de los fragmentos permanentes del bosque, hacia el sitio que se desean restaurar (Torres, 2020).

4.4. Cambio climático

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en la Convención Marco de las Naciones Unidas en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables, este denota un cambio en el estado del clima identificable”. Bajo este concepto el cambio climático está relacionado con la variación del clima a nivel global provocando la disminución o aumento de la precipitación y temperatura, cuyas alteraciones son originadas provocadas por causas naturales y antrópicas (IPCC, 2013).

La deforestación y la quema de combustibles fósiles a través del tiempo han contribuido con el cambio climático, lo que da paso al calentamiento global, según la IPPC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2023) el aumento de la temperatura

global es de 1,1°C, hay cambios significativos a lo largo de las regiones del mundo como el aumento del nivel del mar originado por la desaparición de glaciares y hielo marino. El cambio climático es el principal tema de intereses, ya que afecta de manera directa a la salud global poblacional a partir de olas de calor, tormentas intensas, inundaciones, sequías, incremento del nivel de mar, etc (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2017).

4.4.1. La restauración ecológica para la mitigación del cambio climático

La restauración ecológica no consiste simplemente en reparar, recomponer un ecosistema degradado por disturbios antrópicos, sino que va más allá, es decir la recuperación de los servicios ecosistémicos como la captura de carbono, ya que según la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2019) un área restaurada de 350 millones de hectáreas puede generar 9 billones de dólares en servicios ecosistémicos y eliminar, de 13 a 26 gigatoneladas de gases de efecto invernadero de la atmósfera.

En el momento que los bosques son destruidos o deforestados ya sea de manera parcial o total, el carbono que se encuentra almacenado se libera hacia la atmósfera en forma de CO₂ dando paso al efecto invernadero, de esta manera provocando el cambio climático (IPCC, 2007).

La degradación de los ecosistemas tanto marinos como terrestres debilita el bienestar de 3 200 millones de personas, costando un alrededor del 10 % del producto interno bruto mundial por la pérdida de especies y servicios ecosistémicos (ONU, 2019). Existen una gran variedad de ecosistemas como manglares, humedales, sabanas, bosques, ecosistemas marinos e incluso urbanos que requieren de una protección urgente. Los ecosistemas sanos actúan como sumidero que capturan grandes cantidades de carbono así disminuyendo las emisiones de CO₂ (Gascuña, 2021). Por otra parte, la restauración de ecosistemas dirigida a los lugares correctos genera beneficios para la biodiversidad y el clima (Instituto Superior del Medio Ambiente [ISM], 2019).

Adicionalmente, los bosques juegan un rol importante en la mitigación del cambio climático, debido a que tienen la capacidad de fijar y absorber el CO₂ a través de la fotosíntesis siendo considerados como sumideros de carbono, ya que absorben miles de millones de toneladas métricas de CO₂, sin embargo, los niveles de almacenamiento se han visto afectados por la deforestación y degradación forestal (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2023). Por esta razón, mediante restauración ecológica, así como la reducción de la deforestación se busca frenar el cambio climático.

4.4.2. Cambio climático y sus impactos en los bosques

Los bosques montanos son considerados como ecosistemas frágiles que presentan un alto grado de vulnerabilidad al cambio climático por lo que se requiere de acciones urgentes para su conservación (Cuesta et al., 2009). Según el Centro para la Investigación Forestal Internacional (CIFOR, 2008), los bosques montanos serán los primeros en desaparecer, debido a que son sensibles al cambio climático, ya sea por el incremento de temperatura y el descenso de precipitación, de esta manera afectando a la sostenibilidad del ecosistema, de esta manera resultando en la pérdida biodiversidad.

Los cambios abruptos del clima generan impactos negativos de forma directa sobre la biodiversidad como: el alargamiento del periodo de las actividades de las plantas, incrementando o disminuyendo su productividad dependiendo de la temperatura, el exceso de esta provoca la reducción de caudales afectando al racionamiento de agua potable tanto para la sociedad y bosques (Sánchez, 2020). De manera indirecta el cambio climático produce cambios físicos y químicos en el suelo que afectan a la propagación, distribución de especies, aumento de necromasa que fomenta la propagación de incendios forestales, así incrementando las emisiones de CO₂ (Fernández, 2005).

El cambio climático produce efectos sobre la diversidad como la aceleración de la pérdida de la flora y fauna, la degradación de los ecosistemas y la pérdida de bienes y servicios ecosistémicos (Samaniego et al., 2017). Sin embargo, los bosques son una solución natural para mitigar el cambio climático a través de la captura y almacenamiento de carbono, purificación del aire, regulación del clima y protección del suelo (Serrano, 2022).

Por otra parte, los efectos directos del cambio climático que genera sobre la diversidad son de tres niveles. El primer nivel se relaciona con el desarrollo, ya que las funciones vitales y el comportamiento de cada individuo de cada especie podría alterarse (Böhning et al., 2008), por ejemplo, las aves de la montaña son las más vulnerables frente al cambio climático, ya que el aumento de temperatura obliga a las aves a migrar a zonas con mayor elevación con el fin de encontrar los elementos necesarios para sobrevivir (Böhning et al., 2008). El segundo nivel se relaciona con los individuos que pertenecen a ciertas poblaciones, ya que el incremento de temperaturas y los patrones de lluvia provocan cambios en la forma como se encuentra distribuida la especie, su tamaño, su estructura y abundancia (Böhning et al., 2008). Estudios demuestran que la exposición de los embriones del sapo occidental a la luz podría hacerlos más susceptibles a ser infectados por microorganismos de esta manera aumentando su tasa de mortalidad (Böhning et al., 2008). Finalmente, el tercer nivel hace énfasis a las alteraciones de los ciclos naturales (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC],

2007), en este caso las elevadas temperaturas provocan la disminución del nivel agua en lagunas y ríos, de esta manera alterando la forma de vida de las poblaciones (IPCC, 2007).

4.5. El ciclo de carbono

El ciclo de carbono es un proceso de cambios químicos en el flujo de carbono que existe en la atmósfera, el océano, la biosfera marina, la biosfera terrestre y la litosfera (IPCC, 2013). El carbono es un elemento omnipresente en todos los seres vivos y se recicla continuamente en el planeta, este fluye desde la atmósfera hacia los seres vivos y es tornado a la atmósfera como dióxido de carbono (Smith, 2024).

El dióxido de carbono (CO₂) es principal gas de efecto invernadero originado por actividades humana, las mismas que tuvieron un gran impacto en el ambiente provocando el aumento de CO₂, este se originó con mayor fuerza a partir de la era industrial (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [EPA], 2023).

La primera fase del ciclo de carbono inicia a partir de la fijación de carbono mediante la fotosíntesis, este proceso de alimentación es realizado por las plantas y bacterias fotosintéticas, además genera la producción de oxígeno, los sumideros de carbono que presentan abundante vegetación capturar grandes cantidades de CO₂ de esta manera mitigando el cambio climático (Rhoton, 2023). La segunda fase consiste en la liberación de una parte del carbono mediante la respiración celular (referida a los animales y el ser humano) y vegetal (plantas durante la noche) de esta manera liberando nuevamente el carbono en forma de CO₂ (Rhoton, 2023). Finalmente, la tercera fase hace referencia a la liberación de carbono mediante la descomposición de los seres vivos, ya que cuando mueren el carbono contenido en ellos regresa a la atmósfera o es asimilado por otros seres vivos (Rhoton, 2023).

4.6. Compartimientos del contenido de carbono

4.6.1. Biomasa

Según el IPCC (2013) la biomasa es la masa total de organismos vivos presentes en un área, población, cadena trófica, ecosistema o volumen dado, se clásica en biomasa viva, aérea y subterránea. Adicionalmente, la biomasa es el total de materia orgánica viva y muerta, localizada sobre y bajo el suelo, suele ser expresada en toneladas de materia orgánica por unidad de superficie (Ravindranath y Ostwald, 2008)

4.6.2. Carbono en la biomasa aérea

La biomasa aérea es expresada como toneladas de biomasa por unidad de superficie como hectárea, además es la reserva de carbono más importante, visible y dominante en bosques y plantaciones (Ravindranath y Ostwald, 2008). Se considera biomasa aérea a todas las especies

vivas como árboles, arbustos y hierbas, por encima del suelo, se incluyen los tallos, ramas, corteza, etc (Garzuglia y Saket, 2003).

4.6.3. Carbono en la necromasa

La necromasa se podría decir que es un componente de la biomasa de un ecosistema, y está compuesta de madera muerta, a veces todavía adheridos a plantas en pie, como ramas, hojas e inflorescencias muertas, esta materia orgánica se añade en distintos grados de descomposición, que se encuentra en el suelo de los ecosistemas, para formar humus en la etapa final (Alarcón, 2009).

La dinámica de la necromasa es importante, debido a su funcionamiento en los bosques, ya que el proceso de descomposición libera nutrientes que estimulan el crecimiento de nueva vegetación y CO₂ dirigida hacia la atmósfera (Zaninovich, 2017).

a. Carbono en la hojarasca

Se considera como hojarasca a los residuos vegetales frescos, sin descomponer y de fácil reconocimiento (especie y tipo) (Cuevas et al., 2014). El sistema de hojarasca es cuando esta se acumula y se descompone en el suelo dentro de un ecosistema, este proceso es natural en la renovación de la biomasa forestal (Lavelle & Spain, 2003). La hojarasca representa el 8 % del almacenamiento de carbono a nivel de biomasa vegetal (MacDicken, 1997).

b. Carbono en la madera caída muerta y árboles muertos en pie

La madera muerta hace referencia a las ramas derribadas, árboles muertos en pie, troncos, tocones, etc. Según el tipo y edad del bosque la cantidad de madera muerta varía, los bosques jóvenes presentan un bajo porcentaje de este recurso, a diferencia del bosque maduro (Delgado y Pérez, 2002). La madera muerta caída y los árboles muertos en pie tienen capturando cierta cantidad de carbono; sin embargo, a través del tiempo es devuelta o emitida al entorno a partir de su descomposición, este proceso depende de las condiciones climáticas y densidad de la madera. Según Seidl (2021) la madera muerta libera 10,9 gigatoneladas a la atmósfera cada año. A pesar de esto una pequeña parte es absorbida por el suelo.

4.7. Métodos para el inventario de carbono

Los métodos generales para inventariar el carbono son ganancia-perdida y la diferencia de existencias (IPCC, 2006). El método de ganancia-perdida de carbono consiste en la estimación de las ganancias en las reservas de carbono de los reservorios ya sea por crecimiento o transferencia de carbono de un reservorio a otro, es decir la transferencia de carbono del reservorio de la biomasa viva al reservorio de la materia orgánica muerta, debido a la perturbación (Ravindranath y Ostwald, 2008).

Entre tanto, el método de ganancia-perdida se basa en modelos de crecimiento en el modo de cómo crecen los bosques y otros usos del suelo, además teniendo en cuenta los procesos naturales y actividades antrópicas que ocasionan las emisiones de CO₂ de un lugar determinado. La pérdida de carbono se origina por actividades como: explotación forestal, recolección de madera, tala entre otros (Murdyarso et al., 2008). Adicionalmente, este método es el menos costoso, ya que los reservorios de carbono se los determina solo en el inicio y el resto se generan modelos a través del tiempo.

En el método de diferencia de existencia las reservas de carbono se estiman para cada reservorio en dos momentos en el tiempo, el intervalo de la medición puede ser de 5, 7 a 10 años (Ravindranath y Ostwald, 2008).

4.8. Métodos de estimación de carbono en biomasa aérea

La biomasa aérea puede ser estimada de manera directa con la cosecha de especímenes o indirectamente mediante ecuaciones alométricas con determinadas características variables dasométricas que nos proporciona el árbol en campo (Perea et al., 2021).

4.8.1. Métodos indirectos o no destructivos

a. Método sin parcela

Implica calcular la densidad de la madera, medir la altura total y DAP (diámetro a la altura del pecho 1,30 m, a través de una línea recta. Este método es el más adecuado para el sistema de uso del suelo que contiene un bajo número de individuos como: sabanas y pastizales (Ravindranath y Ostwald, 2008), esto es útil para estimación de un solo periodo.

b. Método con parcela

Se estima el volumen o la biomasa arbórea y no arbórea para esto debemos medir la altura total, DAP (Diámetro a la altura del pecho 1,30 m). Existen algunas variantes o formas de parcelas como: cuadradas, rectangulares, transectos (rectangulares largas) y circulares (Ravindranath y Ostwald, 2008).

4.8.2. Método directo o destructivo

a. Método de cosecha

Este método se utiliza para crear ecuaciones alométricas, consiste en el árbol es cortado y separado en diferentes piezas como fuste, ramas vivas, ramas muertas, hojas y raíces, cada componente es pesado en campo y secada, de igual manera antes de aserrar las piezas del fuste y de las ramas gruesas, se debe obtener el volumen de cada pieza para poder obtener la densidad de la madera. (Acosta et al., 2001).

