



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Carrera de Ingeniería Agronómica

**Relaciones entre la estructura y cobertura arbórea con el carbono almacenado
en bosques montanos Andinos en el macizo del Cajas, Azuay-Ecuador.**

*Tesis previa a la obtención del título de
Ingeniero(a) Agrónomo(a)*

AUTORES:

Isabel Lucinda Alvarado Villa

C.I: 0105794911

Carlos Santiago Cobos Miguitama

C.I:0302666664

DIRECTOR:

Ing. Ángel Oswaldo Jadán Maza M. Sc

C.I: 1103298061

CUENCA, ECUADOR

28/10/2019



RESUMEN

Los bosques montanos Andinos son ecosistemas únicos e importantes debido a la diversidad y sus diversos servicios ambientales que proveen, entre ellos el almacenamiento de carbono. En la presente investigación se generó información sobre las relaciones entre la estructura y cobertura arbórea con el carbono almacenado en bosques montanos Andinos. El estudio se realizó en los remanentes de bosques maduros del macizo del Cajas, en las localidades de Chaucha y San Gerardo, en 20 parcelas permanentes de muestreo. Se midió la cobertura y estructura arbórea, y se calculó el carbono almacenado en cuatro compartimentos. Con los datos de cobertura y estructura arbórea se establecieron relaciones con los resultados del carbono acumulado en los diferentes compartimentos. Como resultados se obtuvo que la estructura de la vegetación se diferenció en dos conglomerados. De estos el conglomerado 2, ubicado a mayor altitud presentó resultados estadísticamente superiores que el conglomerado 1. El carbono acumulado en la necromasa, biomasa aérea, suelo y raíces gruesas presentaron valores superiores en el conglomerado 2 (4,7; 136; 291; 54,2 Mg C/ha, respectivamente) a diferencia de las raíces finas que presentó mayores valores en el conglomerado 1 (22,6 Mg C/ha). En general, el carbono orgánico total presentó mayores valores en el conglomerado 2 (505,5 Mg C/ha). Se registraron 24 correlaciones significativas entre las variables de estructura y cobertura arbórea con el carbono almacenado; de estas 11 correlaciones fueron bastante altas ($r \geq 0,8$). El área basal con el carbono aéreo fueron las variables que mayor interdependencia presentaron según el $R^2 = 94\%$.

Palabras claves: Estructura arbórea. Cobertura arbórea. Biomasa arbórea. Carbono orgánico.



ABSTRACT

The Andean montane forests are unique and important ecosystems based on the diversity and diverse environmental services they provide, including carbon storage. In the present investigation, information was generated on the relationships between the structure and tree cover with the carbon stored in Andean montane forests. The study was carried out in the remnants of mature forests of El Cajas massif, in Chaucha and San Gerardo, in 20 permanent sampling plots. Tree cover and structure were measured here, and carbon stored in four compartments was calculated. With the data obtained from tree cover and structure, relationships were established with the results of the carbon stored in the different compartments. As a result, it was obtained that the structure of the vegetation differs into two clusters. Of these, cluster 2, located at a higher altitude, presented statistically greater results than cluster 1. As for the carbon accumulated in the necromass, above-ground biomass, soil and thick roots presented higher values in cluster 2 (4.7; 136; 291; 54.2 Mg C/ha, respectively) as opposed to roots fine that presented higher values in cluster 1 (22.6 Mg C/ha). In general, total organic carbon has higher values in cluster 2 (505.56 Mg C/ha). Twenty four (24) significant correlations were registered between the structure and tree cover variables with the stored carbon; of these 11 correlations were high ($r \geq 0.8$). The basal area with carbon on the ground were the variables that presented the higher adjustment, according to $R^2 = 94\%$.

Keywords: Tree structure. Tree cover. Tree biomass. Organic carbon.



ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. JUSTIFICACIÓN	19
3. OBJETIVOS	21
3.1. Objetivo General:	21
3.2. Objetivos Específicos:	21
4. HIPOTESIS	21
5. REVISIÓN DE LITERATURA	22
5.1. La estructura de los bosques Andinos	22
5.2. Cobertura arbórea e índice de área foliar.....	23
5.3. Almacenamiento de carbono (servicio ambiental) en bosques tropicales	24
5.4. Compartimientos de almacenamiento de carbono en los bosques tropicales	26
5.4.1. Carbono en la biomasa arbórea.....	26
5.4.2. Carbono orgánico en el suelo	29
6. MATERIALES Y MÉTODOS	32
6.1. Materiales.....	32
6.2. Área de estudio	32
6.3. Establecimiento de parcelas.....	33
6.4. Metodología para el muestreo y toma de datos	34
6.4.1. Metodología para el objetivo específico uno	34
6.4.2. Metodología para el objetivo específico dos	36
6.4.3. Metodología para el objetivo específico tres.....	40
6.5. Análisis estadístico.....	41
7. RESULTADOS	42
7.1. Estructura arbórea.....	42
7.1.1. Análisis de conglomerados	42
7.1.2. Estructura horizontal	42
7.1.3. Estructura vertical	46
7.2. Cobertura arbórea y Área foliar	46
7.3. Carbono almacenado en la necromasa: hojarasca y madera muerta	47
7.4. Carbono almacenado en la biomasa subterránea (raíces finas y gruesas)....	48



7.5. Carbono almacenado en la biomasa aérea (árboles, palmas y helechos arbóreos).....	49
7.6. Carbono orgánico del suelo (COS)	50
7.7. Carbono orgánico total (COT)	51
7.8. Variables del suelo (Densidad aparente, materia orgánica del suelo, pH y conductividad eléctrica).....	52
7.9. Relación de la estructura, cobertura arbórea y suelos con el carbono almacenado.....	53
8. DISCUSIÓN.....	58
9. CONCLUSIONES	67
10. RECOMENDACIONES.....	68
11. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	69
12. ANEXOS.....	75



LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Rango de las clases diamétricas.....	34
Tabla 2: Ecuaciones utilizadas para estimar el carbono almacenado.....	40
Tabla 3: Resultados obtenidos de densidad aparente, materia orgánica, pH y conductividad eléctrica (CE) a profundidades de 15 y 30 cm, en los conglomerados 1 y 2.....	53
Tabla 4: Correlaciones de Pearson ($P < 0,05$) entre variables de estructura y cobertura de la vegetación leñosa con el carbono almacenado en diferentes compartimentos, registradas en parcelas de 0,1 ha.	55



LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio.....	33
Figura 2: Diseño de la parcela con los puntos de muestreo para el levantamiento de datos en campo.....	36
Figura 3: Grupos estructurales afines de vegetación leñosa, diferenciados mediante análisis de conglomerados en 20 parcelas de 0,1 ha.....	43
Figura 4: Promedio para área basal (m^2/ha) \pm errores estándar, para la vegetación leñosa $\geq 2,5$ (a); ≥ 5 (b), ≥ 10 (c) cm de DAP y proporciones acumuladas del área basal (d) obtenidos en parcelas de 0,1 ha.....	44
Figura 5: Promedio para el número de individuos (N/ha) \pm errores estándar, para la vegetación leñosa $\geq 2,5$ (a); ≥ 5 (b), ≥ 10 (c) cm de DAP y proporciones acumuladas del área basal (d) obtenidos en parcelas de 0,1 ha.....	45
Figura 6: Promedios de altura \pm errores estándar; altura promedio (a), altura máxima promedio (b), en los dos conglomerados, obtenidos en parcelas de 0,1 ha.....	46
Figura 7: Promedios de la cobertura arbórea \pm errores estándar, para la cobertura del dosel (a) y el índice de área foliar (b) en los dos conglomerados, obtenidos en parcelas de 0,1 ha.....	47
Figura 8: Promedio de carbono almacenado en la necromasa \pm errores estándar, para el carbono en la hojarasca (Mg/ha) (a) y carbono en la madera muerta (Mg/ha) (b), en dos conglomerados, obtenidos en parcelas de 0,1 ha.....	48
Figura 9: Promedios de carbono almacenado en la biomasa subterránea \pm errores estándar, para el carbono en raíces finas (Mg/ha) (a) y en raíces gruesas (Mg/ha) (b), en dos conglomerados, obtenidos en parcelas de 0,1 ha.....	49
Figura 10: Promedios del contenido de carbono aéreo almacenado \pm errores estándar, obtenidos en parcelas de 0,1 ha.....	50
Figura 11: Promedios del carbono orgánico del suelo \pm errores estándar, en dos conglomerados, obtenidos en parcelas de 0,1 ha.....	51
Figura 12: Promedios del carbono orgánico total \pm errores estándar (a) y Porcentajes acumulados de carbono \pm errores estándar (b); obtenidos en parcelas de 0,1 ha.....	52
Figura 13: Regresiones lineales entre la estructura y cobertura arbórea con el carbono almacenado en los bosques montanos Andinos del macizo del Cajas. Cada círculo representa una parcela de 0,1 ha. El tamaño de los círculos representa la altitud de cada parcela, círculos pequeños (menor altitud) y círculos grandes (mayor altitud).....	57



LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Bosques pertenientes macizo del cajas, localidad de San Gerardo (izquierda) y Chaucha (derecha).	75
Anexo 2: Toma de DAP de un individuo y cuadrante de muestreo de la hojarasca. 75	
Anexo 3: Recolección de muestras de raíces finas, gruesas y toma de muestras de suelo.	75
Anexo 4: Toma de datos de cobertura arbórea: cobertura del dosel (densiómetro) y el índice de área foliar.	76
Anexo 5: Total de correlaciones obtenidas, se muestra las variables relacionadas con su respectivo coeficiente de Pearson y su significancia.	77
Anexo 6: Hoja de campo para la descripción general de la parcela de 0,1 ha.	79
Anexo 7: Hoja de campo para los datos del muestro de suelo.....	80
Anexo 8: Hoja de campo en donde se indica los puntos de muestreo y los datos de los parámetros de cobertura arbórea.	81
Anexo 9: Hoja de campo para los datos dasométricas de todos los individuos > 2,5 de DAP dentro de la parcela de 0,1.....	82



ABREVIATURAS Y SIMBOLOGIA

BA: Biomasa arbórea

COB: Cobertura arbórea

COS: Carbono orgánico del suelo

DAP: Diámetro a nivel del pecho

GEI: Gases de efecto invernadero

IPCC: Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático

IAF: Índice de área foliar

LOI: Pérdida por ignición

MO: Materia orgánica

REDD: Reducción de emisiones por deforestación y degradación de los bosques



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Isabel Lucinda Alvarado Villa en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Relaciones entre la estructura y cobertura arbórea con el carbono almacenado en bosques montanos Andinos en el macizo del Cajas, Azuay-Ecuador", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 28 de octubre del 2019

Isabel Lucinda Alvarado Villa

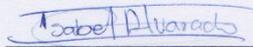
C.I: 0105794911



Cláusula de Propiedad Intelectual

Isabel Lucinda Alvarado Villa, autor del trabajo de titulación "Relaciones entre la estructura y cobertura arbórea con el carbono almacenado en bosques montanos Andinos en el macizo del Cajas, Azuay-Ecuador", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 28 de octubre del 2019



Isabel Lucinda Alvarado Villa

C.I: 0105794911



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Carlos Santiago Cobos Miguitama en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Relaciones entre la estructura y cobertura arbórea con el carbono almacenado en bosques montanos Andinos en el macizo del Cajas, Azuay-Ecuador", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 28 de octubre del 2019

Carlos Santiago Cobos Miguitama

C.I: 0302666664



Cláusula de Propiedad Intelectual

Carlos Santiago Cobos Miguitama, autor del trabajo de titulación "Relaciones entre la estructura y cobertura arbórea con el carbono almacenado en bosques montanos Andinos en el macizo del Cajas, Azuay-Ecuador", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 28 de octubre del 2019

Carlos Santiago Cobos Miguitama

C.I: 0302666664



AGRADECIMIENTOS

La vida de un estudiante consiste en saber superar las dificultades y los fracasos que te dan la vida, pero todo es posible con el apoyo de las personas quienes nos ayudan y te dan una mano para salir adelante. Por eso queremos agradecer al Ing. Oswaldo Jadán nuestro tutor de tesis, quien fue el que nos brindó todo su conocimiento, confianza, paciencia y sobre todo su tiempo, también agradecer al Ing. Hugo Cedillo quien nos colaboró en los trabajos de campo que fue indispensable para poder culminar nuestro trabajo de titulación. Además, dar las gracias a todos los docentes quienes a lo largo de nuestra carrera nos brindaron su experiencia y entendimiento. Por ultimo dar las gracias a la Universidad de Cuenca quien nos abrió las puertas para formarnos como profesionales.