4.9. Métodos de estimación de carbono en necromasa

En el caso de la necromasa según Ravindranath et al. (2008) mencionan que la biomasa de la hojarasca y la madera muerta (madera muerta caída y árboles muertos en pie) pueden ser estimadas a partir de los métodos de producción y cambio de existencias.

El método de producción consiste en aquella producción anual tanto de hojarasca como de madera caída (tonelada/hectárea/año) (Ravindranath y Ostwald, 2008). La estimación de la producción anual de madera caída y hojarasca se deben seguir las siguientes recomendaciones: a) seleccionar el sitio y ubicar los puntos de muestra, b) instalar parcelas rectangular o circulares, c) Pesar el peso total de la muestra y recolectar 300 g, y d) Extrapolación y cálculo de producción anual de hojarasca por año.

El método de cambio de existencia se puede estimar midiendo los reservorios en dos tiempos y calculando la diferencia.

4.10. Estudios similares al almacenamiento de carbono en bosques montanos

Existen estudios destacados sobre el almacenamiento de carbono en bosques montanos en estado de regeneración natural y no intervenidos. Aguirre (2018) en un bosque andino secundario maduro del Parque Universitario Francisco Vivar Castro, Loja, Ecuador, estimo biomasa y carbono acumulado en parcelas permanentes establecidas en bosques andinos. La biomasa total del comportamiento arbustivo es 5,41 t/ha, mientras que el carbono capturado es 2,7 tC/ha. La necromasa representa 20,15 t/ha de biomasa y la cantidad de carbono capturado fue de 10,75 tC/ha. Finalmente, el carbono total fijado en una (1 ha) del bosque andino del PUFVC, considerando los cuatro compartimentos: árboles, arbustos, hierbas y necromasa es de 42,29 tC/ha, mientras que el carbono total es de 546,86 tC/ha en 12,93 ha de bosque existente.

Ramírez et al. (2022) a partir de modelos alométricos estimo la biomasa aérea en bosques secundarios montanos del noroccidente del Ecuador, en tres áreas de estado sucesional de 18, 30 y 50 años. La primera área de recuperación de 18 años almacena un 36,56 tC/ha, la segunda 70,36 tC/ha y aquella área de mayor recuperación captura 150,04 tC/ha, dando a conocer que el componente de mayor almacenamiento de carbono es el fuste con intervalo del 65,76 hasta 73,44 %, mientras que las ramas y hojas de las diferentes áreas representa un 20,98 - 25,5 % y 5,58 – 8,74 % del carbono aéreo total.

Urgilés (2019) estimo la cantidad de biomasa y de carbono almacenado en la biomasa arbórea, se llevó a cabo en la Reserva de la Biosfera Macizo del Cajas en 6 parcelas permanentes. El valor promedio de biomasa aérea (ABG) para los puntos de muestreo fue de 111,36 t/ha, el cual representa 55,68 tC/ha que han sido almacenados en la biomasa aérea de la zona de estudio.

Restrepo y Galeano (2016) en la parte Alta de la cuenca de Halo en el norte de Antioquia determinaron que los bosques secundarios maduros y rastrojos montanos almacenan 93,8 tC/ha. Siendo la biomasa aérea aquella que registro mayor carbono con 91,6 tC/ha, mientras que la necromasa un 2,2 tC/ha. Cabe recalcar que en esta investigación no realizaron la estimación de todos los componentes de necromasa, sino solo de los árboles muertos en pie.

5. Metodología

5.1. Área de estudio

La presente investigación se llevó a cabo en un ecosistema de bosque siempreverde montano del sur de la cordillera de los Andes, localizado en áreas de restauración pasiva de la reserva El Cristal. La reserva forma parte de Reserva de la Biosfera Podocarpus - El Cónдор y se encuentra ubicada 15 km de la ciudad de Loja entre las coordenadas 79°11'56.29" Longitud O; 4° 7'14.93" Latitud S (Figura 1). La reserva presenta un rango altitudinal entre 1 950 a 3 200 m s.n.m.; posee una extensión de 602.51 ha con una topografía de relieve irregular, caracterizado por montañas y colinas, con suelos de textura franco-arcillosa y franco arcillosa limosa. La precipitación oscila entre 1 000 -1 500 mm anuales, mientras que la temperatura varía según la altitud, su rango va desde 6 a 12 °C (Burneo, 2020).

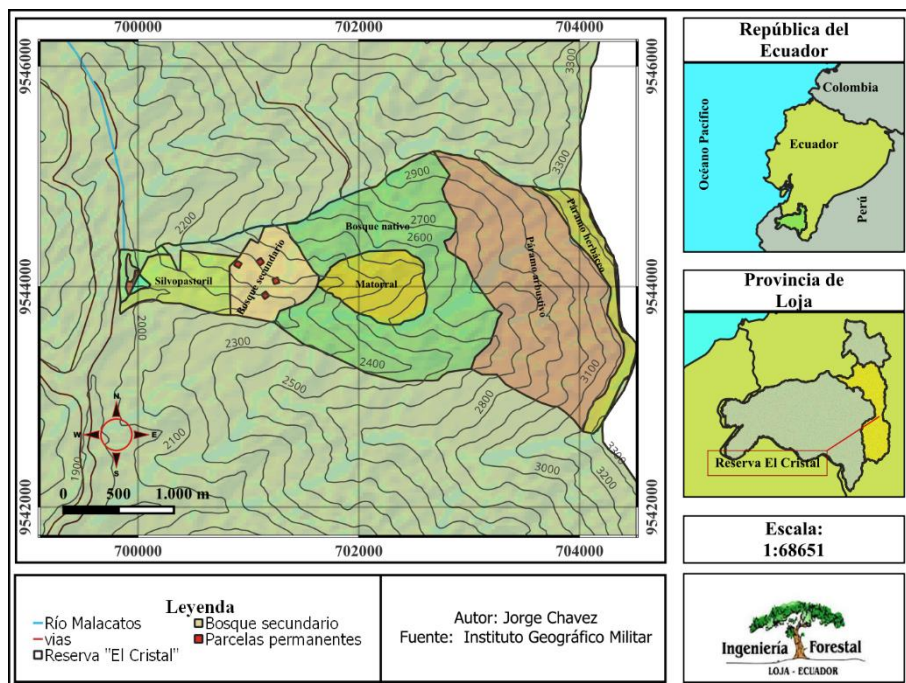


Figura 1. Ubicación de las parcelas de estudio en el bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva "El Cristal".

El bosque secundario del ecosistema siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva "El Cristal" posee áreas de diferentes periodos de restauración pasiva entre 20 y 40 años de abandono, anteriormente estas áreas fueron utilizadas como pastizales. Actualmente, este ecosistema muestra una dominancia de la especie pionera *Alnus acuminata* Kunth, siendo representativa del bosque montano.

5.2. Metodología para la evaluación del contenido de carbono de la biomasa aérea de un área de restauración pasiva del bosque montano de la reserva “El Cristal”

Para el muestreo de la biomasa aérea de las áreas de restauración pasiva, dentro de la reserva “El Cristal” se seleccionó un bosque secundario a una altitud de 2 150 a 2 300 m s.n.m. Se realizó un recorrido de campo para la ubicación de sitios con condiciones similares de estructura del componente leñoso y para evitar condiciones atípicas de terreno tales como quebradas, derrumbes, senderos, etc.

Se instalaron al azar cuatro parcelas permanentes de 50×50 m ($2\,500$ m²) con edades de recuperación entre 20 y 40 años. Cada parcela tiene un distanciamiento entre ellas de al menos 100 m, para garantizar la independencia de los datos y capturar la mayor variabilidad del área de estudio. A su vez, cada parcela fue subdividida en cuatro subparcelas de 25×25 m para facilitar el levantamiento de la información en campo. Se midió el diámetro a la altura de pecho ($DAP \geq 5$ cm) a 1,30 m. Todos los individuos fueron identificados con una placa de acero inoxidable con el código de la parcela, subparcela y número de individuo, en base a la metodología de la Guía para la instalación y Evaluación de Parcelas permanentes de muestreo (Contreras et al., 1999). Los datos obtenidos de las parcelas se registraron en las hojas de campo (Anexo 1).

5.1.1. Estimación de los contenidos de carbono en la biomasa

Para estimar la biomasa aérea se utilizó el DAP (cm), la altura total de los árboles (m) y densidad de la madera (g/cm³). Esta última fue obtenida de la base de datos de *Global Density* (GDW) (Zanne, 2009), para cada una de las especies dentro de las parcelas. Para la identificación de los árboles se recolectó muestras botánicas, las mismas que fueron prensadas y trasladadas al Herbario “Reinaldo Espinoza” para su posterior identificación.

Para las especies que no se encontró la densidad de la madera en la base de datos de GDW, se realizó un promedio de la densidad ya sea por género, familia o parcela. Una vez obtenidas las densidades de madera de las especies se estimó la biomasa de los árboles de cada una de las parcelas permanentes, para ello se utilizó la ecuación pantropical propuesta por Chave et al. (2014):

$$AGBest = 0,0673 \times (pD^2H)^{0,976}$$

Donde:

AGB est = Biomasa estimada en kilogramos,

P = densidad de madera (g/cm³)

D = diámetro (cm)

H= altura total (m)

Para estimar el contenido de carbono se multiplico la cantidad de biomasa por la fracción de carbono (FC) equivalente 0,47, recomendada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2006).

5.2. Metodología para la estimación del contenido de carbono de necromasa de un área de restauración pasiva del bosque montano de la reserva “El Cristal”

Para estimar la necromasa presente en cada una de las parcelas se consideraron 3 subcomponentes clasificados árboles muertos en pie y madera muerta caída y hojarasca.

5.2.1. Hojarasca

El contenido de carbono en la hojarasca se estimó en 16 subparcelas de 1 × 1 m dentro de cada una de las subparcelas de 25 × 25 m. Se recolectó y pesó en campo todo el material orgánico que se encontró dentro la parcela de 1 × 1 m. De esta muestra se tomó una submuestra de 300 g, la cual se secó en laboratorio de la Universidad Nacional de Loja a una temperatura de 65 °C y con una duración aproximada de 120 horas o hasta que la muestra presentó un contenido de humedad constante. Para estimar la biomasa en la hojarasca se utilizaron las fórmulas propuestas por Pearson et al. (2005):

$$MS = \frac{Pms}{Pfm} \times Pft$$

Donde:

Ms = masa seca kg

Psm = peso seco de la muestra colectada (kg)

Pfm = peso fresco de la muestral colectada (kg)

Pft = peso fresco total por metro cuadrado (kg)

$$\text{Factor de expansión} = \frac{10000 \text{ m}^2}{\text{Área de la parcela}}$$

$$\text{Contenido de biomasa} = \text{Masa seca} * \text{Factor de expación}$$

5.2.2. Árboles muertos en pie

Para la estimación de la biomasa en los árboles muertos en pie, se midió el DAP (≥ 5 cm) y altura total. Seguidamente se calculó el diámetro superior del árbol, utilizando la ecuación alométrica propuesta por Chambers et al. (2000):

$$Dh = 1,59DBH (h^{-0,091})$$

Donde:

Dh = diámetro superior

DBH = diámetro inferior

H = altura

Se calculó el volumen de cada uno de los individuos muertos utilizando la fórmula de Smalian:

$$v = L [(\pi (D_1/2)^2 + (D_2/2)^2)]/2$$

Donde

L = longitud del árbol caído (m)

$\pi = 3,1416$

D₁ = diámetro inferior

D₂ = diámetro superior

Para la estimación de la biomasa se multiplico la densidad promedio de los individuos vivos de la parcela por el volumen.

5.2.3. Madera muerta caída

Para la estimación de biomasa de la madera muerta caída de cada una de las parcelas se tomó en cuenta las ramas y troncos ≥ 10 cm de diámetro, además se midió la longitud de cada pieza de la madera muerta caída, así como su diámetro superior e inferior. Por otra parte, para clasificar el estado de descomposición de la madera muerta caída, se aplicó el método del machete, que consiste en machetear a la pieza; es decir si la hoja del machete rebota se considera “sólido”, si la atraviesa levemente “intermedia” y si la atraviesa rápidamente “podrida” (IPCC, 2003).

Para estimar la densidad de madera en descomposición, se tomaron ocho muestras de la madera muerta caída de cada clase de descomposición con la ayuda del barrenado de Pressler. Las muestras fueron secadas en una estufa a temperatura constante de 80 °C por un tiempo de 120 horas dentro del laboratorio de anatomía de la madera de la Universidad Nacional de Loja, hasta que las muestras alcanzaron un peso constante “gramos”. Para obtener el volumen de las muestras se utilizó el método dimensional, en el cual se aplicó la fórmula de Smalian, además cálculo la densidad básica mediante la fórmula propuesta por Cisternas (1998):

$$DW = \frac{PS}{Vh}$$

Donde:

Dw = Densidad básica (g/ cm²)

Ps = Peso seco (g)

Vh = Volumen verde

Los valores de densidad de madera solido fueron de (0,42 g/cm³), intermedio (0,32 g/cm³) y podrido (0,21 g/cm³), pertenecientes de las áreas de restauración pasiva de la reserva El Cristal. Una vez que se obtuvieron los datos de campo, se calculó el valor de biomasa, para ello se calculó el volumen de cada pieza, seguidamente se multiplicaron por los diferentes valores de densidad. Finalmente, para obtener el contenido de carbono de tres componentes de necromasa se multiplico la biomasa obtenida por la fracción de carbono de “0,47”, es decir que aproximadamente el 47 % de biomasa vegetal corresponde a carbono (IPCC, 2006).

$$CC = BN * 0,47$$

Donde:

CC = contenido de carbono (tC/ha)

BN = biomasa (Kg/ha, t/ha)

Fracción de carbono = 0,47

6. Resultados

El área de restauración pasiva del bosque montano presenta sitios con diferentes edades de restauración que va desde los 20, 25, 35 y 40 años, de esta manera almacenando un 29,2; 31,5; 47,8 y 51, 5 tC/ha respectivamente, en promedio capturando un $40.00 \pm 5,65$ tC/ha (Figura 3) a partir de sus cuatro componentes registrados (biomasa aérea, hojarasca, árboles muertos en pie y madera caída). La biomasa aérea representa el 78 %, dando a conocer que el componente arbóreo captura una mayor cantidad de carbono del 31,30 tC/ha (Tabla 1), mientras que la necromasa compone el 22 %, de carbono almacenado en hojarasca, árboles muertos en pie y madera muerta caída (Figura 2), de esta manera capturando un 8,68 tC/ha.

Tabla 1. Cuadro resumen de la cantidad promedio de carbono almacenado (tC/ha) por cada componente muestreado en un área de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.

Categorías de muestreo	Porcentaje	Componentes muestreados	tC/ha
Carbono almacenado en biomasa	78 %	Carbono almacenado en biomasa aérea	31,30
Carbono almacenado en la necromasa	22 %	Carbono almacenado en hojarasca	4,16
		Carbono almacenado en árboles muertos en pie	2,92
		Carbono almacenado en madera muerta caída	1,6
Total	100 %		40,00

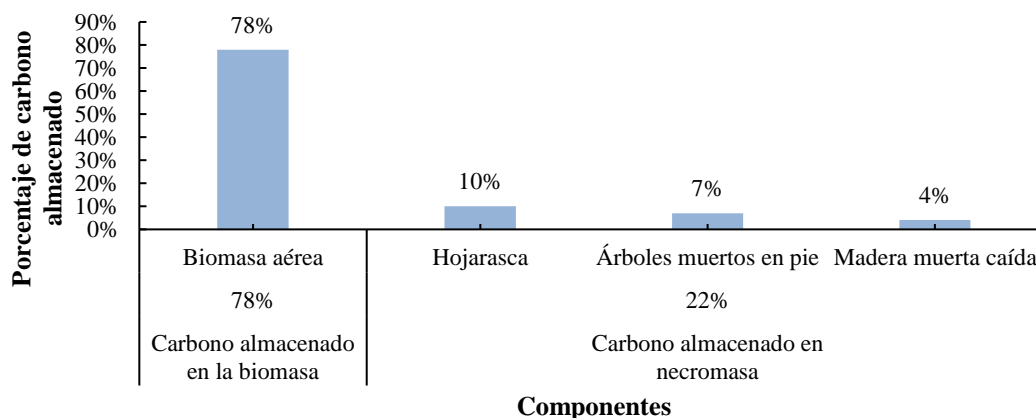


Figura 2. Porcentaje de carbono almacenado por cada componente (biomasa aérea y necromasa) en un área de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.

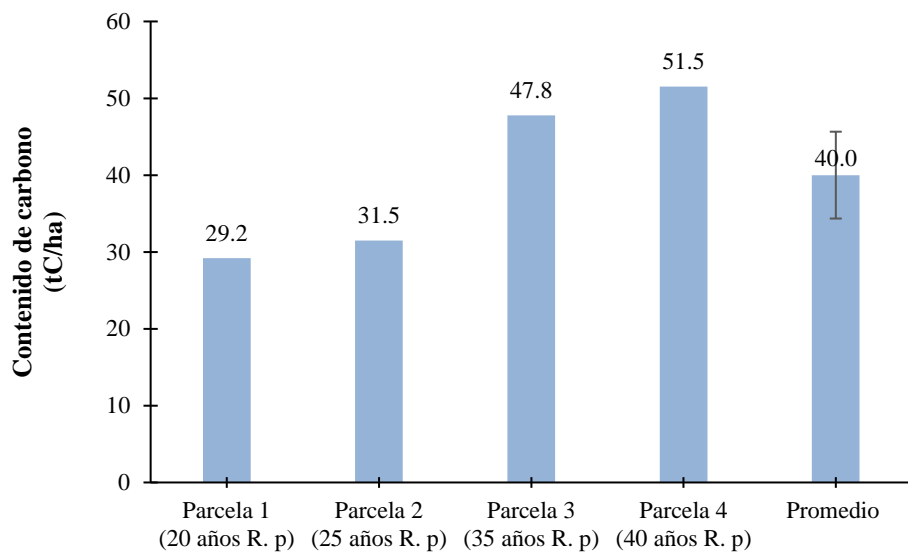


Figura 3. Total de carbono almacenado por parcelas de diferentes años de restauración pasiva (biomasa aérea y necromasa) del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.

6.1. Evaluación del contenido de carbono de la biomasa aérea de un área de restauración pasiva del bosque montano de la reserva “El Cristal”

El componente arbóreo registró un total de 1 252 individuos almacenando un promedio de carbono de $31,30 \pm 4,72$ tC /ha, siendo la parcela uno y dos (20 y 25 años de restauración) aquellas áreas que capturan un bajo contenido de carbono de 23,1 y 23,3 respectivamente (Figura 4).

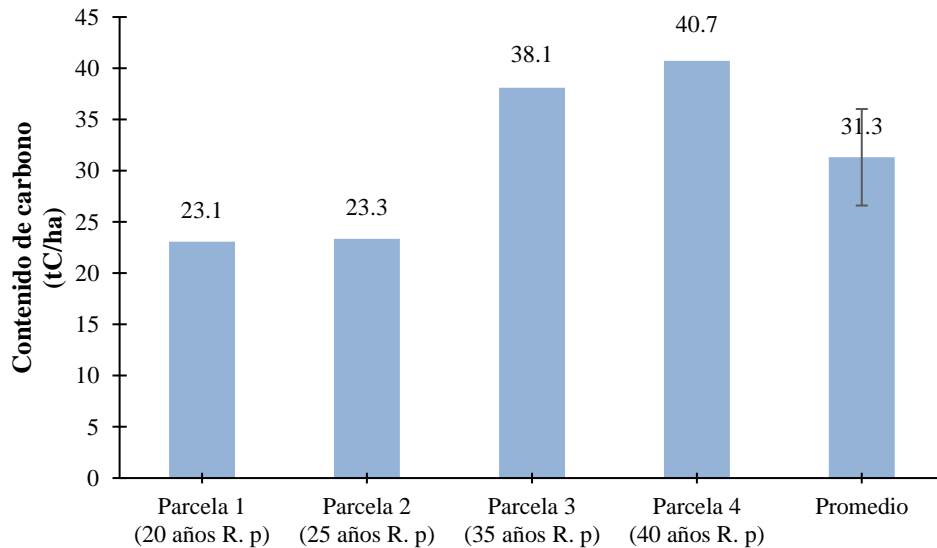


Figura 4. Cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea por parcelas de diferentes años de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.

6.2. Estimación de carbono por clase diamétricas de un área de restauración pasiva del bosque montano de la reserva “El Cristal”

La primera clase diamétrica que va de 5 a 9,9 cm (Figura 5. A) nos demuestra que el área de investigación se encuentra en estado de recuperación, ya que se contabilizaron 695 individuos, mientras que la clase diamétricas mayor a ≥ 40 cm poseen un bajo número de individuos de esta manera formando una J invertida. La clase diamétricas de 10 a 19,9 cm posee un mayor almacenamiento de carbono del 7,8 tC/ha, mientras que la clase diamétrica de 5 a 9,9 cm tiene un almacenamiento menor de 3,3 tC/ha (Figura 5. B).

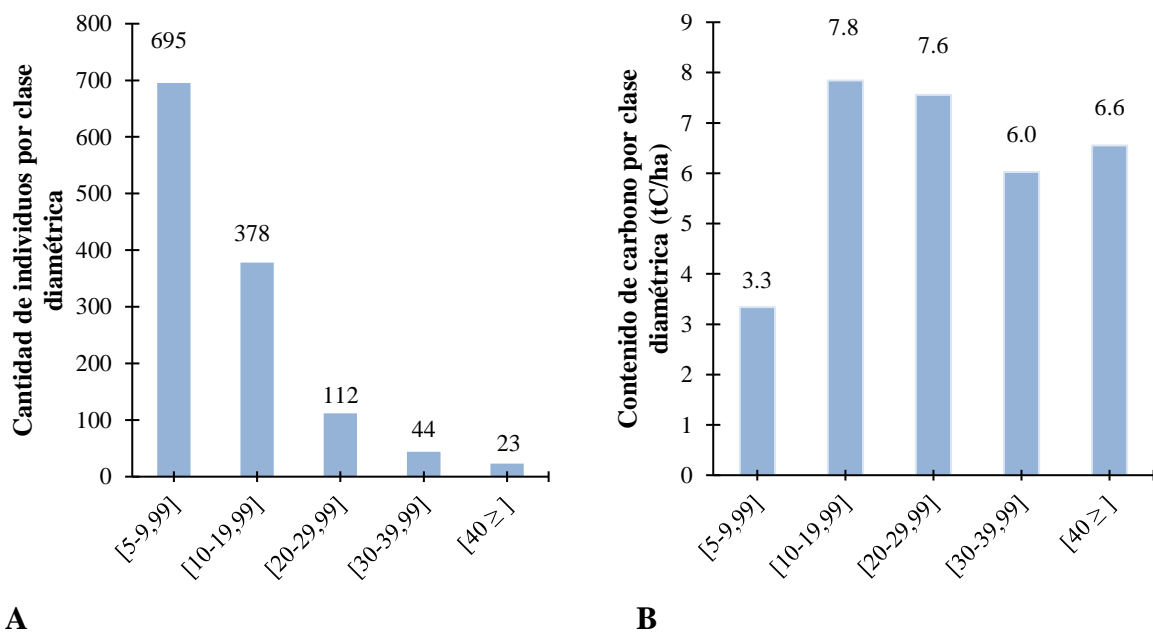


Figura 5. A. Cantidad de individuos. B. carbono almacenado por clase diamétricas en 4 parcelas muestreadas en un área de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.

Respecto al almacenamiento de carbono en base a las familias botánicas las que predominan son: Betulaceae almacenando un 20,4 tC/ha en un total de 249 individuos, Primulaceae capturando un 3,1 tC/ha (285 individuos) y la familia que presenta un menor almacenamiento es Lamiaceae con 0,01 tC/ha en un total de 3 individuos (Figura 6). El listado de las familias se evidencia en el Anexo 2.

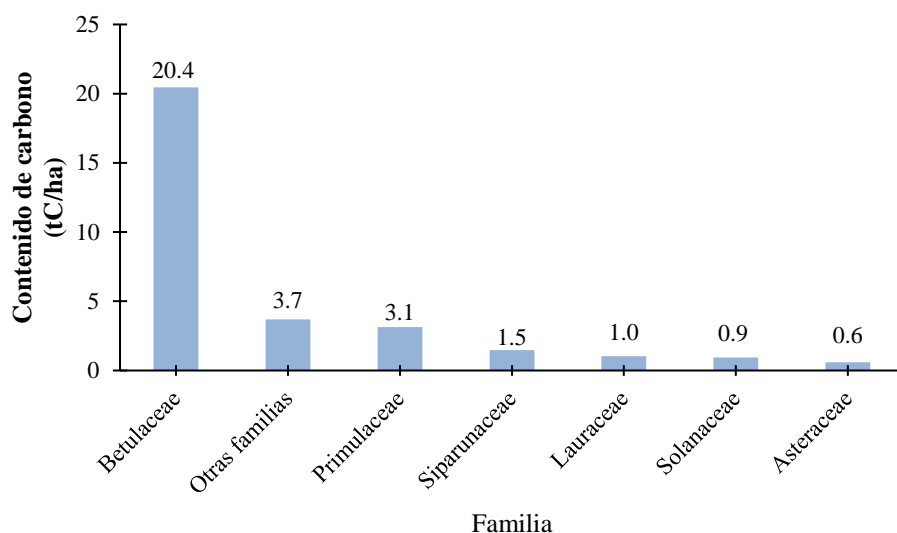


Figura 6. Familias botánicas que almacenan mayor cantidad de carbono en un área de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.