Alvarado Isabel, Cobos Carlos



DEDICATORIA

A lo largo de mi vida como estudiante siempre he tenido el apoyo incondicional de mis padres y familiares cercanos, sobre todo de mi madre Julia Miguitama quien fue la persona que me supo inculcar valores como el respeto y la humildad hacia los demás, además fue la que siempre me apoyo en todos los problemas y dificultades que se me presentaron. Por eso este trabajo le dedico a ella con mucho cariño ya que sin su ayuda no podría haber llegado tan lejos como persona y como futuro profesional.

Carlos

Dedico este trabajo a Dios por la vida, salud y sabiduría. A toda mi familia, en especial a mis padres Agustín y Yolanda, que han sido un pilar fundamental en mi desarrollo personal y académico, y que son mi impulso para seguir adelante, a mis hermanos Rocío, Mariela y Agustín, por su apoyo incondicional y desinteresado.

Isabel



1. INTRODUCCIÓN

Los bosques montanos Andinos son ecosistemas únicos e importantes. Están presentes en elevaciones de clima templado a frío y se caracterizan por una estructura heterogénea con una capa de dosel casi siempre verde desigual y un sotobosque relativamente denso (Bruijnzeel, Kappelle, Mulligan, y Scatena, 2010; Richter, Diertl, Peters, y Bussman, 2008). Poseen notables diferencias florísticas, fisonómicas y fisiológicas entre las partes inferior y superior, que se extienden en amplios rangos de elevación (Richter et al., 2008).

El almacenamiento de carbono en los bosques nativos es un servicio ecosistémico importante que permite mitigar efectos negativos del cambio climático (Lal, 2004). En los bosques montanos Andinos las reservas de carbono están contenidas en la biomasa por encima y por debajo del suelo, y en el suelo (Gibbon et al., 2010). En estos bosques el carbono sobre el suelo disminuye moderadamente con la elevación y también con el ángulo de inclinación o pendiente. Sin embargo estos ecosistemas aun así bajo estas condiciones almacenan cantidades sustanciales de biomasa, tanto en elevaciones altas (hasta 3500 m) como en pendientes pronunciadas (Spracklen y Righelato, 2014). También se ha documentado que existe una relación positiva entre la estructura, diversidad y el almacenamiento de carbono en bosques tropicales (Poorter et al., 2015), aunque esta relación podría estar influenciada por factores ambientales en los bosques montanos Andinos. Por ejemplo, el clima frío en altitudes superiores puede limitar simultáneamente la diversidad y el almacenamiento de carbono (Fyllas et al., 2017).



Investigaciones locales y regionales dan evidencia del rol que cumplen los bosques tropicales Andinos con respecto al almacenamiento de carbono. Estos ecosistemas forestales en su biomasa aérea almacenan el 60% de carbono de todos los almacenes aéreos de la superficie terrestre y el 30% de los almacenes de carbono en el suelo (Dixon et al., 1994).

En un estudio local realizado en los Andes del Sur del Ecuador en un gradiente altitudinal se ha registrado que el carbono en la biomasa de las hojas, tallos y biomasa total sobre el suelo disminuyeron en un 50% a 70% entre 1 000 y 3 060 m s.n.m.; mientras que la biomasa en raíces o subterránea aumentó desde 106 a 204 Mg/ha entre estas mismas altitudes (Moser et al., 2011). Las causas propuestas se basan en que a una mayor altitud hay menor disponibilidad de nitrógeno y junto a las temperaturas bajas ocasionan la disminución del área de la hoja, por lo tanto, su biomasa. Con lo relacionado al aumento de la biomasa subterránea se debe a la intensa velocidad del viento que existe a mayores altitudes, por lo que los árboles generan mayores cantidades de raíces permitiéndoles un mejor anclaje. Otra razón válida es la falta de disponibilidad de nutrientes lo que conlleva a que los árboles generen más raíces. En el caso del aumento carbono en el suelo puede deberse a que a las capas orgánicas son más profundas a mayor altitud (Moser et al., 2011).

Otro estudio realizado a nivel local sobre la cuantificación de carbono, se situó en la región amazónica norte del país, en bosques siempre verde de tierras bajas, destinado a partir de la biomasa aérea y generar modelos alométricos para grupos específicos de especies y estratos ecosistémicos. Se evidenció como resultado que la biomasa aérea acumuló 124,85 Mg/ha (62,43 Mg C/ha) (Cuenca , Jadán, Cueva, y Aguirre, 2017) y que el DAP fue la variable que mejor predijo el carbono aéreo.



En Perú, Girardin et al. (2010) realizó un estudio para determinar las reservas de carbono en bosques Andinos, en los compartimientos por debajo y sobre el suelo en una gradiente de elevación entre 194 m s.n.m. a 3 025 m s.n.m. Aquí se registró que los valores del carbono en la biomasa raíces finas aumentaron conforme se aumenta la elevación; con respecto al carbono en la biomasa aérea disminuyó de 123,50 Mg C/ha (194 m) a 47,03 Mg C/ha (3020 m).

Aunque existe evidencias sobre al almacenamiento de carbono como servicio ecosistémico, hace falta una comprensión completa de su variación en bosques tropicales Andinos. Esto basado en la alta complejidad de los ecosistemas Andinos, en su estructura y composición, sumado a las influencias ambientales circundantes y muy heterogéneas. Bajo estos antecedentes se torna importante generar información sobre el carbono almacenado en bosques montanos Andinos en sitios específicos e importantes para la conservación de la biodiversidad y servicios ambientales. También es importante dar a conocer aspectos intrínsecos de estos ecosistemas con base a la relación e interdependencia entre la estructura de la vegetación con el carbono almacenado, para lo que se desarrollará la presente investigación, de observación y descriptiva.



2. JUSTIFICACIÓN

Los bosques tropicales son uno de los ecosistemas de mayor importancia debido a que albergan la mayor biodiversidad presente en nuestro planeta (Giam, 2017). En particular, los bosques Andinos son una de las áreas con mayor prioridad para la conservación debido a que forman parte de los cinco centros que presenta la mayor riqueza de plantas vasculares en el planeta (5 000 especies en 10 000 km) (Barthlott, Mutke, Rafiqpoor, Kier, y Kreft, 2005). Muchos estudios técnicos - científicos han documentado esta riqueza a nivel local y regional (Barthlott, Schmit-Neuerburg, Nieder, y Engwald, 2001; Homeier, Breckle, Günter, Rollenbeck, y Leuschner, 2010).

Sin embargo, cada año en el país se pierde miles de hectáreas de bosques por deforestación; esto se da, aunque estos ecosistemas proveen servicios ambientales en beneficio local, regional y global. Uno de los principales servicios ecosistémicos que brindan los bosques a través de sus biotipos vegetales es el almacenamiento de carbono, lo cual está ligado a procesos eco-fisiológicos propios de los organismos biológicos productores o autótrofos como son los vegetales (Mulkey, Chazdon, y Smith, 2012). Fisiológicamente, los biotipos presentes en los boques toman del aire el dióxido de carbono (CO₂), que se tornan indispensables para emprender los procesos fotosintéticos (Chazdon, Pearcy, Lee, y Fetcher, 1996). Como parte del resultado metabólico de las plantas se acumula Carbono en un 50% dentro de la biomasa vegetal. Por lo tanto, los bosques llegan a ser grandes sumideros de este elemento, lo cual se asocia directamente con la mitigación del calentamiento global (Cuesta, Peralvo, y Valarezo, 2009; Ramirez et al., 2014).



Además, los bosques proveen de otro servicio bastante importante que es el suministro y regulación hídrica, lo cual beneficia a muchos poblados asentados en las partes bajas, tanto para el consumo humano y la agricultura. Se conoce que el 90% del agua utilizada en la región andina para el riego agrícola proviene de los páramos y ecosistemas forestales Andinos (Buytaert, Iniguez, y De Bievre, 2007).

Por estas razones se torna importante valorar a los bosques Andinos con base a su estructura y aspectos funcionales, y su relación al almacenamiento de carbono. Esto permitirá aportar al conocimiento sobre los diversos servicios ambientales, en especial el almacenamiento y acumulación de carbono, lo cual debe ser indagado bajo procesos técnicos - científicos en donde se apliquen métodos validados en contextos locales y regionales. También es importante mencionar que la valoración integral de estos ecosistemas permitirá conservarlos y manejarlos de una manera correcta a largo plazo. En esta ocasión se cuantificará los stocks de carbono en los diferentes componentes de almacenamiento del ecosistema forestal de bosques Andinos, y a estos se los relacionará con parámetros intrínsecos que forman parte de la estructura de la vegetación arbórea.



3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General:

Generar información sobre las relaciones entre la estructura y cobertura arbórea con el carbono almacenado en bosques montanos Andinos.

3.2. Objetivos Específicos:

- Caracterizar la estructura arbórea y cobertura de dosel en bosques Andinos del cantón Cuenca.
- Estimar las reservas de carbono en diferentes compartimentos de almacenamiento: biomasa aérea, subterránea (raíces), suelo y necromasa en bosques Andinos del cantón Cuenca.
- Establecer correlaciones entre la estructura y cobertura arbórea con el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea, subterránea (raíces), suelo y necromasa en bosques Andinos del cantón Cuenca.

4. HIPOTESIS

¿Las reservas de carbono en la biomasa aérea, subterránea (raíces), suelo, necromasa y total, almacenado en Bosques Andinos aumentan conforme se incrementa la estructura, pero disminuye cuando aumenta la cobertura del dosel?



5. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1. La estructura de los bosques Andinos

La estructura es una condición propia de un ecosistema forestal basado en su arquitectura lo que condiciona aspectos de funcionalidad y que puede ser medida con base a algunos parámetros cuantitativos (Melo y Vargas, 2003). En los ecosistemas en general se destacan dos tipos de estructuras tanto la vertical y horizontal que son utilizadas para caracterizarlos según el tipo de bosque. Los bosques templados y boreales poseen diferentes características estructurales que los bosques tropicales.

De esta manera la estructura vertical, los árboles del bosque se agrupan en diferentes estratos o pisos (Sánchez y Castaño, 1994). Una de las estratificaciones más usadas en los bosques tropicales es la de individuos, que es la agregación de todas las alturas de los árboles maduros e inmaduros de todas las especies, teniendo como punto de referencia una categoría mínima de medición, que puede ser el diámetro o la altura (Bourgeron, 1983).

La estructura horizontal consiste en evaluar el comportamiento de los árboles individuales y de las especies en la superficie del bosque. Aquí sobresale la estructura total que es la variación de los parámetros cuantitativos como el área basal y densidad en un conjunto de unidades muestrales experimentales (Melo y Vargas, 2003). Otra manera o técnica de evaluar la estructura horizontal es mediante las distribuciones diamétricas; esta nos permite ver como se distribuyen los parámetros de área basal y densidad por tamaños de árboles diferenciados en clases diamétricas con intervalos de 5 o 10 cm de DAP (diámetro a la altura del pecho) (Salazar et al., 2012).



La estructura horizontal y su distribución con respecto a la altitud, en un estudio realizado por Jadán, Toledo, et al. (2017) se diferenciaron comunidades forestales en donde el número de individuos (densidad) se disminuyó con el incremento de altitud y en donde contrariamente el área basal se incrementó con la altitud. En una investigación desarrollada por Homeier et al. (2010), se encontró que el área basal que es un parámetro de la estructura horizontal, aumentó en los valles < 2 100 m s.n.m., por lo contrario Girardin et al. (2014) no encontró relaciones significativas del área basal con respecto a la altitud, en cuanto a la altura de los árboles (estructura vertical), se encontró una disminución significativa conforme se incrementaba la altitud.

5.2. Cobertura arbórea e índice de área foliar

La cobertura arbórea (CA) es un factor clave que regula el ambiente lumínico dentro del bosque, el cual es indispensable en los procesos fotodependientes que ocurre dentro de las plantas. Además actúa como parte de un servicio hidrológico al permitir la infiltración de la precipitación, de modo que la CA está implicada en los patrones de regeneración de las plantas tanto en crecimiento, establecimiento y supervivencia (Aguirre, Valdez, Ángeles, Santos, y Aguirre, 2011; Promis, 2013).

Para poder estimar la cobertura arbórea se han utilizado principalmente las fotografías hemisféricas y el densiómetro (Díaz, Lencinas, y del Valle, 2014; Pillacela 2017). Las fotografías hemisféricas se toman mediante una cámara digital en el cual tiene incorporada un lente de ojo de pez permitiéndonos tener un campo visual de 180° lo que nos permite apreciar el dosel del árbol (Díaz et al., 2014). Otra manera para estimar la CA es mediante la ayuda del densiómetro, que es un instrumento que



tiene un espejo hemisférico que puede ser cóncavo o convexo donde se aprecia una retícula de 24 cuadros que nos permitirá la estimación de este parámetro (Promis, 2013).

El índice de área foliar (IAF) representa la cantidad de área foliar soportada en una superficie de terreno y es una variable clave para evidenciar la dinámica, productividad y el crecimiento de una vegetación forestal (Paiva, Silva, y Haridasan, 2015). También está íntimamente relacionado con el rendimiento de un cultivo (Aguirre et al., 2011; Brandão y Zonta, 2016). Esta variable es muy importante ya que permite predecir procesos ecofisiológicos dentro de cobertura forestales ligados a la sucesión o regeneración natural (Jadán Maza et al., 2019; Palomeque et al., 2017).

Estudios realizados en Ecuador con el fin de evaluar la productividad forestal realizados por Jiménez and Tulio (2007) en Bosques Andinos en gradientes de 1800 a 3200 m s.n.m. han reportado valores puntuales de 3,03 de IAF. Por otra parte Unger, Homeier, and Leuschner (2013) en bosques montanos situados al noreste de Ecuador a 500 m s.n.m. de altitud registró valores de 6,6 IAF. Estos valores se tornan importantes como base para comparar la producción o productividad forestal entre ecosistemas o masas forestales.

5.3. Almacenamiento de carbono (servicio ambiental) en bosques tropicales

Un servicio ambiental hace referencia a todos los beneficios que brinda el ecosistema (bosque tropical) a la sociedad (MEA, 2005). Uno de estos servicios es el almacenamiento de carbono que actualmente ha sido estudiado con mayor énfasis en bosques de tierras bajas, debido a su beneficio ecosistémico que va desde lo local hasta lo global (Sierra et al., 2007). Los bosques tropicales son una de las mayores



reservas de carbono en el planeta ya que contiene de 550 ± 100 Pg C (1 Pg = 1 pentagramo = 10^{15} g = 109 toneladas métricas) (Castañeda y Montes, 2017).

La vegetación existente en los bosques tropicales es importante debido a la alta capacidad de almacenamiento de carbono que estos poseen (Castañeda y Montes, 2017). Estos bosques en ciertos lugares han sido sometidos a evaluaciones y estimaciones de sus stocks de carbono. No obstante, en Ecuador, concretamente en la región andina es escasa la información con respecto a las existencias de carbono en los diferentes compartimentos dentro de los bosques. En esta región sobresale un estudio realizado por Moser et al. (2011) en el Sur del Ecuador, en donde se evaluó el efecto que produce la elevación y la temperatura en el almacenamiento de carbono (variable dependiente). Para su evaluación se utilizaron diferentes transectos altitudinales (entre 1050 y 3 060 m s.n.m.), cuyos resultados mostraron que la producción primaria neta de carbono sobre el suelo disminuye conforme se incrementa la altitud debido a las temperaturas decrecientes; en cuanto a la productividad subterránea se incrementa con la altitud.

En el sur de los Andes colombianos, Yepes et al. (2016) realizaron una cuantificación del carbono total almacenado en los bosques tropicales. Su objetivo fue comprender el rol de los ecosistemas en el ciclo de carbono y cuya información sirva para implementar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático. En este estudio se analizó tanto la biomasa aérea, subterránea y la necromasa, teniendo como resultados un stock de carbono total de $545,9 \pm 84,1$ Mg/ha; aquí la biomasa área aportó un 72,5%, la biomasa subterránea un 13,6% y la necromasa con 13,9%.

En el estudio realizado por Castañeda and Montes (2017) se estimó el carbono



almacenado en los páramos Andinos. Esto les permitió diferenciar que el suelo fue el componente que mayor contenido de carbono almacena, con valores entre 119 y 397 Mg/ha en los primeros 40 cm de profundidad. En cuanto a la biomasa área varió entre 13,21 y 183 Mg/ha.

5.4. Compartimientos de almacenamiento de carbono en los bosques tropicales

Para poder estimar el carbono total almacenado en los diferentes tipos de bosques se debe calcular esta variable en cada uno de sus compartimientos, tales como: el carbono en la biomasa arbórea y el carbono orgánico en el suelo.

5.4.1. Carbono en la biomasa arbórea

La biomasa arbórea (BA) se refiere a la cantidad total de materia orgánica seca y que es expresada en toneladas por unidad de área, dentro de la cual existen 3 componentes que son: la biomasa aérea, subterránea (raíces finas y gruesas) y necromasa (hojarasca y madera muerta). Para poder determinar el carbono de los componentes de la BA se multiplica por el 0,5 debido a que el 50% del material vegetal está conformado por carbono (Castañeda y Montes, 2017).

5.4.1.1. Biomasa aérea

La biomasa área conformada de una parte de la biomasa arbórea que comprende a la biomasa de tallos, ramas, hojas de árboles, arbustos, lianas y hierbas. Esta biomasa se determina en forma directa e indirecta. La primera se basa en una metodología destructiva que consiste en la extracción y el fraccionamiento del árbol para luego pesar su biomasa (Klinge, Rodrigues, Brunig, y Fittkau, 1975). Este método no es muy utilizado ya que se destruye el bosque, además demanda mucho tiempo y



es de alto costo. A pesar de los aspectos negativos de esta metodología, es indispensable ejecutarla para la creación de modelos alométricos (Cuenca et al., 2017; Chave et al., 2014) .

La biomasa aérea también se obtiene de manera indirecta mediante la utilización de modelos alométricos las cuales son determinadas mediante métodos destructivos, para lo cual existen modelos específicos para cada tipo de bosque (Chave et al., 2014). Los modelos alométricos nos permite estimar la biomasa de un bosque mediante variables dasométricas como: DAP, altura y densidad de la madera (Nelson et al., 1999). Además, estos modelos son los más utilizados debido a que mediante la metodología que se aplica no hay la necesidad de cortar los árboles, lo que permite ejecutar estudios en áreas protegidas o de prioridad para la conservación sin la necesidad de alguna perturbación en su ecosistema.

Se han reportado resultados sobre estudios locales y regionales sobre el carbono almacenado en la biomasa aérea, para lo que se han utilizado métodos indirectos a través de modelos alométricos. Así, Alves et al. (2010) en Brasil reportó en un gradiente altitudinal de 0 a 1 200 m s.n.m., un incremento de la biomasa aérea conforme se incrementó la altitud. En este mismo estudio se determinó una relación positiva entre la biomasa y la densidad o número de individuos por ha (estructura horizontal). En Perú Girardin et al. (2010) en bosques Andinos reportó una disminución del carbono en la biomasa aérea con respecto al incremento altitudinal de 123,50 Mg C/ha en 194 m s.n.m. hasta 47,03 Mg C/ha a 3 020 m s.n.m. Similares patrones se reportaron en un análisis regional en donde la biomasa que es utilizada para el cálculo del carbono, disminuye conforme se incrementa la altitud en Ecuador, Bolivia y Perú (Girardin et al., 2014); aquí mismo se incrementa el número de



individuos con la altitud, por lo que no existe una relación directa entre la biomasa con la densidad.

En Ecuador en los últimos diez años se han realizado estudios sobre el almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales y bosques nativos primarios y secundarios. Aquí, Jadán et al. (2015) reporta valores de $206,2 \pm \text{Mg C/ha}$ en bosques maduros en la amazonia ecuatoriana. También existen datos sobre la evaluación nacional forestal en donde se da a conocer la variación de carbono almacenado en la biomasa aérea diferenciados por ecosistemas en toda la superficie del Ecuador continental (Segura, Jiménez, Chinchero, Iglesias, y Sola, 2016)

5.4.1.2. Biomasa subterránea

Dentro de la biomasa subterránea se considera tanto a las raíces finas y gruesas que son muestreadas con diferentes métodos como se indica en los siguientes estudios. Moser et al. (2011) en Ecuador evaluó el carbono almacenado en los bosques tropicales de montaña, en diferentes pisos altitudinales que van desde los 1 050 hasta los 3 060 m s.n.m.; aquí se registró que el carbono almacenado en las raíces finas aumento conforme se incrementó la altitud obteniendo valores de $1,23 \text{ Mg C/ha}$ (1 050 m s.n.m.) y $5,42 \text{ Mg C/ha}$ (3 060 m s.n.m.), respectivamente. En cuanto a las raíces gruesas se encontró el mismo patrón con valores de $14,24 \text{ Mg C/ha}$ y $24,72 \text{ Mg C/ha}$. En este estudio se evidencia la relación positiva que tiene la altitud con respecto a la cantidad de biomasa subterránea.



5.4.1.3. Necromasa

La necromasa forma parte de la biomasa presente en los ecosistemas y constituye un componente importante en el ciclo global del carbono en los bosques tropicales. En donde los valores de necromasa registrados en la amazonia varían desde casi ausente o pequeños valores hasta los a 60 Mg C/ha. Dentro de este compartimento están consideradas los residuos leñosos gruesos y el mantillo o mejor conocida como hojarasca (Bond, Wang, y Gower, 2003; Chazdon, 2008).

En cuanto a la investigaciones sobre el carbono almacenado en la necromasa Jadán et al. (2015) en la Reserva de la Biosfera Gran Sumaco ubicada a una altitud de 700 m s.n.m., evaluó la cantidad de carbono almacenado en la necromasa (hojarasca y madera muerta) en bosques primarios, registrando valores de 4 Mg C/ha. De la misma forma en el estudio realizado en Zamora Chinchipe por Jadán, Quizhpe, et al. (2017) en diferentes pisos altitudinales (pie montano, montano bajo, montano) en altitudes de 300 a 2 600 m s.n.m. ,obtuvieron valores en la necromasa de 3,2 ;1,8 y 7 Mg C/ha.

5.4.2. Carbono orgánico en el suelo

El suelo es considerado como uno de los principales reservorios de carbono (C) siendo el segundo sumidero (océanos, ecosistema terrestre, atmosfera, combustibles fósiles) de C en la naturaleza. En sí el carbono orgánico en el suelo (COS) representa el 75% del C almacenado en los ecosistemas terrestres (vegetación, suelo) y este es superior de dos a tres que en el C almacenado en la biomasa aérea (Avilés et al., 2009; Mogollón, Rivas, Martínez, Campos, y Márquez, 2015).