La captura de carbono por especie es variable (Figura 7), siendo *Alnus acuminata* (Betulaceae) la especie de mayor dominancia con un almacenamiento de carbono de 20,4 tC/ha, seguida de *Myrsine sodiroana* (Primulaceae) con un total de 2,8 tC/ha, mientras que la especie de menor dominancia como *Clethra fimbriata* (Clethraceae) y *Ficus* sp. (Moraceae) capturan un total de 0,0025 tC/ha respectivamente. El listado de las especies se muestra en el Anexo 3.

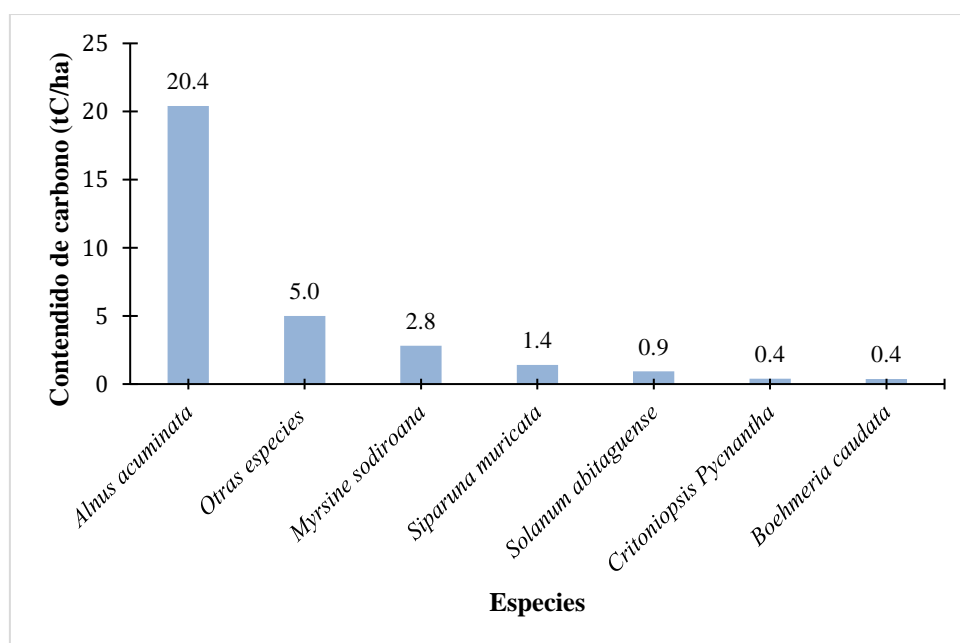


Figura 7. Especies botánicas que almacenan mayor contenido de carbono en un área de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.

6.3. Estimación del contenido de carbono de necromasa de un área de restauración pasiva del bosque montano de la reserva “El Cristal”

La necromasa se clasifico en tres componentes como: Hojarasca, árboles muertos en pie y madera muerta caída. El porcentaje de carbono es mayor en la hojarasca con el del 48 %, árboles muertos en pie con 34 % y madera muerta caída con 18 % (Figura 8).

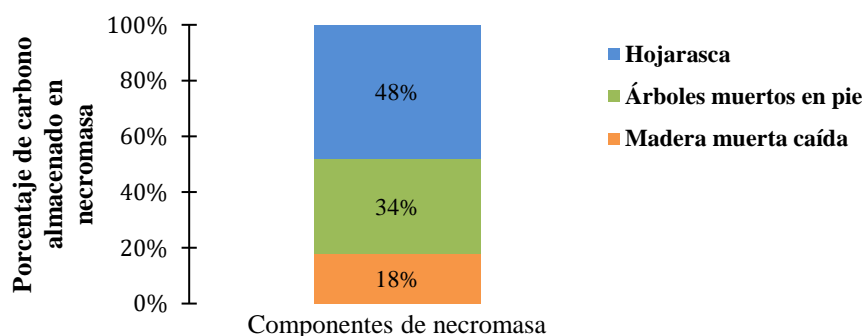


Figura 8. Porcentaje de carbono almacenado en cada uno de los componentes correspondientes a necromasa de las áreas de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”

La cantidad promedio de carbono almacenado en la necromasa de las cuatro parcelas de las áreas de restauración pasiva de la reserva El Cristal es de 8,68 tC/ha. La hojarasca es el componente de mayor contenido (4,16 tC/ha), seguido de árboles muertos en pie con 2,92 tC/ha y madera muerta caída con 1,60 tC/ha (Figura 9).

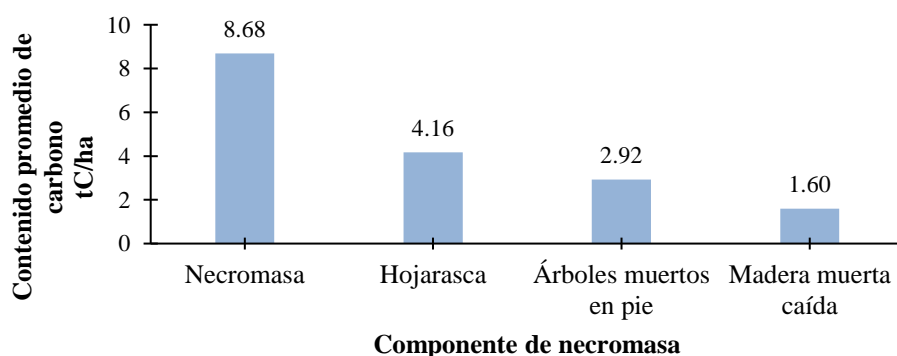


Figura 9. Promedio de carbono almacenado y porcentaje en cada uno de los componentes correspondientes a necromasa de las áreas de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”

La parcela uno y tres son aquellas áreas que almacenan mayor carbono en el componente de la hojarasca con 4,72 y 4,38 tC/ha respectivamente (Figura 10). La hojarasca captura un promedio de carbono de $4,16 \pm 0,24$ tC/ha.

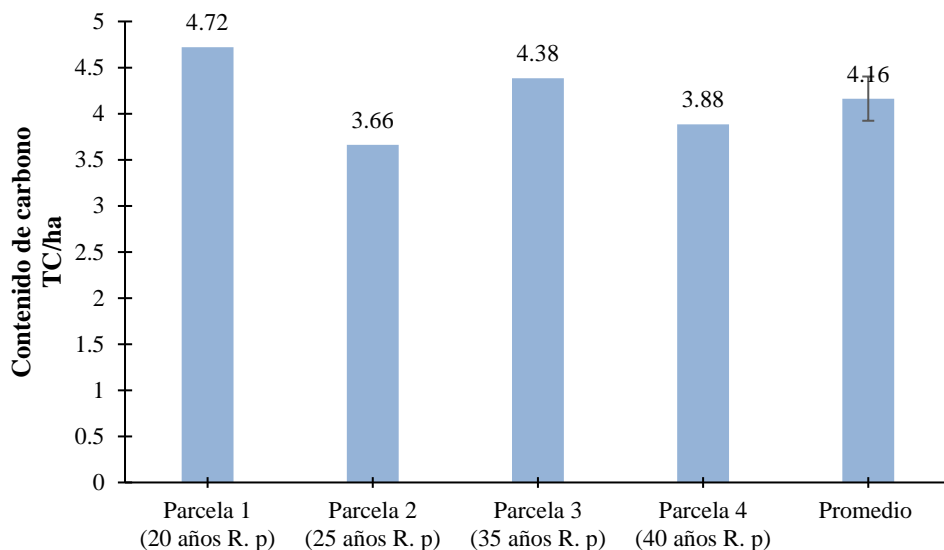


Figura 10. Cantidad de carbono almacenado en hojarasca de parcelas de diferentes años de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.

En la parcela uno existe pocos individuos de árboles muertos en pie, lo que provoca un menor almacenamiento de carbono de 1,01 tC/ha, en comparación con las parcelas dos y tres que generan un mayor almacenamiento de carbono que va desde los 3,57 hasta 4,25 tC/ha, de esta manera el área de estudio captura un promedio de $2,92 \pm 0,70$ tC/ha (Figura 11).

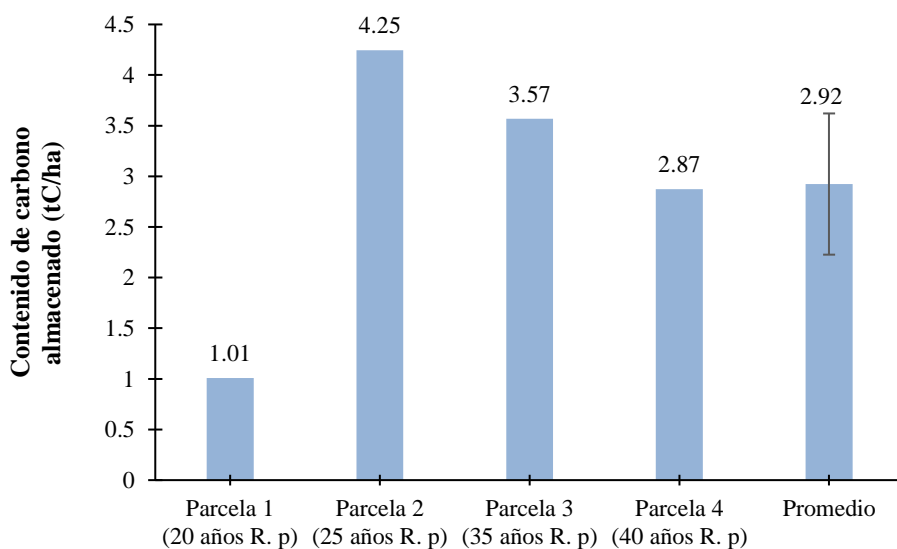


Figura 11. Carbono almacenado de árboles muertos en pie en parcelas con diferentes años de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.

La parcela tres y cuatro tiene un mayor número de piezas en comparación de la parcela uno y dos, estas últimas con valores de almacenamiento de carbono de 0,37 a 0,25 tC/ha

respectivamente. El almacenamiento promedio de carbono de la madera muerta caída es de $1,60 \pm 0,88$ tC/ha (Figura 12).

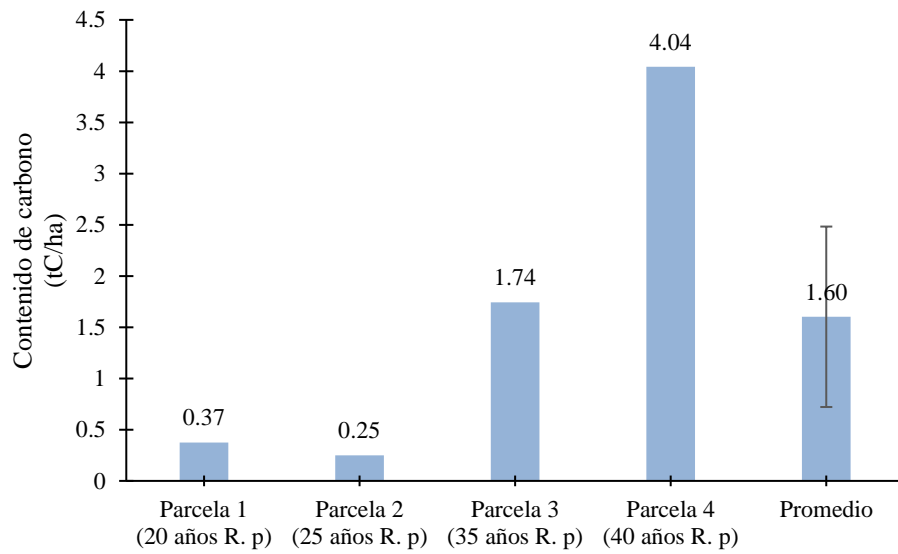


Figura 12. Carbono almacenado en la madera muerta caída en parcelas con diferentes años de restauración pasiva del bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.