El COS según la FAO (2017) almacena 1 500 Pg C (pentagramos de carbono) en el primer metro de suelo lo que significa que tiene mayor contenido de carbono que la atmósfera (800 Pg C) y la vegetación terrestre (500 Pg C) juntas. La mayor parte del COS del planeta se encuentra almacenado en los bosques, en los cuales, según la FAO (2017) pueden llegar a “comprender el 85% de las reservas de C terrestres en los bosques boreales, el 60% en los bosques templados y el 50% en bosques tropicales”.

5.4.2.1. Métodos para determinar el carbono orgánico en el suelo

Existen varias técnicas que se han desarrollado para la estimación del carbono orgánico del suelo. La primera metodología se basa en la oxidación húmeda de la muestra de suelo con la utilización de dicromato de potasio en medio ácido (Walkley y Black, 1934). El método de combustión seca es otra técnica que nos permite calcular el COS y es sumamente exacto y preciso. Sin embargo las desventajas es que es un método costoso y requiere de un personal calificado (Grewal, Buchan, y Sherlock, 1991). Otro método utilizado es el de calcinación o conocido como LOI (loss on ignition) (Schulte y Hopkins, 1996) que se basa en cuantificar el contenido de MO mediante la pérdida de peso del suelo que son sometidas a la altas temperaturas, para poder determinar el COS a través de la MO. Aquí se utiliza el factor de Van Bemmelen y que es diferente para cada tipo de suelo (Eyherabide, Sainz , Barbieri, y Echeverría, 2014).

Para estimar el COS en algunos estudios de Somarriba et al. (2013), Jadán et al. (2015) Andrade, Segura, and Rojas (2016), entre otros, utilizaron la metodología propuesta por MacDicken (1997) la cual se basa en el uso de tres variables: porcentaje



de COS proveniente de la materia orgánica, densidad aparente y profundidad del suelo. La primera variable que es el % COS se puede estimar con las metodologías ya descritas. La segunda variable que es la densidad aparente (propiedad física del suelo) se determina mediante la metodología del cilindro de volumen conocido lo cual nos permite conocer el C orgánico por unidad de área. La última variable se basa de la profundidad en la cual hemos tomado las muestras de suelo. Mediante la fórmula propuesta por MacDicken (1997) y con las variables ya conocidas se determina el COS en toneladas por ha (t/ha).

En el Ecuador existe poca información acerca del COS en bosques Andinos, opuestamente a lo registrado para los bosques amazónicos, sistemas agroforestales y páramos en donde se han realizado varios estudios. Resaltando pocos estudios en Ecuador, Moser et al. (2011) estudiaron el carbono almacenado en los suelos en las provincias de Zamora Chinchipe y Loja, y se encontró una variación de 11 Mg C/ha a 75 Mg C/ha a una profundidad de 30 cm dentro de un gradiente altitudinal de 1 050 m s.n.m. a 3 060 m s.n.m.; esto como consecuencia del aumento de la capa orgánica a mayor altitud. De igual modo Jadán et al. (2015) en la biosfera del Sumaco (700 m s.n.m.) registro valores de carbono orgánico en el suelo de 66 Mg C/ha en un bosque primario. Por otra parte en el estudio realizado en Colombia por Sierra et al. (2007) en bosques tropicales situados a una altura de 900 a 1 500 m s.n.m., registraron un promedio de almacenamiento de carbono orgánico de suelo de 96 Mg C/ha.



6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Materiales

Para el levantamiento de la información se utilizaron los siguientes instrumentos y materiales: GPS, estufa secadora, cámara fotográfica, densiómetro esférico cóncavo, equipo de medición del Índice de Área Foliar - IAF, fichas de campo, bolsas plásticas, sacos de plástico, piola, cintas métricas, cinta diamétrica, brújula, balanza, tijeras de podar, machetes, cilindros, pala, barreta.

6.2. Área de estudio

El área de estudio del proyecto está localizada en los Andes del sur del Ecuador, provincia del Azuay, en los remanentes de bosques montanos nativos dentro de la Reserva de la Biosfera Macizo del Cajas, específicamente en dos localidades diferentes como son la parroquia de Chaucha (Cuenca) y San Gerardo (Girón). En la parte más alta los remanentes de bosques llegan hasta los 3 800 m s.n.m. y en la parte más baja en 2 000m snm (Figura 1). Todos estos remanentes están dentro de la vertiente occidental de la cordillera de los Andes. Según las formaciones vegetales estos remanentes de bosques van desde los Bosques siempreverde de montano bajo y montanos altos.

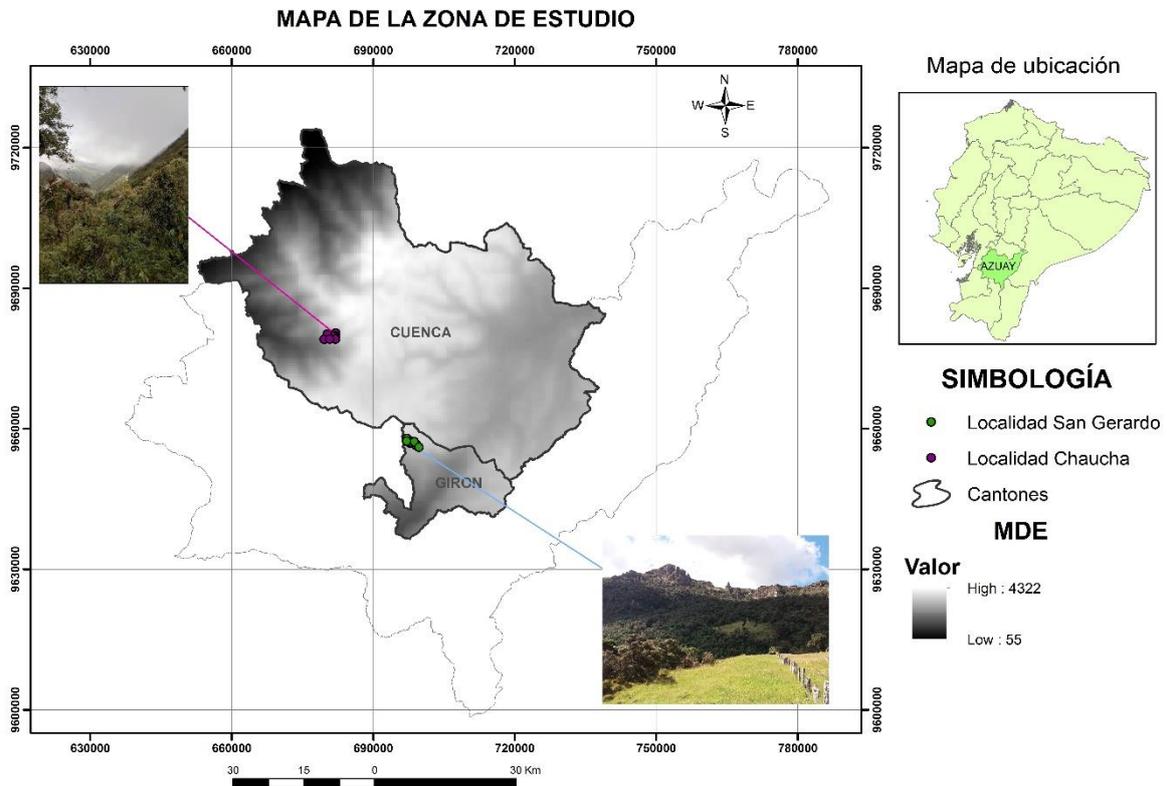


Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio.

6.3. Establecimiento de parcelas

En esta área de estudio se instalaron veinte parcelas permanentes, diez en cada localidad. Para ello se realizaron recorridos de los sitios en donde se identificaron los remanentes de bosque distribuidos en todo el gradiente altitudinal (2 000 a 3 800m snm). En cada remanente de bosque debidamente identificado, se gestionó su permiso ante sus propietarios, luego se instalaron parcelas rectangulares de 0,1 ha (50 m x 20 m). Cada parcela está ubicada a una distancia horizontal de al menos 300 m de distancia y se dividió en 10 subparcelas de 5 m x 10 m con el fin de facilitar la medición de los parámetros en los componentes de almacenamiento (Figura 2).



6.4. Metodología para el muestreo y toma de datos

Una vez establecidas las parcelas se procedió a tomar los datos y muestras para la caracterización de la estructura de la vegetación, cobertura del dosel arbóreo y cuantificación del carbono almacenado en los diferentes compartimentos.

6.4.1. Metodología para el objetivo específico uno: “Caracterizar la estructura arbórea y cobertura de dosel en bosques Andinos del cantón Cuenca”

En toda la parcela de 1 000 m² se tomaron los datos del DAP (diámetro a la altura de 1,3 m sobre el nivel del suelo) y altura total de todas las especies arbóreas, palmas y helechos que tengan \geq a 2,5 cm de DAP para evaluar parámetros de estructura horizontal y vertical, respectivamente. Con respecto a la estructura horizontal se determinó el área basal (Ecuación 1; Tabla 2) y densidad (número de individuos por ha (N/ha) totales y diferenciados por clases diamétricas. Sobre estas variables se diferenció tamaños de la vegetación en \geq 2,5 cm; \geq 5 cm y \geq a 10 cm de DAP. También en la estructura horizontal se establecieron siete clases de acuerdo a su DAP cómo se describe en la Tabla 1.

Tabla 1: Rango de las clases diamétricas

Clase	Rango DAP (cm)
1	2,5-4,99
2	5-9,99
3	10-19,99
4	20-29,99
5	30-39,99
6	40-49,99
7	> 50



Para la estructura vertical se consideraron la altura máxima o total y la altura media de cada parcela, según lo propuesto por Castellanos-Castro and Newton (2015). La altura máxima se la calculó bajo el principio de la altura dominante, que considera para su cálculo a los 40 individuos más altos por ha (Castellanos-Castro y Newton, 2015). En nuestras parcelas de 0,1 ha se tomó en cuenta los 4 árboles más altos, de los cuales se obtuvo el promedio en altura.

Para analizar y comparar las variables de evaluación o de respuesta, en primer lugar, se realizó una estratificación estructural mediante una clasificación o agrupación de la estructura horizontal y vertical tomando en cuenta los valores de: área basal, altura máxima y altura media registrados en cada parcela. El área basal fue calculada mediante la fórmula 9 (Tabla 2). Para ello se realizó un análisis de conglomerados mediante del método de separación Ward y la distancia de clasificación Euclidea. Los conglomerados resultantes fueron seleccionados mediante la exploración significativa ($P < 0,05$) mediante un análisis de similitudes ANOSIM.

En cuanto a la cobertura de dosel se tomaron datos mediante el uso del densiómetro esférico cóncavo. También se tomaron fotografías hemisféricas con el equipo LAI (CI-110) para determinar el Índice de Área Foliar, estos datos fueron recolectados en 3 puntos y en cada punto se tomo una foto para cada punto cardinal, a un metro sobre nivel del suelo (Figura 2). Estos parámetros de estructura y cobertura de dosel se usaron para relacionarlos con los datos de carbono almacenado en los diferentes compartimentos.

6.4.2. Metodología para el objetivo específico dos: “Estimar las reservas de carbono en diferentes compartimentos de almacenamiento, en bosques Andinos”.

Para poder estimar el carbono total almacenado en los bosques Andinos pertenecientes al macizo del Cajas se evaluó 4 compartimentos de almacenamiento como son: necromasa (hojarasca y madera muerta), biomasa subterránea (raíces finas y gruesas), biomasa aérea (árboles, palmas y helechos arbóreos) y carbono en el suelo. Para determinar el carbono arbóreo se estimó mediante la multiplicación del 0,5 de la biomasa seca a partir de la biomasa existente en los diferentes compartimentos. De esta forma se obtuvo un estimado completo del carbono total con metodologías recomendadas y/o aceptadas por Penman et al. (2003) en diferentes puntos de la parcela (Figura 2).

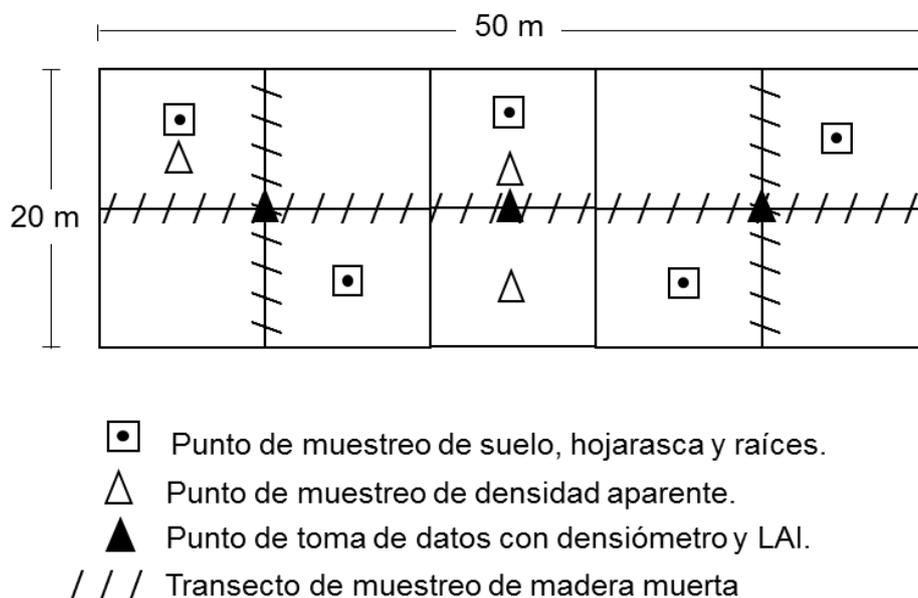


Figura 2: Diseño de la parcela con los puntos de muestreo para el levantamiento de datos en campo.



6.4.2.1. Necromasa (hojarasca y madera muerta)

a) Hojarasca

Para el muestreo de hojarasca en cada parcela se utilizó un marco de 1 m x 1 m y se lo colocó de forma aleatoria en cinco subparcelas (Figura 2), se pesó en fresco total (húmedo) y se obtuvo muestras compuestas de 250 g, respectivamente. De esta sub-muestra se obtuvo el peso en seco (65°C por 72 horas) y la biomasa se obtuvo aplicando la ecuación (2) (IPCC, 2003) (Tabla 2).

b) Madera muerta delgada y gruesa

Para su estimación, se midieron los diámetros de las piezas muertas (ramas o troncos) que se encontraban en la parte central en los transectos de muestreo (Figura 2). Al mismo tiempo se clasificó su densidad en sólido, intermedio, descompuesto y asignó los valores de: 0,60; 0,42; 0,23 g/cm³ respectivamente (Penman et al., 2003). El volumen de la biomasa de este componente se calculó mediante la ecuación (3) y su biomasa mediante la ecuación (4) (Tabla 2).

6.4.2.2. Biomasa subterránea (raíces gruesas y finas)

Para el muestreo y estimación de las raíces gruesas y finas se aplicó el procedimiento desarrollado por Moser et al. (2011). Para las raíces gruesas en cada parcela se realizaron cinco fosas de 40 cm x 40 cm x 60 cm de profundidad (Figura 2); aquí se recolectaron todas las raíces gruesas > a 2 mm de grosor que luego en laboratorio se lavaron para determinar su peso húmedo y seco. Para las raíces finas < 2 mm de grosor, en las cinco fosas ya realizadas se tomaron dos muestras con cilindro de 17,35 cm³ de volumen y se obtuvieron muestras a dos profundidades de 0-



15 cm y de 15 - 30 cm de profundidad, por cada profundidad se recolectaron dos muestras (20 en total por parcela); estas últimas se escogieron en laboratorio usando un tamiz de 2 mm.

De las muestras de raíces gruesas y finas se determinó su peso seco a 65°C por 72 horas (MacDicken, 1997) en el laboratorio de Botánica. El contenido de carbono de cada material se obtuvo multiplicando el peso seco de biomasa por la fracción de carbono y extrapolado a hectárea.

6.4.2.3. Biomasa aérea (árboles, palmas y helechos arbóreos)

Para estimar la biomasa aérea en el estrato arbustivo y arbóreo se midió las variables dasométricas: DAP (diámetro a la altura de 1,3 m sobre el nivel del suelo) y altura total; aquí se consideró toda la vegetación dentro de la parcela de 50 m x 20 m, incluyendo palmas y helechos con DAP \geq a 2,5 cm. Para calcular la biomasa se aplicó un modelo alométrico utilizado para los bosques montanos Andinos, generado por Chave et al. (2014) (Ecuación 5; Tabla 2). En este modelo alométrico utiliza como datos de entrada: la altura, DAP del árbol y la densidad de la madera la cual se calculó a partir de una muestra de una rama como lo recomiendan Swenson and Enquist (2008); a esta muestra se le calculó el volumen mediante la medición de sus áreas en dos o tres secciones y su longitud (Ecuación 6); también se obtuvo su peso seco colocándola en una estufa a 80°C por 48 horas, para luego calcular su densidad mediante la ecuación (7) (Tabla 2).



6.4.2.4. Carbono orgánico en el suelo (COS)

El muestreo de suelos se lo realizó a dos profundidades (0 - 15 cm y 15 - 30 cm); para ello, el suelo tamizado para determinar las raíces finas se usó para determinar la materia orgánica (MO), así se obtuvo una muestra compuesta de 250 g, proveniente de cinco sub-muestras en los puntos específicos tomados en campo dentro de la parcela (Figura 2). La MO se determinó mediante el método de calcinación, y luego se múltiplo por 0,58 debido a que el factor de Van Bemmelen se basa en que el 58% de la materia orgánica es carbono, permitiéndonos calcular el porcentaje de carbono orgánico total del suelo.

Para la densidad aparente se muestrearon tres sitios de la parcela (Figura 2) con cilindros de 102 cm³ de volumen a dos profundidades (0 – 15 cm y 15 – 30 cm). Para determinar la densidad aparente, cada submuestra fue secada a 100°C por 72 horas; se dividió el peso seco entre el volumen del cilindro y luego se obtuvo un promedio de las tres muestras (Ecuación 8).

Con las variables % COS, densidad aparente del suelo y la profundidad (30 cm), se calculó el contenido de carbono del suelo por hectárea, multiplicando el % COS por la masa del suelo (densidad, profundidad) y por una hectárea (Hoyle, 2013) (Ecuación 9; Tabla 2).

**Tabla 2:** Ecuaciones utilizadas para estimar el carbono almacenado

1) Área basal = $\pi \left(\frac{DAP}{2} \right)^2$
2) Biomasa hojarasca = $\frac{\text{Peso seco submuestra}}{\text{Peso húmedo submuestra}} \times \text{peso fresco total}$
3) V = $\pi^2 \left(\frac{\sum (D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2)}{8 \cdot L} \right)$ dónde: V: volumen; D: diámetro de la troza; L: largo del transecto
4) Biomasa madera muerta = Volumen × densidad
5) Biomasa aérea = $0,0673 \times (\text{densidad de la madera} \times DAP^2 \times \text{altura del árbol})^{0,976}$
6) Volumen = $\frac{(\text{Área 1} + \text{Área 2})}{2} \times \text{longitud de la rama}$
7) Densidad madera = $\frac{\text{Peso seco}}{\text{Volumen}}$
8) Densidad aparente = $\frac{\text{Peso seco del suelo}}{\text{Volumen del cilindro}}$
9) Carbono en el suelo = %Carbono orgánico × densidad aparente × profundidad × ha

6.4.3. Metodología para el objetivo específico tres: “Establecer correlaciones entre la estructura y cobertura arbórea con el carbono almacenado en los bosques Andinos del cantón Cuenca”.

Con los parámetros obtenidos de estructura vertical, horizontal tanto en valores totales y por clases diamétricas, cobertura de dosel e índice de área foliar se estableció relaciones con los parámetros del almacenamiento de carbono estimados en los diferentes compartimentos. Adicionalmente se investigó relaciones entre las propiedades del suelo (pH, Ce, Da) con el carbono almacenado. Estas variables de suelo fueron determinadas en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias desde la muestra que se usó para calcular la materia orgánica a dos profundidades. Para ello se realizaron correlaciones de Pearson bajo un $P < 0,05$. Entre las variables que presentaron coeficientes de correlación $r \geq 0,8$, se realizó



regresiones lineales simples en donde se consideró como variables independientes a los parámetros de estructura, cobertura de la vegetación y suelos (eje X) y como dependientes a los parámetros de carbono almacenado, sea en la biomasa sobre el suelo y también en las raíces y suelos (eje Y).

6.5. Análisis estadístico

El análisis estadístico se lo realizó utilizando el software Infostat (Di Rienzo et al., 2014). Aquí se realizó el análisis de conglomerados y similitud (ANOSIM) que permitió identificar los grupos estructurales de vegetación. Se realizó un análisis de varianza con la prueba LSD de Fisher para establecer diferencias de cada variable de estructura sea horizontal (área basal y densidad – número de individuos por ha) y vertical (altura dominante y altura media) y las de carbono almacenado en los diferentes compartimentos y total; esto ya que los datos obtenidos de las diferentes variables fueron normales; para verificar este supuesto se realizó el método gráfico QQ-plot y se aplicó la prueba de Shapiro Wilk. Para las relaciones entre las variables de estructura con el carbono almacenado se realizaron correlaciones de Pearson ($P < 0,05$) entre las variables de estructura, cobertura arbórea y suelo con el carbono almacenado en los diferentes compartimentos. A las variables que presentaron un coeficiente de correlación $r \geq 0,8$ se procedió a realizar regresiones lineales, para obtener ecuaciones en donde se pueda inferir valores de carbono almacenado a través de variables independientes provenientes de la estructura en la vegetación.



7. RESULTADOS

7.1. Estructura arbórea

7.1.1. Análisis de conglomerados

Mediante el análisis de conglomerados se diferenció dos grupos estructurales de vegetación leñosa, según la estructura horizontal (área basal) y vertical (altura promedio y altura máxima promedio). Estos grupos fueron estadísticamente diferentes ($P < 0,05$; ANOSIM) (Figura 3). Las ocho parcelas que forman parte del conglomerado uno son las que están ubicadas en la localidad de Chaucha a una altitud promedio de 2 757 m s.n.m. a excepción de las parcelas 5 y 10 que forman parte de las doce parcelas del conglomerado dos que en su mayoría están presentes en la localidad de San Gerardo, a una altitud promedio de 3 247 m s.n.m.

7.1.2. Estructura horizontal

Las áreas basales, en la vegetación leñosa $\geq 2,5$ DAP (Figura 4a); ≥ 5 DAP (Figura 4b) y ≥ 10 DAP (Figura 4c), fueron estadísticamente superiores con $69,46 \pm 21,14$ m²/ha; $68,41 \pm 21$ m²/ha; $65,12 \pm 20,80$ m²/ha, respectivamente ($P < 0,0001$; para todos los tamaños); para el conglomerado dos que corresponde a la localidad de San Gerardo ubicada a mayor altitud (más las parcelas 5 y 10 ubicadas en Chaucha), a diferencia del conglomerado 1 o grupo ubicado en la localidad de Chaucha que presentaron los menores valores. En lo que se refiere al porcentaje de área basal (G) por clases diamétricas, se registró que para el conglomerado 1, la clase diamétrica 3 presentó una mayor proporción de área basal (31,2%) a diferencia de la clase 1 que fue la de menor proporción (5,4%) (Figura 4d). Con respecto al conglomerado 2, la



clase diamétrica 7 registró el porcentaje más alto de aérea basal (29,8%) y la clase diamétrica 1 obtuvo la menor proporción (1,5 %) (Figura 4d).