7. Discusión

7.1. Carbono almacenado en biomasa aérea y necromasa en un área de restauración pasiva del bosque montano de la reserva “El Cristal”

El área de restauración pasiva del bosque montano almacena un promedio de carbono de $40,00 \pm 5,65$ tC/ha, mientras que según el MAE y FAO (Ministerio del Ambiente del Ecuador y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, 2014) a partir del inventario nacional forestal del Ecuador, el bosque siempreverde andino montano capturan un total de 96,53 tC/ha en biomasa aérea y necromasa. Dentro de los diferentes componentes el que predomina en el almacenamiento de carbono en la zona de estudio es la biomasa aérea con 31,30 tC/ha siendo este el más importante como almacenador de carbono para combatir el cambio climático. El área de restauración puede captar el 38,61 % con respecto al bosque siempreverde andino montano (MAE Y FAO, 2014). Adicionalmente, en estos ecosistemas montanos se ha encontrado que en los primeros 15 años de sucesión generan una rápida acumulación de biomasa aérea que puede exceder 100 t/ha, lo que equivale a 47 tC/ha de carbono almacenado (Brown y Lugo, 1990), sin embargo, este valor puede variar; debió al uso anterior del suelo.

Los bosques son uno de los ecosistemas más importantes como reservorios de carbono después del océano, debido a que el componente arbóreo almacena una mayor cantidad y porcentaje de carbono por unidad de área que otros tipos de vegetación, sin embargo, suele ser diferente según el sitio y el tipo de ecosistema boscoso (Houghton, 2007), por lo que Mapstone (2017) realizó un estudio en la Reserva Rio Guajalito de Quito, donde estimo la biomasa con el fin de conocer almacenamiento de carbono en sus diferentes compartimientos en dos bosque con diferentes años de recuperación de 15 y 33 años.

Según Mapstone (2017) menciona que la biomasa aérea del bosque secundario de 33 años de recuperación almacena un total de 18,99 tC/ha, mientras que el bosque secundario de 15 años almacena un 15,38 tC/ha, estos resultados difieren con los del presente estudio, ya que la biomasa aérea almacena un total 31,30 tC/ha. Por otra parte, la biomasa aérea del bosque no intervenido del Área de Conservación Municipal y Uso sostenible (ACMUS) del cantón Cécica estima un almacenamiento de carbono de 34,12 tC/ha (Fondo Regional del Agua [FORAGUA], 2019), siendo superior al valor estimado del área de estudio de 31,30 tC/ha. Estas variaciones en el contenido de carbono se encuentran diferenciadas principalmente por el estado de conservación, el uso anterior de cada área, el grado de intervención y el tipo de especies dominantes (Ulate, 2021).

La primera clase diamétrica de 5 a 9,9 cm de DAP captura un menor contenido de carbono de 3,3 tC/ha a pesar de contener el mayor número individuos (695 ind), lo mismo que nos permite conocer que el aérea se encuentra en estado de restauración, la captura de carbono es menor debido al bajo volumen de madera, densidad y área basal los mismos que se encuentran relacionados directamente con el diámetro. No obstante, la clase diamétrica ≥ 40 cm de DAP con 23 individuos, fue el tercer grupo que captura una gran cantidad de carbono. Estos datos nos dan a conocer que la estructura del bosque fue perturbada en años anteriores específicamente instalación de pastizal para el pastoreo de ganado. De igual manera este tipo de bosque ha presentado perturbaciones naturales tales como la caída de árboles, provocado por las pendientes pronunciadas que se presentan en las diferentes zonas del bosque. Los resultados de esta investigación difieren con Ramírez et al. (2022), ya que su estudio fue aplicado en tres bosques secundarios ubicados al noroccidente del Ecuador cada bosque presentan diferentes años de recuperación de 18, 30 y 50 años, las clases diamétricas menores a 10 cm presentan un alto número de individuos en cada bosque, pero con diferentes cantidades de almacenamiento de carbono de 10,84; 6,94 y 9,08 tC /ha respectivamente. Por otra parte, la clase diamétrica ≤ 20 cm DAP de cada bosque presentan contenido de carbono de 13,43; 53,30 y 109,96 tC/ha, es decir que el almacenamiento de carbono en la última clase diamétrica será mayor cuando el bosque se haya recuperado por completo de esta manera teniendo características semejantes al bosque primario tal y como ocurre con el bosque de 50 años de recuperación, ya que a mayor edad las funciones ecológicas se asemejan a bosque primarios (Dewalt et al., 2003; Yepes et al., 2010; Zanini et al., 2014).

En cuanto al almacenamiento de carbono por grupos taxonómicos, nuestro estudio presento un mayor contenido de carbono en las familias de Betulaceae con un 20,4 tC /ha y Primulaceae con un 3,1 tC/ha, en cambio las familia de menor almacenamiento fueron: Melastomataceae almacenando un 0,06 tC/ha, Asteraceae con un 0,59 tC/ha y otras familias capturando un 7,15 tC/ha, así almacenando un total de 31,30 tC/ha a nivel de biomasa aérea, si se compara con las familias que almacenan carbono de un bosque primario como el caso de estudio de Urgirlés (2019) las familias que almacenan mayor contenido de carbono son Clusiaceae almacenando un 16,92 tC/ha, Melastomataceae con un 6,2 tC/ha, Asteraceae con un 2,94 tC/ha y el resto de familias capturando un 29,62 tC /ha, de esta manera almacenando un total de 55,68 tC/ha, A pesar de que en ambos sitios de investigación existan las mismas familias presentan una cantidad carbono diferenciado, esta gran diferenciación, se debe a que estas familias contienen especies catalogadas como “climax”, es decir, que aparecen en estadios

finales de sucesión, mientras que en nuestro estudio, las familias dominantes son aquellas con especies denominadas de sucesión temprana e intermedia.

Las especies abundantes que almacena un mayor contenido de carbono en el estudio de Mapstone (2017) para el bosque secundario de 15 años son: *Weinmannia macrophylla* capturando un 7,38 tC/ha con 48 % del contenido de carbono , seguida de *Cyathea* sp con el 3,85 tC/ha (25 %), *Exarata chocoensis* con un 2,3 tC/ha (19 %), *Miconia* sp. con el 0,77 tC/ha (5 %) y otras especies con capturando un 0,46 tC/ha (3 %) de esta manera almacenando un total de biomasa aérea de 15, 38 tC/ha. Otro estudio realizado en el bosque primario montano bajo del sur del Ecuador las especies que presentan un mayor contenido de carbono son *Pseudolmedia laevigata* con un 27,61 tC/ha, esta especie en conjunto con *Otoba parvifolia*, *Nectandra reticulata*, *Vochysia paraensis*, *Ficus* sp. y *Elaegia obovata* captutan un 82,14 tC/ha correspondiente el 51 % de carbono total y otras especies en conjunto almacenando un 78,92 tC/ha (49 %), así capturando un total de 161,07 tC/ha (Lozano et al., 2017). Al contrastar con los resultados obtenidos del presente estudio las especies más abundantes que almacenan altos cantidades de carbono son: *Alnus acuminata* con un 20,4 tC/ha correspondiendo al 65,3 %, *Myrsine sodiroana* con el 2,8 tC/ha (9 %), *Siparuna muricata* con un 1,4 tC/ha (4,5) y otras incluida la *Weinmannia sorbifolia* y *Weinmannia glabra* con el 6,68 tC/ha (21,2 %). Esta diferenciación de especies y captura de carbono se encuentran ligado directamente por la ubicación geográfica, piso altitudinal, estado del aérea (intervenido / no intervenido), tipo de bosque (primario / secundario). El área de estudio es característico de un bosque secundario en proceso de recuperación, ya que cuenta con un gran porcentaje de una especie pionera conocida como *Alnus acuminata*, mientras que en los estudios comparados son áreas en estado de recuperación (Masptone, 2017) y de áreas no intervenidas (Lozano, 2017).

7.2. Carbón almacenado en la necromasa

Según Ravindranath y Ostwald (2008), la biomasa presente en la hojarasca, madera muerta caída y árboles muertos en pie capturan al menos el 10 % del total de reservas de carbono de los bosques, mientras que la necromasa del presente estudio almacena un 22 % del contenido de carbono, esta gran diferenciación se debe a diversos factores como: el clima, la topográficos, presencia de microorganismos descomponedores, además del tipo de bosque, ya que la zona de estudio se caracteriza por ser un bosque secundario montano que presenta especies de rápido crecimiento y propagación como la especie *Alnus acuminata*.

De acuerdo a Mapstone (2018) la necromasa almacena un total de 14,15 tC/ha dentro del bosque secundario (15 años) de la Reserva Ríoa Guajalito de Quito, lo que difiere con los resultados del presente estudio del área de restauración con 8,64 tC/ha. Esto demuestra que el

uso anterior y estado de un ecosistema es muy importante para su restauración y fijación de carbono, ya que en el caso del bosque del Río Guajalito, este ecosistema fue talado sin provocar ningún tipo de erosión en el suelo (Mapstone, 2018), en contraste con nuestra área de estudio, ya que su uso anterior fue pastizal. Guariguata y Ostertag (2001) manifiestan que los bosques secundarios son eficientes en la mitigación del cambio climático, a través de la tasa de fijación de carbono superior en comparación a los bosques primarios, tal como es el caso del bosque no intervenido del ACMUS del cantón Celica; ya que, presenta un almacenamiento de carbono de 11,63 tC/ha a nivel de necromasa (FORAGUA, 2019), siendo este inferior al bosque secundario de la reserva Rio Guajalito. Por lo que, se prevé que el almacenamiento de carbono en el área de restauración pasiva de la reserva “EL Crista” a largo plazo supere al contenido de carbono del bosque primario.

7.2.1. Carbono almacenado en hojarasca

La hojarasca almacena un $4,16 \pm 0,24$ tC/ha, siendo este similar a los resultados obtenidos por Alvarado (2019) quien registraron un almacenamiento de carbono de hojarasca de 4,7 tC/ha de un bosque montano nativo dentro de la Reserva de la Biosfera Macizo del Cajas. Esta igualdad de resultados se debe posiblemente a la similitud florista de la vegetación del bosque montano siempre verde, lo que implica una acumulación, caída y captura de carbono similar. No obstante, un estudio realizado por Dilas y Huaman (2022) obtuvieron un almacenamiento de carbono de en la hojarasca de 6,72 tC/ha de un bosque montano no intervenido. La diferencia de resultados es debido a la intervención que ha sufrido el área de estudio en el pasado de esta manera influyendo en la dinámica de los reservorios de carbono (Terán et al., 2019). De igual manera, se debe a la dinámica que presentan cada uno de los bosques a lo largo del tiempo, la dinámica del bosque consiste en los cambios de la vegetación (estructura y composición de especies), el mismo que es medido por tres indicadores como: crecimiento de rodal, la tasa de reclutamiento y mortalidad (Aguirre, 2013), siendo este último afectado por los factores ambientales tales como el viento y pendientes pronunciadas que provocan el desplazamiento de las hojas y defoliación del árbol tal y como es el caso de la especie dominante *Alnus acuminata*, ya que sus hojas son consideradas como caducifolias, de esta manera contribuyendo en la cantidad de hojarasca (Doll et al., 2008). Así mismo, se debe considerar que la tasa de descomposición de hojarasca se ve afectada por las condiciones climáticas como la humedad y la temperatura tanto del ambiente como del suelo (Barriga, 2000). Esto se puede evidenciar en la parcela uno y tres, ya que son aquellas áreas que presentan mayor contenido de carbono en este componente.

7.2.2. Carbono almacenado en árboles muertos en pie

De acuerdo a los resultados obtenidos por Restrepo et al. (2016) dentro de los bosques secundarios montanos maduros los árboles muertos en pie estiman un almacenamiento de carbono de 2,2 tC/ha, lo que se asemeja significativamente con el resultado obtenido del presente estudio que fue de $2,92 \pm 0,70$ tC/ha. Esto se debe a que en ambas zonas de estudio se encuentran en proceso de regeneración natural, luego de haber sufrido una pérdida considerable de vegetación, ocasionada por la instalación de pastizales destinados para el pastoreo del ganado. Por lo general, la muerte de los árboles ocurre de manera directa, ya sea por el estrés hídrico y privación de carbono o indirectamente por el ataque de plagas (Allen, 2017). La muerte de los árboles en el área de restauración pasiva se da principalmente por la presencia de la especie invasora *Chusquea* sp. la misma que suprime a las especies arbóreas y la competencia de nutrientes y luz de las especies, esto se puede evidenciar en las parcelas dos y tres.

7.2.3. Carbono almacenado en madera muerta caída

En cuanto a la madera muerta caída sobre el suelo se estimó un almacenamiento de carbono de $1,60 \pm 0,88$ tC/ha, mientras que Mapstone (2017) obtuvo un almacenamiento de carbono de 2,42 tC/ha en un bosque secundario de 15 años de la reserva Rio Guajalito de Quito. Esta desigual de resultados, se ve directamente relaciona con el uso anterior que tuvo cada zona de estudio, ya que la reserva El Cristal fue destinada para el pastoreo del ganado, mientras que el área de la reserva Guajalito fue talado y desde entonces se ha regenerado (Mapstone, 2017).