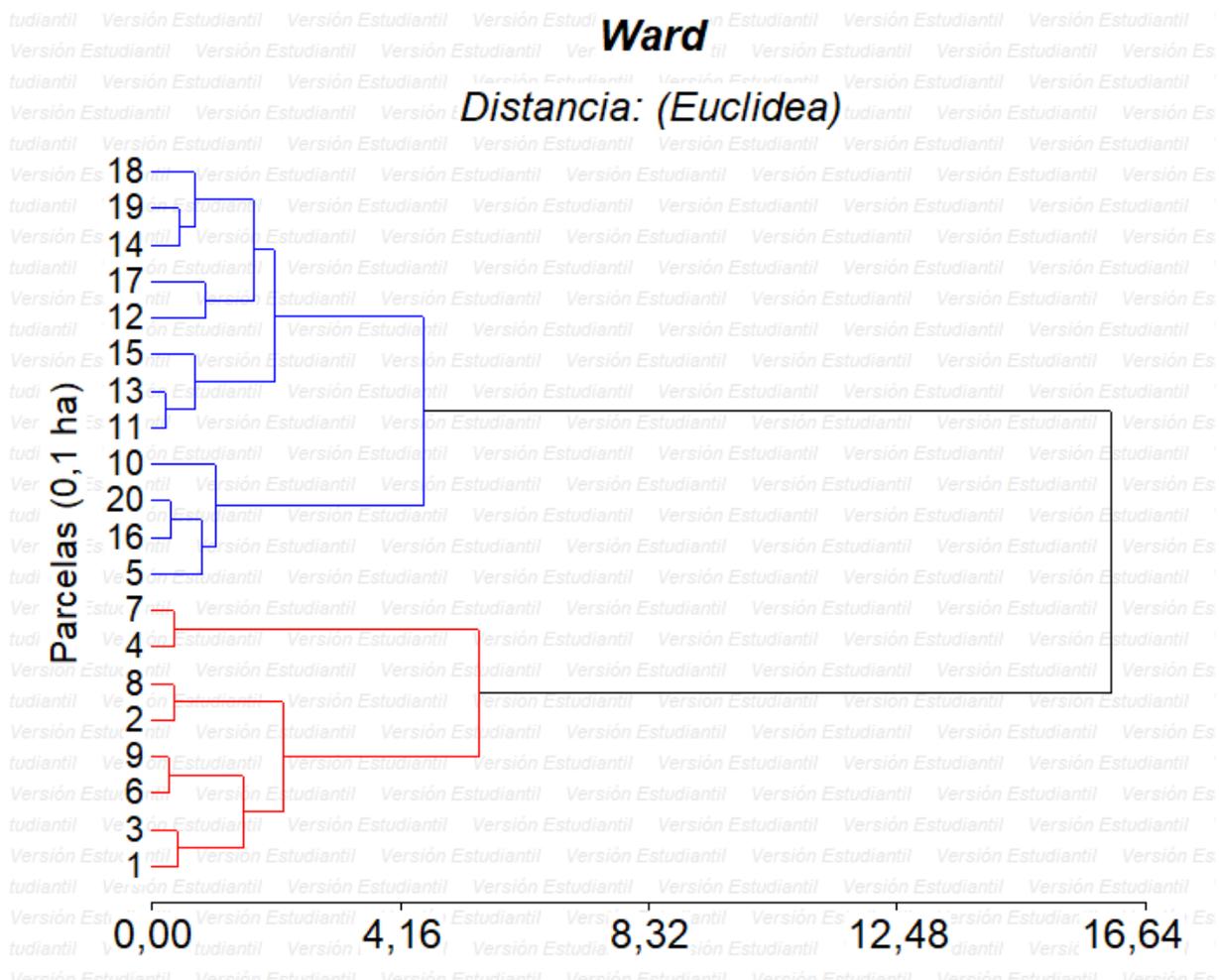


Figura 3. Grupos estructurales afines de vegetación leñosa, diferenciados mediante análisis de conglomerados en 20 parcelas de 0,1 ha.

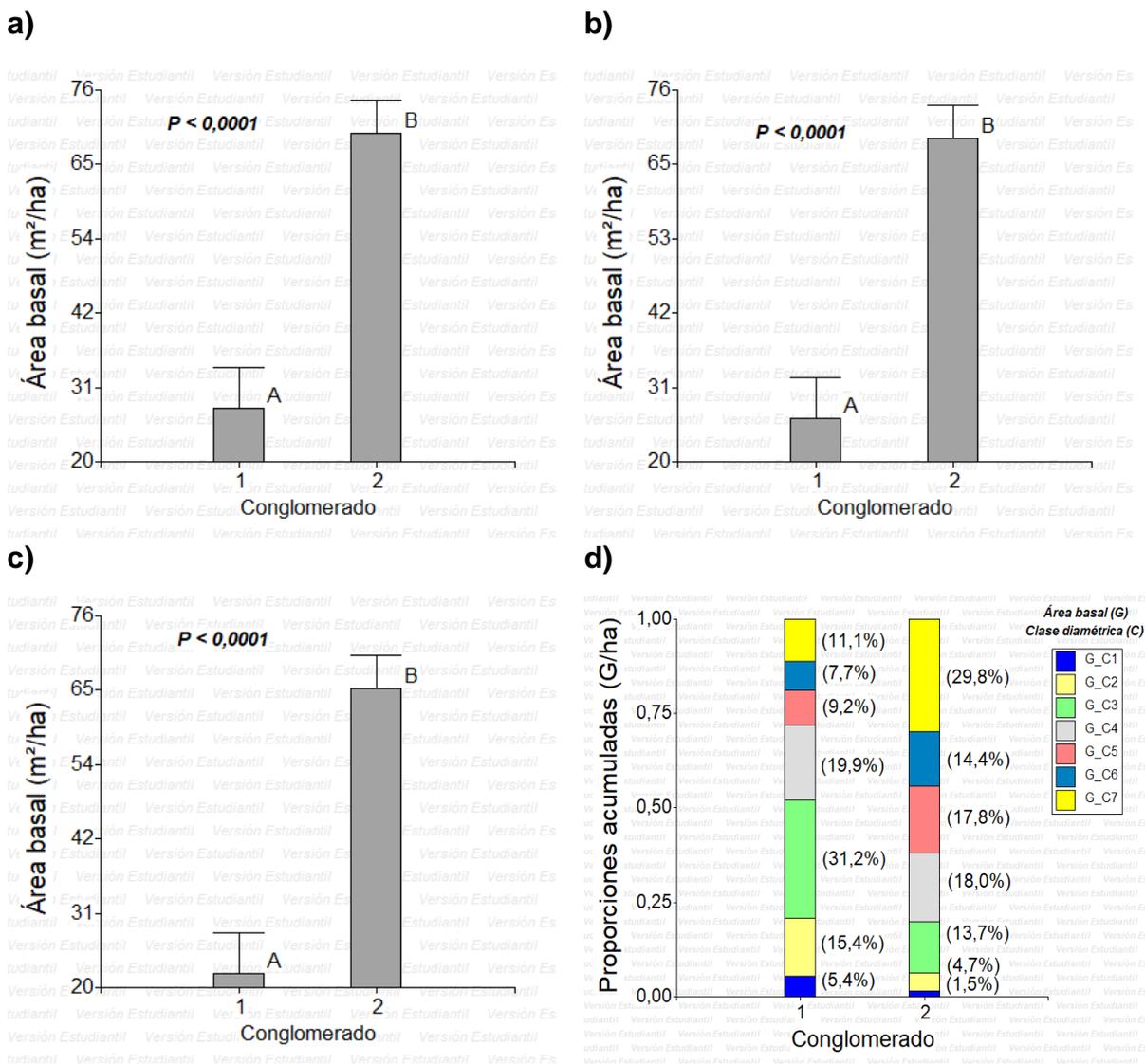


Figura 4: Promedio para área basal (m²/ha) ± errores estándar, para la vegetación leñosa ≥ 2,5 (a); ≥ 5 (b), ≥ 10 (c) cm de DAP y proporciones acumuladas del área basal (d) obtenidos en parcelas de 0,1 ha.

La densidad representada por el número de individuos por ha (N/ha) en la vegetación leñosa ≥ 2,5 (Figura 5a) y ≥ 5 cm de DAP (Figura 5 b) no fue diferente estadísticamente ($P = 0,3049$; $0,9047$; respectivamente). No obstante, para la vegetación ≥ a 10 cm de DAP fue superior con una media de $1092,5 \pm 288,6$ ($P = 0,0103$) para el conglomerado dos ubicado en la localidad de San Gerardo a

diferencia del conglomerado uno que presentó un promedio de $761,3 \pm 184,3$, ubicado a menor altitud en Chaucha (2 757 m s.n.m.). En relación a la proporción del número de individuos por ha (N/ha) diferenciado por clases diamétricas, la clases diamétricas 1 y 2 presentaron los mayores porcentaje de individuos por ha en ambos conglomerados (44,4% y 33,1 en el conglomerado 1; 35,6% y 27,4% en el conglomerado 2, respectivamente) (Figura 5d).

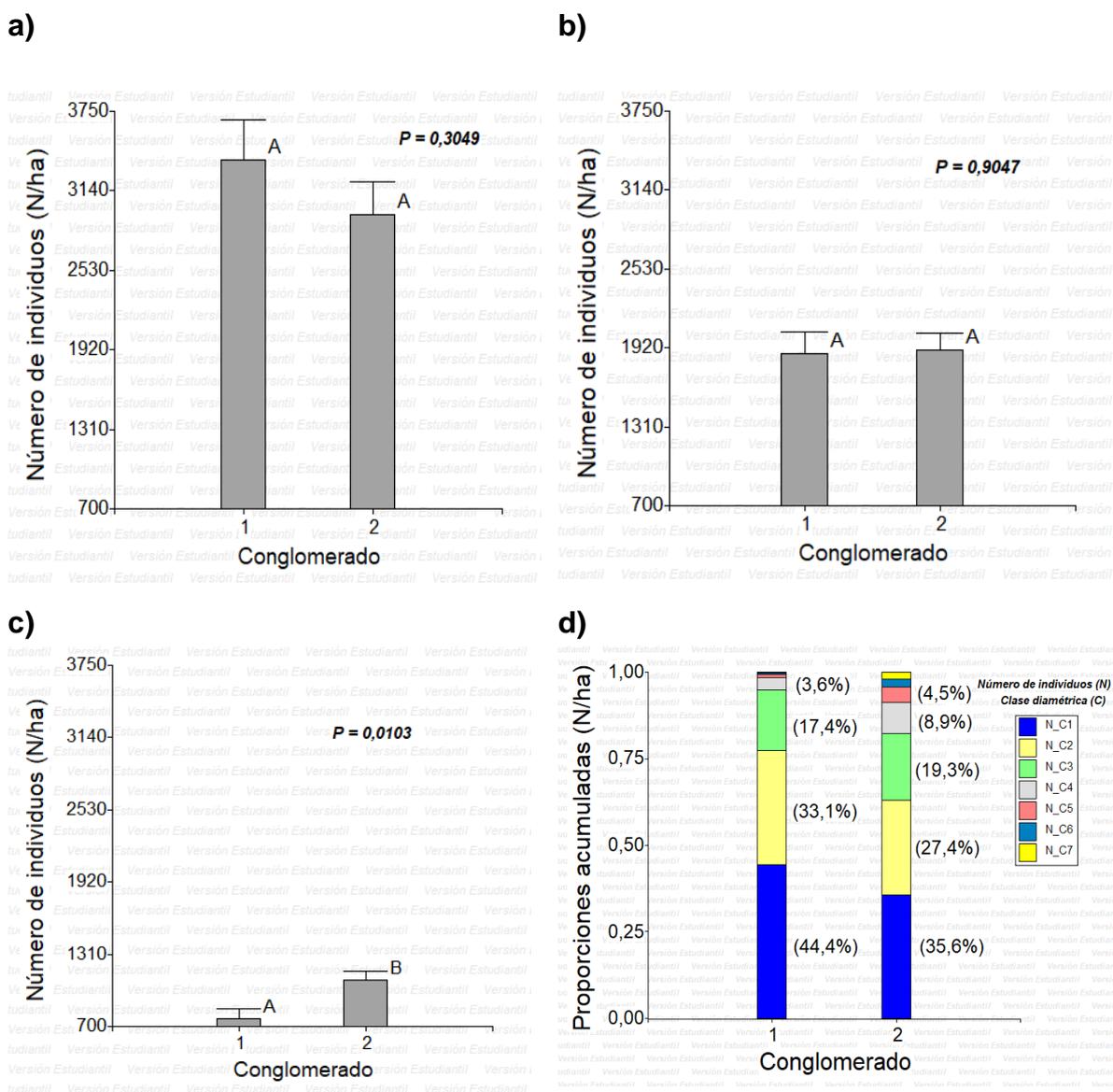


Figura 5: Promedio para el número de individuos (N/ha) \pm errores estándar, para la vegetación leñosa $\geq 2,5$ (a); ≥ 5 (b), ≥ 10 (c) cm de DAP y proporciones acumuladas del área basal (d) obtenidos en parcelas de 0,1 ha.

7.1.3. Estructura vertical

La altura promedio en los conglomerados presentó diferencias significativas ($P < 0,0001$) con mayor promedio para el conglomerado 2 con $9,20 \pm 0,90$ m, a comparación del conglomerado 1 con un promedio de $5,66 \pm 1,27$ m (Figura 6a). La altura máxima fue mayor significativamente ($p = 0,0001$) en el conglomerado 2 con un valor promedio de $22,77 \pm 5,28$ m (Figura 6b).

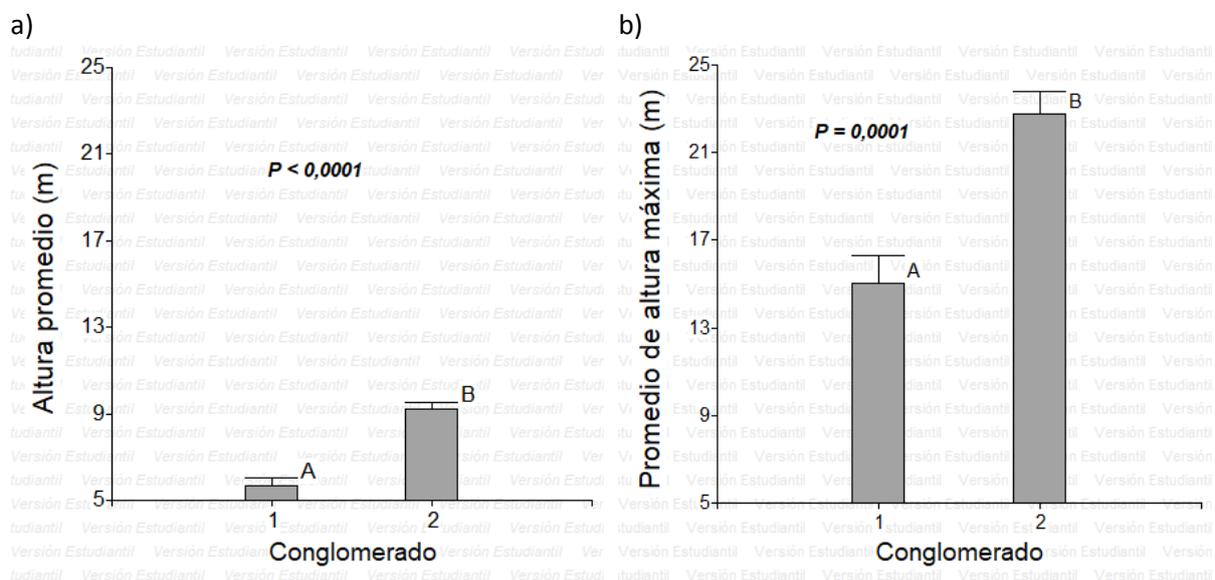
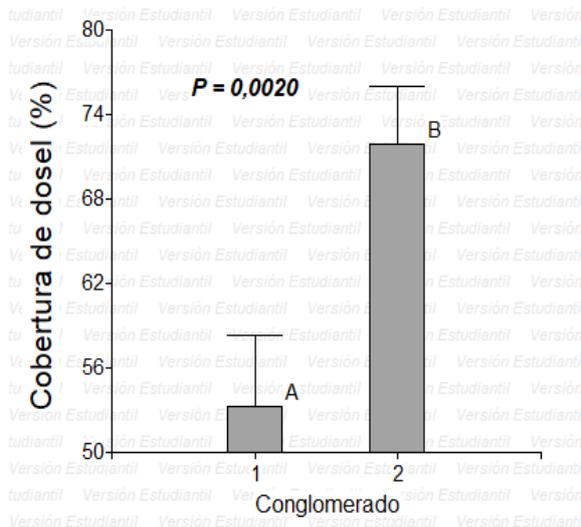


Figura 6: Promedios de altura \pm errores estándar; altura promedio (a), altura máxima promedio (b), en los dos conglomerados, obtenidos en parcelas de 0,1 ha.

7.2. Cobertura arbórea y Área foliar

La cobertura de dosel presentó diferencias significativas ($P = 0,002$) entre los conglomerados 1 y 2, siendo el conglomerado 2 el que mayor porcentaje de cobertura presentó con un promedio de $72 \pm 7,2$ % (Figura 7a). En lo que se refiere al índice de área foliar (IAF) los resultados fueron significativos ($P < 0,0001$) y el valor promedio más alto fue de $2,5 \pm 0,5$ registrado en el conglomerado 2 (San Gerardo) (Figura 7b).

a)



b)

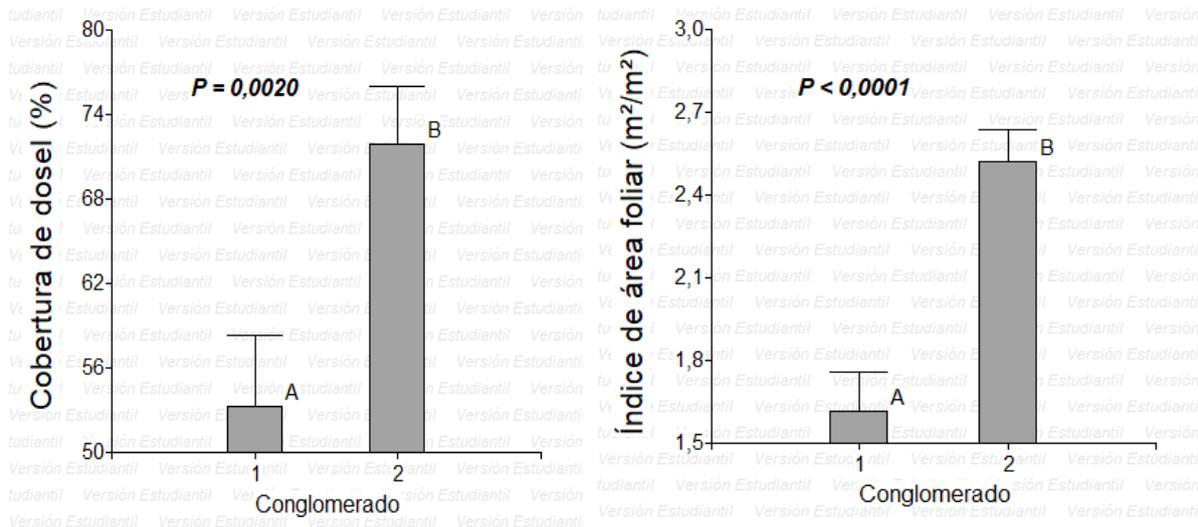


Figura 7: Promedios de la cobertura arbórea \pm errores estándar, para la cobertura del dosel (a) y el índice de área foliar (b) en los dos conglomerados, obtenidos en parcelas de 0,1 ha.

7.3. Carbono almacenado en la necromasa: hojarasca y madera muerta

El carbono almacenado en el componente de hojarasca no presentó diferencias significativas ($P = 0,1540$) entre los dos conglomerados (Figura 8a); pero fue superior descriptivamente en el conglomerado 2 con una media de $4,7 \pm 1,3$ Mg C/ha. No obstante, el carbono almacenado en la madera muerta registró diferencias significativas ($P = 0,01$) con mayores valores para el conglomerado 2 (a mayor altitud) con una media de $0,0052 \pm 0,0027$ Mg C/ha (Figura 8b).

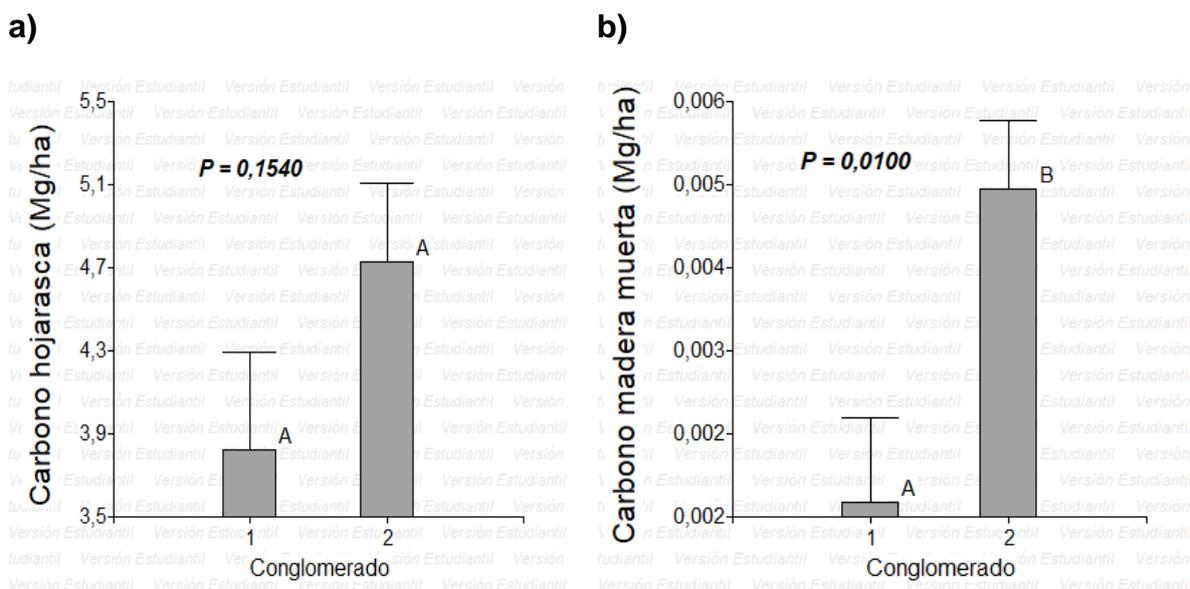


Figura 8: Promedio de carbono almacenado en la necromasa \pm errores estándar, para el carbono en la hojarasca (Mg/ha) (a) y carbono en la madera muerta (Mg/ha) (b), en dos conglomerados, obtenidos en parcelas de 0,1 ha.

7.4. Carbono almacenado en la biomasa subterránea (raíces finas y gruesas)

En el carbono almacenado en la biomasa subterránea no presentó diferencias significativas. Sin embargo, descriptivamente, el C almacenado en las raíces finas ($P = 0,3653$) fue superior en el conglomerado 1 (Chaucha, a menor altitud) con $22,6 \pm 8,2$ Mg C/ha, en comparación que el conglomerado 2 en donde se registró $19,6 \pm 5,9$ Mg C/ha (Figura 9a). Así mismo, en las raíces gruesas ($P = 0,0681$) (Figura 9b) el promedio obtenido en el conglomerado 2 fue superior con $54,2 \pm 25,7$ Mg C/ha, en comparación con el conglomerado 1 en donde se registró $34 \pm 17,1$ Mg C/ha.