Según los resultados antes mencionados la restauración de los bosques es fundamental para combatir el cambio climático y recuperar los servicios ecosistémicos como: regulación del clima, regulación hídrica, protección de suelos y almacenamiento de carbono. Por esta razón, la restauración de los bosques es importante ya que actúan como sumideros de carbono, siendo este el segundo reservorio más grande del planeta después del océano (Veit et al., 2023).

8. Conclusiones

- El carbono total almacenado de una parcela permanente del bosque montano del área de restauración pasiva con edades de recuperación de 20, 25, 35 y 40 años capturan un promedio de carbono de 40,00 tC/ha en relación al AGB y necromasa, adicionalmente el área de 20 y 40 años de abandono almacena entre 29,2 y 51,3 tC/ha capturado en total 1657,392 tC/ha en 41,28 ha de bosque en estado de restauración pasiva.
- La biomasa aérea (AGB) presenta una recuperación entre 20 y 40 años, de esta manera almacenando el 38,69 % (31,30 tC/ha) del contenido de carbono en relación al bosque siempreverde andino montano (80,89 tC/ha), estos resultados muestran la importancia que tiene la implementación de estrategias de restauración ecológica en el mantenimiento de los contenidos de carbono para la mitigación del cambio climático.
- El área de restauración pasiva de la reserva “El Cristal” con 20 a 40 años de recuperación posee el 55,49 % (8,68 tC/ha) del contenido de carbono de necromasa en relación al bosque siempreverde andino montano (15,64 tC/ha), estos resultados muestran la importancia que tiene la implementación de estrategias para la restauración y conservación de los contenidos de carbono para la mitigación del cambio climático.
- La ABG posee un almacenamiento de carbono diferente a la necromasa, ya que el ABG almacena el CO₂ convirtiéndolo en carbohidratos para el desarrollo de la planta a partir del proceso de la fotosíntesis, mientras que el carbono que se encuentra capturado en la necromasa (hojarasca, árboles muertos en pie y madera caída muerta) es liberado a la atmósfera dependiendo del grado de descomposición (factores ecológicos, densidad de la madera y tiempo), la deforestación de bosques liberan grandes cantidades de carbono que son devueltos a la atmósfera. Por esta razón es de fundamental importancia implementar estrategias de conservación y restauración con el fin de frenar el cambio climático.
- El área de estudio presenta un gran número de individuos en la clase diamétrica de 5 a 9,9 cm de DAP, mientras que la clase diamétrica ≥ 40 cm de DAP presenta un menor número de individuos o árboles longevos, a pesar de esto el almacenamiento de carbono es mayor, esto nos indica que el área se encuentra en estado de regeneración natural, sin embargo, a largo plazo la dinámica del bosque hará que el número de individuos aumente en las clases diamétricas superiores, así demostrando que el área se ha recuperado por completo.

9. Recomendaciones

- Para posteriores investigaciones realizar la estimación del almacenamiento de carbono del componente suelo, con el fin de conocer la cantidad de carbono presente en la zona de estudio, ya que esta área se encuentra en estado de recuperación debido a su uso anterior.
- Estimar el almacenamiento de carbono de raíces de árboles muertos, con fin de conocer el almacenamiento total de la zona de estudio.
- Dar a conocer a la sociedad en general la importancia que tiene los bosques en la mitigación del cambio climático a través de la captura y almacenamiento de carbono; y siendo esto es posible si se realiza una valoración económica del bosque montano.
- A mediano plazo realizar un estudio sobre la dinámica del almacenamiento de carbono, tomando en cuenta la mortalidad y reclutamiento de las especies.
- La recolección de muestras botánicas debe ir a la par con la toma de datos dasométricos o al menos después de finalizar el inventario de una parcela, ya que la identificación de especies es necesaria para precisar los valores de la densidad de cada una de las especies presentes en la zona.
- Recolectar el mayor número de muestras posibles “core”, extraídas de madera muerta caída de las diferentes clases de descomposición de la madera (intermedia y podrida), con el fin de tener un respaldo, ya que las muestras intermedias y podridas son muy inestables, lo que provoca que la muestras se dañen.
- Para evitar que la muestra de madera podrida se deteriore, se debe utilizar recipientes pequeños con medidas volumétricas, permitiéndonos a la vez poder calcular el volumen de la muestra sin tener muchas complicaciones, este mismo dato junto con el peso en seco nos permitirá conocer la densidad de la madera.
- Calcular el volumen en verde del “core” de la madera muerta caída por el método de desplazamiento de agua, siguiendo todos los pasos adecuados con el fin de no presentar un resultado de volumen erróneo.
- Para llevar a cabo la recolección de hojarasca, se debe tener en cuenta las condiciones climáticas, debido a que si la hojarasca, esta mojada puede provocar alteraciones en la relación de peso húmedo y seco, además al momento de pesar las muestras, procurar asentar la balanza en una superficie plana con el fin de obtener un peso más exacto.

10. Bibliografía

- Acosta, M., Quednow, K., Etchevers, J., y Monreal, C. (2001). Un método para la medición del carbono almacenado en la parte aérea de sistemas de vegetación natural e inducida en terrenos de ladea en México. <https://n9.cl/ap0ari>.
- Aguirre, N. (2013). *Estructura y dinámica del ecosistema forestal*. <https://nikolayaguirre.com/wp-content/uploads/2013/04/4-estructura-y-dinamica-de-bosques.pdf>
- Aguirre, Z. (2018). Estimación del carbono acumulado en una parcela permanente de bosque andino en el parque universitario Francisco Vivar Castro, Loja, Ecuador. *Revista Arnaldoa*, 25(3), 939-952. <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.253.25307>.
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). (2023). *Emisiones de Dióxido de Carbono*. Epa. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>.
- Alarcón, K. (2009). *Existencias de necromasa en bosques vírgenes y manejados de Lenga en la XII Región*. [Tesis de Grado. Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/151560/Existencias-de-necromasa-en-bosques-virgenes-y-manejados-de-lenga-%28Hothofagus-pumilio-%28Poeppe-et-Endl%29-Krasser%29-en-la-XII-Region.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Allen, C. (2017). Muerte regresiva del bosque inducida por el clima: ¿un fenómeno mundial en aumento?. *Fao*. <https://www.fao.org/4/i0670s/i0670s10.htm>
- Alvarado, C. (2019). *Relaciones entre la estructura y cobertura arbórea con el carbono almacenado*. [Tesis de Grado. Universidad de Cuenca]. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/33587>
- Baiker, J. (2023). *Los bosques andinos y el cambio climático*. [bosquesandinos.org](https://www.bosquesandinos.org/los-bosques-andinos/). <https://www.bosquesandinos.org/los-bosques-andinos/>.
- Barrera, J. (2016). *La restauración de ecosistemas*. Ecoremedi. <https://ecoremedi.es/que-es-la-restauracion-ecologica/>.
- Böhning-Gaese, K., Jetz, W., y Schaefer, H. (2008). Impact of climate change on migratory birds: community reassembly versus. *Global Ecology and Biogeography*, 38-49.
- Brown, S. y Lugo, A. (1990). Tropical secondary forests. *Journal of Tropical Ecology*, 6, 1-32.
- Burneo, J. (2020). *Diseño arquitectónico de bajo impacto ambiental de un centro de investigación científica en la reserva “El Cristal” del cantón y provincia Loja*. [Tesis

- de Grado, Universidad Internacional del Ecuador].
<https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/4105>.
- Bussmann, R. (2005). Bosques andinos del sur de Ecuador, clasificación, regeneración y uso. *Revista Perú biología*. 12(2), 204. <https://n9.cl/s50an>.
- Cairns, M., Brown, E., y Helmer, G (1997). Root biomass allocation in the world's upland forest. *Oecologia* 111: 1-11.
- Caray, J. (2023). El CO2 acumulado en el planeta rompió récord en 2022. *Wired*.
<https://es.wired.com/articulos/el-c02-acumulado-en-el-planeta-rompio-record-en-2022>.
- Casanoves, F., Jara, M., y Leon, M. (2017). *Estimación del carbono a partir de inventarios forestales nacionales Buenas prácticas para la recolección, manejo y análisis de datos*. Catie. <https://labmeh.catie.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Casanoves-et-al-2017-Manual-buenas-pr%C3%A1cticas-INF.pdf>.
- Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIIFEN) .(2022). ¿Qué es el cambio climático? <https://ciifen.org/que-es-el-cambio-climatico/>.
- Centro para la Investigación Forestal Internacional (CIFOR). (2008). *El impacto del clima sobre los bosques podría destruir la biodiversidad, empobrecer las vidas de millones de personas, e incrementar las emisiones de gases de efecto invernadero*.https://www.cifor.org/publications/pdf_files/media/CIFORMediaRelease-2008_11_28_spanish.pdf.
- Chambers, J., Higuchi, N., Schimel, J., Ferreira, L., y Melack, J. (2000). Decomposition and carbon cycling of dead trees in tropical forests of the central Amazon. *Oecologia*, 122,380-388.36.
https://repository.si.edu/bitstream/handle/10088/1265/Chambers_BDFFP_2000.pdf?sequence=1.
- Chave, J., Réjou, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M., Delitti, W., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez, A., Mugasha, W., Muller, H., Mencuccini, M., Nelson, B., Ngomanda, A., Nogueira, E., Ortiz, E., Péliissier, R., Ploton, P., Ryan, C., Saldarriaga, J., y Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>.
- Cisternas, P. 1994. Conversión de densidades de la madera. *Ciencia e Investigación Forestal* 8(2): 300-

- 315.<https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/10864/18562.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Contreras, F., Leaño, C., Licona, J., Dauber, E., Gunnar, L., Hager, N., y Caba, C. (1999). Guía para la Instalación y Evaluación de Parcelas Permanentes de Muestreo (PPMs). https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/Pnacg821.pdf.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). (2015). *El Acuerdo de París*. unfccc. <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- Cuesta, F., Peralvo, M., y Valarezo, N.(2009). *Los bosques montanos de los Andes Tropicales. Una evaluación regional de su estado de conservación y de su vulnerabilidad a efectos del cambio climático*. Secretaria general de la comunidad Andina. https://www.bosquesandinos.org/wp-content/uploads/2020/10/B_montanos.pdf.
- Cuevas, R., Martínez, S., Garcia, J., y Román, D (2014). Carbono orgánico de la hojarasca en los bosques de la reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, caso santuario sierra Chincua, México. *Revista de investigación agraria y ambiental*.(5)1: 29-45. <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5344964.pdf>
- Delgado, L., y Perez, R. (2002). La madera muerta en los ecosistemas forestales. *Forestal Veracruzana*. 4(2):59-66. <https://www.redalyc.org/pdf/497/49740209.pdf>
- DeWalt, S., Maliakal S., y Denslow, J. (2003). Changes in vegetation structure and composition along a tropical forest chronosequence: implications for wildlife. *Forest Ecology and Management*.182(1-3):139-151. https://www.researchgate.net/publication/222408422_Changes_in_vegetation_structure_and_composition_along_a_tropical_forest_chronosequence_Implications_for_wildlife.
- Dilas, J., y Huamán, A. (2020). Captura de carbono por un bosque montano de neblina del Perú. *Revista de Investigación Científica y Tecnológica Alpha Centauri*. 1(3), 20. <https://journalalphacentauri.com/index.php/revista/article/view/16/19>.
- Ewel, J. (1980). Tropical succession: manifold routes to maturity. *Biotropica* 12 (Suppl. Trop. Succession): 2-7.
- Fernández, F. Loidi, J., Moreno, J., Del Arco, M., y Fernández, A. (2005). *Impactos sobre la biodiversidad vegetal. Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*.https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/evaluacion_preliminar_impactos_2005_tcm30-178491.pdf

- Fondo Regional del Agua (FORAGUA). (2019). Stock y captura de carbono. *foragua*. http://www.foragua.org/?page_id=1427https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6788/1/La%20Biodiversidad.pdf.
- Gann, G., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C., Jonson, J., Eisenberg, C., Guariguata, M., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K., y Dixon, K. (2019). *Principios y estándares internacionales para la práctica de la restauración ecológica*. Cdn. https://cdn.ymaws.com/www.ser.org/resource/resmgr/Spanish_SER_International_St.pdf.
- Garzuglia, M., y Saket M. 2003. Wood volume and woody biomass: review of FRA 2000 estimates. Forest Resources Assessment WP 68. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Rome, Italy. 30 p. <https://www.fao.org/4/ae153e/AE153e01.htm>
- Gascuña, D. (2021). *Frenar el calentamiento global restaurando ecosistemas*. Bbvaopenmind. <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/medioambiente/restaurar-ecosistemas-frenar-calentamiento-global/>.
- Gobierno de Aragón. (2023). *El cambio climático*. Aragón. <https://www.aragon.es/-/el-cambio-climatico#anchor1>.
- Gomez, P., y Cisneros, R. (2017). La restauración ecológica clásica y los retos de la actualidad: La migración asistida como estrategia de adaptación al cambio climático. *Revista de Ciencias Ambientales*. 51(2): 31-32.
- Griscom, B., Adam, J., Ellis, P., Houghton, R., Lomaz, G., Miteva, D., Schlesinger, W., Shoch, D., Siikamäki, J., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M., Herrero, M., Kiesecker, J., Landis, E., Laestadius, L., Leavitt, S., Minnemeyer, S., Polasky, S., Potapov, P., Putz, F., Sanderman, J., Silvius, M., Wollenberg, E., y Fargione, J. (2017). Soluciones climáticas naturales. *PNAS*. 114 (44) 11645-11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2003). Good practice guidance for land use, land-use change and forestry.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2006). Tierras Forestales. Directrices Del IPCC de 2006 Para Los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, 1–93.

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2006). *Guidelines for national greenhouse gas inventories*. Vol. 4, Agriculture, forestry and other land use (AFLOLU). Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2007). Cambio climático 2007 impacto, adaptación y vulnerabilidad. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/02/ar4-wg2-sum-vol-sp.pdf>.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2013): Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo Ial Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F.,D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (IPCC). (2023). hallazgos del informe del IPCC de 2023 sobre el cambio climático. *Wri*. <https://es.wri.org/insights/10-grandes-hallazgos-del-informe-del-ipcc-de-2023-sobre-el-cambio-climatico>
- Guariguata M., y Ostertag R . (2001). Sucesión del bosque secundario neotropical: cambios en las características estructurales y funcionales. *Forest Ecology and Management* 148: 185-206.
- Henao, E., Ordoñez, Y., Camino, R., y Villalobos, R. (2015). *Bosque secundario en Centroamérica*. https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7242/el_bosque_secundario_en_ca.pdf?sequence=3.
- Houghton, R. (2007). Balancing the global carbon budget. in: *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 35, 313-347. <https://n9.cl/y4azm>
- Instituto Superior del Medio Ambiente (ISM). (2019). *La restauración prioritaria de ecosistemas para luchar contra el Cambio Climático*. Ismedioambiente. <https://www.ismedioambiente.com/areas-prioritarias-para-la-restauracion-ecologica/>.
- Jaramillo, P. (2017). *Bosques y cambio climático en Ecuador: el regente forestal como actor clave en la mitigación del cambio climático* [Tesis de Grado, Universidad Andina Simón Bolívar Sede Ecuador]. <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/5862/1/T2432-MCCNA-Mogrovejo-Bosques.pdf>.

- Jorgensen, P., y Yáñez, S. (1999). Catálogo de Plantas Vasculares del Ecuador. Missouri Botanical Garden. St Louis, USA.
- Lamb, D., y Gilmour, D. (2003). "Rehabilitation and Restoration of Degraded Forests", International Union for Conservation of Nature, Gland, Switzerland y Cambridge, UK, and World Wildlife Fund, Gland, Switzerland.
- Lavelle, P., Spain, A (2003). Ecología del suelo, New York: Kluwer Academic Publishers, 2003. 677 p.
- Linero, G., Barrera, F., y Moheno, B. (2015). Estableciendo la línea de base para la restauración del bosque de niebla en un paisaje periurbano. *Madera y bosques*. 21(2), 1-13. <https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v21n2/v21n2a6.pdf>.
- Lozano, D., Palacios, B., y Aguirre, Z (2017). Modelos alométricos para estimar el almacenamiento de carbono de bosque montanos bajos en el sur de Ecuador. *Ciencia forestal*. 28 (3), 1328-1339. <https://doi.org/10.5902/1980509833464>
- MacDicken, K.. (1997). Una guía para Monitoreo del almacenamiento de carbono en Proyectos Forestales y Agroforestales. Instituto Internacional Winrock para el Desarrollo Agrícola
- Mapstone, E. (2017). Secuestro de carbono en el bosque nubloso: una evaluación comparativa de la biomasa aérea potencial de la reserva de carbono en la reserva Rio de Guajalito. *Colección de Proyecto de Estudio Independiente*. https://digitalcollections.sit.edu/isp_collection/2726/?utm_source=digitalcollections.sit.edu%2Fisp_collection%2F2726&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages.
- Marchese, C. (2015). Biodiversity hotspots: A shortcut for a more complicated concept. *Global Ecology and Conservation*. 3 (2015) 297–309. [10.1016/j.gecco.2014.12.008](https://doi.org/10.1016/j.gecco.2014.12.008).
- Martínez, J., y Borja de la Rosa, A (2005) Características tecnológicas de la madera de palo morado (*Peltogyne mexicana* Martínez) de Tierra Colorada, Guerrero, México. *Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 11(1):78-82. <https://www.redalyc.org/pdf/629/62911110.pdf>.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE); Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT (FAO). (2014). Resultados de la Evaluación Nacional Forestal- Ecuador. Quito .316 p. http://190.152.46.74/documents/10179/185860/Evaluaci%C3%B3n+Nacional+Forestal_1_NREFD+1.pdf/955aaa38-34b6-4b4d-9278-8fe915df893f

- Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE); Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2015). Especies forestales arbóreas y arbustivas de los bosques montaños del Ecuador. <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/55826.pdf>
- Ministerio del Ambiente de Ecuador (MAE). (2018). Estadísticas del Patrimonio Natural del Ecuador Continental. https://proamazonia.org/wpcontent/uploads/2019/10/ECUADOR_Folleto_Patrimonio_Natural_compressed.pdf
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE). (2014). *Programa Socio Bosque*. <https://www.cbd.int/doc/meetings/ecr/cbwecr-sa-01/other/cbwecr-sa-01-ecuador-es.pdf>
- Mola, I., Torres, R., y Sopeña, A.(2015). *Guía práctica de restauración ecológica* https://ieeb.fundacionbiodiversidad.es/sites/default/files/guia_practica_re_0.pdf.
- Murdiyarsa, D., Skutsch, M., Guariguata, M., Kanninen, M., Luttrell, C., Verweij, P., y Stella, O.(2008). *Medición y monitoreo de degradación forestal para REDD: Implicaciones de las Circunstancias del País*. Cifor. https://www.cifor.org/publications/pdf_files/Infobrief/016-infobrief.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2019). Manual de restauración forestal Metodología y tecnologías. https://info.napo.gob.ec/wpcontent/uploads/2022/06/Manual_Restauracion_Productiva.pdf.
- Organización de Naciones Unidas (ONU). (2019). *Nueva Década de las Naciones Unidas para la Restauración de los Ecosistemas puede inspirar medidas audaces*. Unep. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/nueva-decada-de-las-naciones-unidas-para-la-restauracion-de-los>.
- Organización Panamericana de la Salud. (OPS). (2017). Cambio climático y salud. *Paho*. <https://www.paho.org/es/temas/cambio-climatico-salud>
- Ortiz, R. (1997). Costa Rican secondary forest: an economic option for joint implementation initiatives to reduce atmospheric CO₂. https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7035/Co2_Mitigation_of_service_of_Costa_Rican_secondary_forests.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Ravindranath, N., y Ostwald, M. (2008). *Manual de métodos de inventario de carbono para el inventario de gases de efecto invernadero, carbono. Proyectos de mitigación y producción de madera rolla*. Researchgate.

https://www.researchgate.net/publication/316816545_Carbon_Inventory_Methods_Handbook_for_Greenhouse_Gas_Inventory_Carbon_Mitigation_and_Roundwood_Production_Projects/references

- Rios, O., Díaz, J., Reyes, S., y Gómez, P. (2012). *Guías técnica técnica para la restauración ecológica de los ecosistemas de Colombia* https://asogras.org/wp-content/uploads/2017/05/Anexo_8_Guias_Tecnicas_Restauracion_Ecologica_2.pdf
- Pearson, T., Walker, S., y Brown, S. (2005). Sourcebook for Land use, Land-use change and forestry projects. *Winrock International and the BioCarbon Fund of the World Bank* 57 (2005), 21(3), 64. https://winrock.org/wp-content/uploads/2016/03/Winrock-BioCarbon_Fund_Sourcebook-compressed.pdf.
- Perea, M., Andrade, H., y Segura, M. (2021). Estimación de Biomasa Aérea y Carbono con Teledetección en Bosques Alto-Andinos de Boyacá, Colombia. Estudio de caso: Santuario de Fauna y Flora Iguaque. *Revista Cartográfica*, 102, 91–123. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i102.821>.
- Pérez, M., y Díaz, J. (2010). *Estimación del carbono contenido en la biomasa forestal aereada dos bosques andinos en los departamentos de Santander y Cundinamarca*. [Tesis de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <https://n9.cl/m5dbwa>.
- Ponce-Hernandez, R., Koohafkan, P., y Antoine, J. (2004). Evaluación de existencias de carbono y modelización escenarios beneficiosos para todos en materia de secuestro de carbono mediante cambios en el uso de la tierra, Convocatoria de la FAO n.º 631.4 (E),FAO, Roma, Italia.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2023). *Cómo pueden ayudarnos los bosques a limitar los impactos del cambio climático*. Climatepromise. <https://climatepromise.undp.org/es/news-and-stories/como-pueden-ayudarnos-los-bosques-limitar-los-impactos-del-cambio-climatico>.
- Ramírez, J., Córdova, M., Imbaquingo, J., y Chagna, E. (2022). Modelos alométricos para estimar biomasa aérea en bosques secundarios montanos del noroccidente de Ecuador. *Caldasia*. 44 (1): 1-13. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-52322022000100082.
- Restrepo, H., y Galeano, O. (2012). Estructura de bosques secundarios y matorrales montanos bajos en el norte Antioquia, Colombia. *Colombia Forestal* .15 (2),173-189. <https://n9.cl/agtx5f>

- Rodríguez, R., Perez, J., Calderon, O., y Garza, E. (2006). *Estimación del carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México*. Ciencia UANL. http://eprints.uanl.mx/1750/1/art_del_carbono.pdf.
- Rojas, A., y Toribio, M. (2021). Restaurar para conectar bosques. INECOL. <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/1541-restaurar-para-conectar-el-bosque>
- Samaniego, J., Galindo, L., Marasovic, S., Carbonell, J., Alatorre, J., y Reyes, O. (2017). *El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad de América Latina*. Cepal. https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/sintesis_pp_cc_cc_y_sus_efectos_en_la_biodiversidad.pdf.
- Sanchez, C. (2020). Baja extrema de caudales provoca graves problemas ambientales. *Elmercurio*. <https://www.elmercurio.com.ec/2020/11/18/baja-extrema-de-caudales-puede-provocar-graves-problemas-ambientales/>
- Sanquetta, C., Farinha, L., y Eduardo, J. (2008). Ecuaciones de biomasa aérea y subterránea en plantaciones de Pinus taeda en el sur del Estado de Paraná, Brasil. Universidad Federal del Paraná, Departamento de Ciencias Forestales. *Revista Patagonia Forestal*.
- Sarango, F., y Tenempaguay, W. (2020). *Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea, necromasa (hojarasca) y en el suelo en un bosque de pino en la comuna paquizhapa (provincia de Loja)*. [Tesis de Grado. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19153/1/UPS-CT008822.pdf>.
- Seidl, R. (2021). Madera muerta en el ciclo global de carbono. *distritoforestal*. <https://distritoforestal.es/ciencia-y-tecnica/selvicultura-y-pascicultura/la-madera-muerta-en-el-ciclo-global-del-carbono>
- Serrano, P. (2022). *Comó Ecuador protege a los bosques Amazónicos*. Undp. <https://www.undp.org/es/latin-america/blog/como-ecuador-protege-los-bosques-en-la-amazonia>.
- Smith, J., Sabogal, C., Jong, W., y Kaimowitz, D. (1997). *Bosques secundarios como recurso para el desarrollo rural y la conservación ambiental en los trópicos de América Latina*. https://www.cifor.org/publications/pdf_files/OccPapers/OP-13.pdf.
- Smith, O. (2024). Ciclo del Carbono. *Storyboardthat*. <https://www.storyboardthat.com/es/lesson-plans/ciclo-del-carbono>.
- Sociedad internacional para la restauración (SER). (2016). *Normas internacionales para la práctica de restauración ecológica- Incluyendo principios y coceptos claves*.

https://cdn.ymaws.com/www.ser.org/resource/resmgr/custompages/publications/SER_Primer/ser-primer-spanish.pdf.

- Tejedor Garavito, N., Álvarez, E., Arango Caro, S., Araujo Murakami, A., Blundo, C., Boza Espinosa, T.E., La Torre Cuadros, M.A., Gaviria, J., Gutiérrez, N., Jørgensen, P.M., León, B., López Camacho, R., Malizia, L., Millán, B., Moraes, M. Pacheco, S., Rey Benayas, J.M., Reynel, C., Timaná de la Flor, M., Ulloa Ulloa, C., Vacas Cruz, O., y Newton, A.C. (2012). “Evaluación del estado de conservación del bosque montano en los Andes tropicales”. *Ecosistemas* 21(1-2) 148-166.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54026849012>.
- Temperton, V., y Hobbs R. (2004). The search for ecological assembly rules and Its relevance to restoration ecology. En V. Temperton, R. Hobbs, T. Nuttle y S. Halle (eds). *Assembly rules and restoration ecology - Bridging the gap between theory and practice*. Island Press. Washington D.C.
- Terán, A., Pinto, E., y Cuesta, F. (2019). Carchi y sus bosques montanos: investigación y conservación. Proyecto EcoAndes, CONDESAN, Quito, Ecuador.
- The Nature Conservancy y Amazon Conservation Team (2019) Protocolo para la estimación y el monitoreo del carbono en coberturas forestales y no forestales de Colombia. *Colombia*.
https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/AFC_Protocolo_Carbono_Pagina_Baja.pdf.
- Toledo, E., y Cisnero, H. (1999). *Estrategia para implementar las recomendaciones de la propuesta de pucallpa sobre el desarrollo sostenible del bosque secundario*. Otca. <http://otca.org/wpcontent/uploads/2021/02/Estrategia-para-Implementar-las-Recomendaciones.pdf>.
- Triana, J., Rios, O., y Eraso, N. (2023). La nucleación: Una alternativa para la restauración ecológica de bosques neotropicales. *Ojs*.
https://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/2134/1444.
- Ulate, C (2011). *Análisis y comparación de la biomasa aérea de la cobertura forestal según zonade vida y tipo de bosque para Costa Rica*. [Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Cartago, Costa Rica.
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3005/Informe_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Urgilés, J. (2019). *Valoración económica del almacenamiento de carbono por biomasa aérea en bosques montanos de la cordillera occidental de los Andes*. [Tesis de Grado,

Universidad de Cuenca].
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/32062/1/Trabajo%20de%20titulaci%C3%B3n.pdf>.

- Vásquez, A., y H. Arellano. (2012). Estructura, biomasa aérea y carbono almacenado en los bosques del Sur y Noroccidente de Córdoba. In: Rangel Ch., J.O. (ed.). Colombia. Diversidad Biótica XII. La región Caribe de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. pp: 923-961.
<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1208/1208.0248.pdf>
- Veit, P., Gibbs, D., y Reytar, K. (2023). Bosques indígenas: algunos de los últimos sumideros de carbono de la Amazonía . *wri*. <https://es.wri.org/insights/bosques-indigenas-algunos-de-los-ultimos-sumideros-de-carbono-de-la-amazonia>.
- Webster, GL. (1995) The Panorama of Neotropical Cloud Forests. Biodiversity and Conservation of Neotropical Motatne Forests.s.l. 53-77 p.
- Yepes, A., del Valle, J., Jaramillo, S., y Orrego S. (2010). Recuperación estructural en bosques sucesionales andinos de Porce (Antioquia, Colombia). *Rev. Biol. Trop.* 58(1)427-445. <https://doi.org/10.15517/rbt.v58i1.5220>
- Zanini, K., Bergamin R., Machado R., Pillar V., y Muller, C. (2014). Atlantic rain forest recovery: Successional drivers of floristic and structural patterns of secondary forest in Southern Brazil. *J. Veg. Sci.* 25(43):1056-1068. <https://doi.org/10.1111/jvs.12162>
- Zaninovich, S. (2017). Dinámica y almacenamiento del carbono en la necromasa y el suelo de ecosistemas forestales: efecto de la degradación del bosque nativo y su reemplazo por plantaciones de *Pinus taeda* L. en el NE de Argentina. [Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Nordeste], Argentina. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/84021>
- Zanne, Amy E. et al. (2009). Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum [Dataset]. Dryad. <https://doi.org/10.5061/dryad.234>
- Zimmermann, K., Aide, T., Rosario, M., Serrano, M y Herrera, L (1995). Effects of land management and a recent hurricane on forest structure and composition in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Forest Ecology and Management* 77: 65-7.

11. Anexos

Anexo 1. Hoja de campo para recolección de datos de individuos arbóreos.

Coordenadas UTM					Lugar			
Altitud (msnm)					Fecha:			
Parcela N°	Subparcela N°	Individuo N°	Árbol individual (1) o bifurcado (0)	Nombre científico	Familia	H (m)	Dap (cm)	Observaciones

Anexo 2. Carbono almacenado por familia botánica en biomasa aérea en un área de restauración pasiva bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.

Familia	Número de individuos	Carbono fijado	Carbono promedio
Betulaceae	249	81,79	20,45
Primulaceae	285	12,55	3,14
Siparunaceae	149	5,87	1,47
Lauraceae	41	4,12	1,03
Solanaceae	107	3,79	0,95
Asteraceae	53	2,37	0,59
Myrtaceae	63	2,11	0,53
Urticaceae	60	2,09	0,52
Rosaceae	21	1,61	0,40
Rhamnaceae	32	1,32	0,33
Sapindaceae	9	1,10	0,27
Rubiaceae	26	1,02	0,25
Euphorbiaceae	10	0,97	0,24

Cunoniaceae	12	0,64	0,16
Hypericaceae	7	0,63	0,16
Viburnaceae	29	0,45	0,11
Meliaceae	5	0,41	0,10
Actinidiaceae	17	0,41	0,10
Araliaceae	8	0,29	0,07
Melastomataceae	15	0,23	0,06
Clusiaceae	7	0,22	0,05
Myricaceae	1	0,21	0,05
Ericaceae	5	0,16	0,04
Rubiaceae	3	0,16	0,04
Podocarpaceae	3	0,13	0,03
Clethraceae	3	0,11	0,03
Thymelaeaceae	2	0,09	0,02
Piperaceae	13	0,09	0,02
Heliotropiaceae	4	0,07	0,02
Cornaceae	1	0,06	0,02
Monimiaceae	2	0,05	0,01
Moraceae	4	0,05	0,01
Caricaceae	1	0,03	0,01
Staphyleaceae	2	0,03	0,01
Lamiaceae	3	0,02	0,01

Anexo 3. Carbono almacenado por especie botánica en biomasa aérea en un área de restauración pasiva bosque siempreverde montano del sur de la cordillera oriental de los Andes de la reserva “El Cristal”.

Especies	Numero de individuos	Carbón fijado	Carbón fijado promedio
<i>Alnus acuminata</i> Kunth	249	81,79	20,4
<i>Myrsine sodiroana</i> (Mez) Pipoly	242	11,29	2,8
<i>Siparuna muricata</i> (Ruiz & Pav.) A. DC.	144	5,58	1,4
<i>Solanum abitaguense</i> S. Knapp	102	3,70	0,9
<i>Ocotea</i> sp. Aubl.	24	2,77	0,7
<i>Critoniopsis pycnantha</i> (benth.) H. Rob.	23	1,59	0,4
<i>Boehmeria caudata</i> (Burm.f.) J.J.Sm.	46	1,47	0,4
<i>Hesperomeles obtusifolia</i> (Pers. Lindl.)	19	1,40	0,4
<i>Myrcia splendens</i> (Sw.) DC	49	1,35	0,3
<i>Frangula granulosa</i> (Ruiz & Pav.) Grubov	32	1,32	0,3
<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R. Br. Ex Roem. & Schult.	42	1,24	0,3
<i>Cupania americana</i> L.	9	1,10	0,3
<i>Dioicodendron dioicum</i> (K. Schum. & k. Krause) Steyerm	25	1,01	0,3
<i>Nectandra lineatifolia</i> (Ruiz & Pav.) Mez	5	1,01	0,3
<i>Euphorbia laurifolia</i> Juss. Ex Lam.	10	0,97	0,2
<i>Myrcia glomerata</i> (Cambess.) G. P. Burton & E. Lucas	13	0,75	0,2
<i>Vismia tomentosa</i> Ruiz & Pav.	7	0,63	0,2
<i>Verbesina pentantha</i> S.F. Blake	22	0,49	0,1
<i>Urera caracasana</i> (Jacq.) Gaudich. Ex Griseb.	5	0,45	0,1
<i>Viburnum triphyllum</i> Benth.	29	0,45	0,1
<i>Cedrela montana</i> Turcz.	5	0,41	0,1
<i>Saurauia bullosa</i> Wawra	17	0,41	0,1
<i>Weinmannia sorbifolia</i> Kunth	5	0,39	0,1

<i>Gynoxys laurifolia</i> (Kunth) Cass.	8	0,29	0,1
<i>Siparuna</i> sp. Aubl.	5	0,29	0,1
<i>Weinmannia glabra</i> L. F.	7	0,25	0,1
<i>Dendropanax</i> sp. Decne. & Planch.	4	0,24	0,1
<i>Prunus opaca</i> (Benth.) Walp.	2	0,22	0,1
<i>Myrica pubescens</i> Humb. & Bonpl. Ex Willd.	1	0,21	0,1
<i>Clusia alata</i> Planch. & Triana	6	0,19	0,0
<i>Phenax hirtus</i> (Sw.) Wedd.	9	0,17	0,0
<i>Bejaria aestuans</i> Mutis	5	0,16	0,0
<i>Tournefortiopsis hirsuta</i> (Ruiz & Pav.) Borhidi	3	0,16	0,0
<i>Aiouea montana</i> (Sw.) R.Rohde	4	0,15	0,0
<i>Miconia obscura</i> (Bonpl.) Naudin	10	0,15	0,0
<i>Nectandra laurel</i> Klotzsch ex Nees	5	0,11	0,0
<i>Clethra revoluta</i> (Ruiz & Pav.) Spreng	2	0,10	0,0
<i>Daphnopsis espinosae</i> Monach.	2	0,09	0,0
<i>Piper ecuadorensis</i> Sodiro.	13	0,09	0,0
<i>Prumnopitys montana</i> (Humb. & Bonpl. Ex Willd.) de Laub.	2	0,09	0,0
<i>Nectandra reticulata</i> (Ruiz & Pav.) Mez	3	0,08	0,0
<i>Tournefortia fuliginosa</i> Kunth	4	0,07	0,0
<i>Cestrum</i> sp. L.	2	0,06	0,0
<i>Cornus peruviana</i> J. F. Macbr.	1	0,06	0,0
<i>Miconia cajanumana</i> Wurdack	3	0,05	0,0
<i>Mollinedia</i> sp. Ruiz & Pav.	2	0,05	0,0
<i>Podocarpus oleifolius</i> D. Don	1	0,04	0,0
<i>Cestrum auriculatum</i> Ruiz & Pav.	3	0,03	0,0
<i>Clusia elliptica</i> Kunth	1	0,03	0,0
<i>Geissanthus</i> sp. Hook. F.	1	0,03	0,0
<i>Miconia quadripora</i> Wurdack	2	0,03	0,0

<i>Turpinia occidentalis</i> (Sw.) G. Don	2	0,03	0,0
<i>Vasconcellea pubescens</i> A. DC.	1	0,03	0,0
<i>Ficus citrifolia</i> Mill.	2	0,02	0,0
<i>Lepechinia mutica</i> (benth.) Epling	3	0,02	0,0
<i>Morus insignis</i> Bureau.	1	0,02	0,0
<i>Oreopanax ecuadorensis</i> Seem.	2	0,02	0,0
<i>Oreopanax eriocephalus</i> b Harms.	1	0,02	0,0
<i>Sciodaphyllum acuminatum</i> (Pav.) Poir.	1	0,02	0,0
<i>Clethra fimbriata</i> Kunth	1	0,01	0,0
<i>Ficus</i> sp. Linnaeus	1	0,01	0,0
<i>Myrcianthes orthostemon</i> (O. Berg) Grifo	1	0,01	0,0
<i>Palicourea amethystina</i> (Ruiz & Pav.) DC.	1	0,01	0,0

Anexo 4. Certificado de traducción del resumen

Loja, 31 de agosto del 2024

Yo, Elyan Miguel Torres Cabrera, con número de cédula 1150175055, Licenciado en Ciencias de la Educación con Mención en inglés.

CERTIFICO:

Haber realizado la traducción textual del documento adjunto, correspondiente al trabajo de integración curricular denominado: **Estimación de los contenidos de carbono en un área de restauración pasiva de bosque montano de la reserva "El Cristal" cantón y provincia de Loja**, elaborado por **Jorge Luis Chávez Campos**, con número de cédula 1150207924.

Es todo lo que puedo certificar en honor a la verdad, facultando al portador el presente documento para el trámite correspondiente.

Atentamente. -



Lic. Elyan Torres Cabrera
C.I: 1150175055
Telf.: 0984661493
Correo electrónico: torreselian737@gmail.com