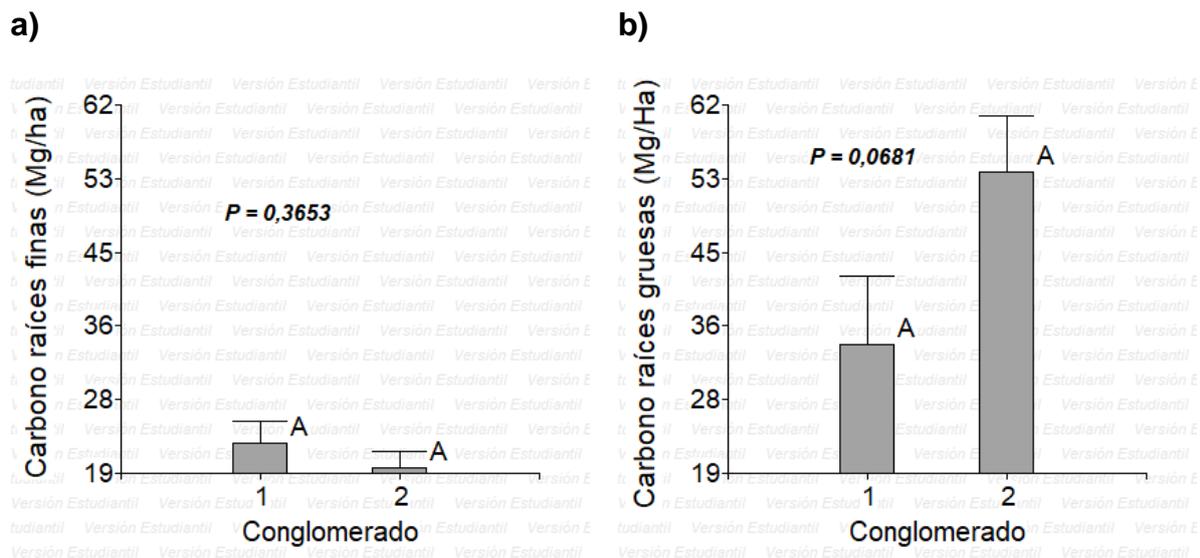


Figura 9: Promedios de carbono almacenado en la biomasa subterránea \pm errores estándar, para el carbono en raíces finas (Mg/ha) (a) y en raíces gruesas (Mg/ha) (b), en dos conglomerados, obtenidos en parcelas de 0,1 ha.

7.5. Carbono almacenado en la biomasa aérea (árboles, palmas y helechos arbóreos)

El carbono almacenado en la biomasa aérea presentó diferencias significativas ($P < 0,0001$) con mayores valores para el conglomerado 2 con un promedio de $136 \pm 37,3$ Mg C/ha, en comparación con el conglomerado 1 que registró $43,87 \pm 24,97$ Mg C/ha (Figura 10).

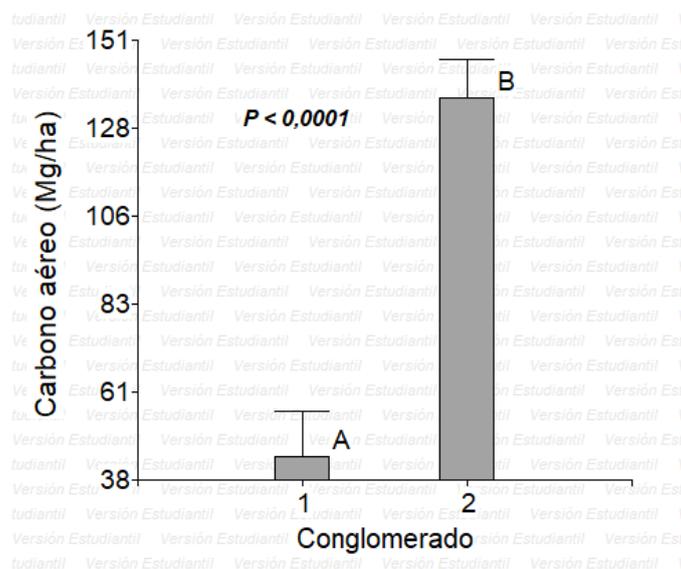


Figura 10: Promedios del contenido de carbono aéreo almacenado \pm errores estándar, obtenidos en parcelas de 0,1 ha.

7.6. Carbono orgánico del suelo (COS)

Los resultados del carbono orgánico del suelo, almacenado a una profundidad desde 0 a 30 cm no presentó diferencias significativas ($P = 0,4321$) entre los dos conglomerados. Sin embargo, de manera descriptiva el mayor contenido de COS lo obtuvo el conglomerado 2 con un promedio de $291 \pm 120,7$ Mg C/ha frente al conglomerado 1 en donde se registró un promedio de $253,52 \pm 63,42$ Mg C/ha (Figura 11).

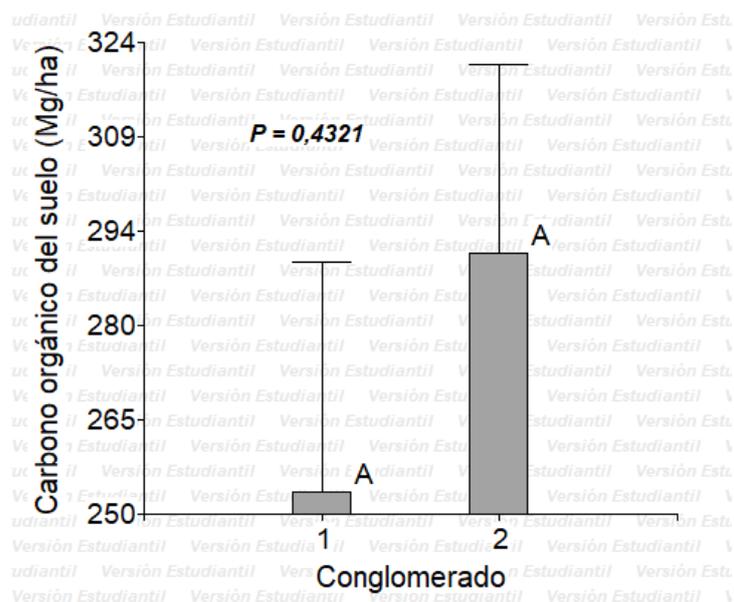


Figura 11: Promedios del carbono orgánico del suelo \pm errores estándar, en dos conglomerados, obtenidos en parcelas de 0,1 ha.

7.7. Carbono orgánico total (COT)

El COT presentó diferencias significativas entre los dos conglomerados ($P = 0,0141$) con mayores valores para el conglomerado 2 (a mayor altitud) con un promedio de $505,56 \pm 136,59$ Mg C/ha en comparación con el conglomerado 1 que registró valores promedio de $357,76 \pm 82,07$ Mg C/ha. Aquí se evidenció que la mayor cantidad de carbono almacenado se encuentra en el conglomerado 2 que está formado por la mayor cantidad de parcelas ubicadas a mayores altitudes (San Gerardo) (Figura 12a). En cuanto al porcentaje de carbono en los diferentes componentes de almacenamiento, se evidencia que en ambos conglomerados el carbono orgánico del suelo es el que mayor valor (57% y 71%) presenta, seguido del carbono almacenado en la biomasa aérea (12% y 27%), en comparación con otros componentes estudiados (Figura 12b).

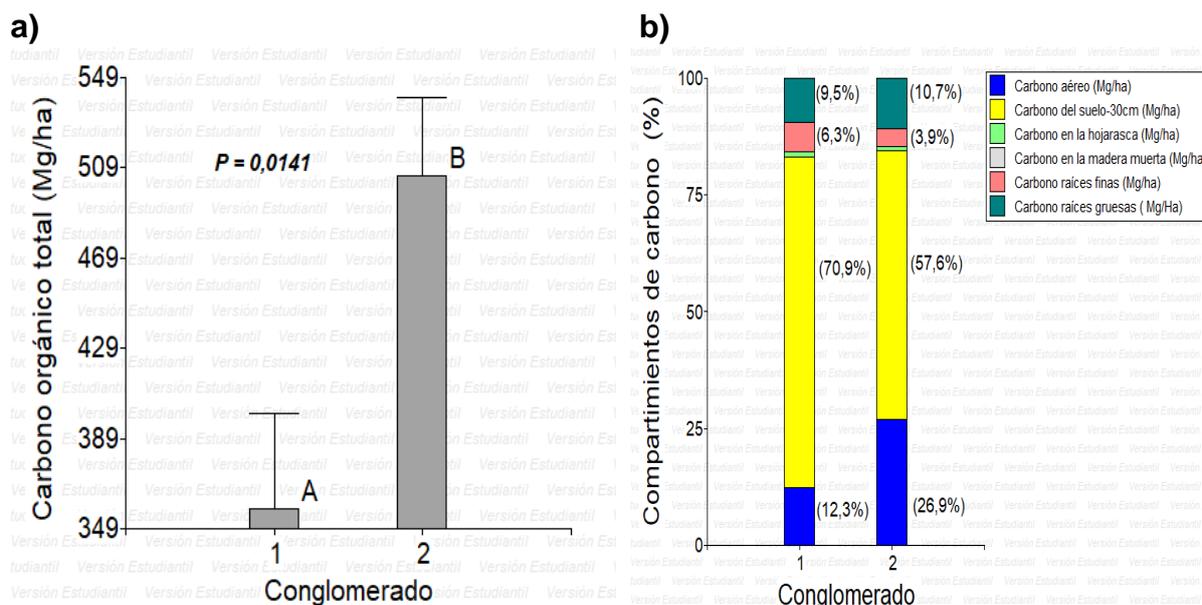


Figura 12: Promedios del carbono orgánico total \pm errores estándar (a) y Porcentajes acumulados de carbono \pm errores estándar (b); obtenidos en parcelas de 0,1 ha.

7.8. Variables del suelo (Densidad aparente, materia orgánica del suelo, pH y conductividad eléctrica)

La densidad aparente no presentó diferencias significativas ($P = 0,11$) a 15 cm de profundidad entre los conglomerados. No obstante, esta variable a los 30 cm si registró diferencias significativas ($P = 0,03$), con mayores valores para el conglomerado 1 ($0,85 \text{ g cm}^{-3}$) (Tabla 3). En lo que se refiere al porcentaje de materia orgánica no se presentaron diferencias significativas a las dos profundidades; sin embargo, los mayores valores de forma descriptiva fueron en el conglomerado 2 (Tabla 3). Con respecto al pH fue igual estadísticamente tanto a 15 cm y 30 cm entre los dos conglomerados (Tabla 3). Lo mismo sucedió con la conductividad eléctrica.



Tabla 3: Resultados obtenidos de densidad aparente, materia orgánica, pH y conductividad eléctrica (CE) a profundidades de 15 y 30 cm, en los conglomerados 1 y 2.

	Conglomerado 1	Conglomerado 2	P-valor
Densidad 15 cm (g cm⁻³)	0,72 ± 0,35 (a)	0,52 ± 0,17 (a)	0,1152
Densidad 30 cm (g cm⁻³)	0,85 ± 0,25 (a)	0,64 ± 0,16 (b)	0,0368
Materia orgánica 15 cm (%)	23,10 ± 8,40 (a)	33,25 ± 12,19 (a)	0,0560
Materia orgánica 30 cm (%)	18,35 ± 7,28 (a)	26,82 ± 11,71 (a)	0,0860
pH 15 cm	5,33 ± 0,35 (a)	5,34 ± 0,59 (a)	0,9618
pH 30 cm	5,80 ± 0,46 (a)	5,47 ± 0,65 (a)	0,2388
CE 15 cm (S/cm)	0,09 ± 0,01 (a)	0,10 ± 0,03 (a)	0,2695
CE 30 cm (S/cm)	0,07 ± 0,01 (a)	0,08 ± 0,03 (a)	0,1679

7.9. Relación de la estructura, cobertura arbórea y suelos con el carbono almacenado

Todas las correlaciones de Pearson registradas entre las variables de estructura y cobertura arbórea con el carbono almacenado se muestran en el Anexo 5. De estas correlaciones fueron significativas 24 ($P < 0,05$) (Tabla 4). Esto permite evidenciar la relación entre las variables que forman parte de la estructura y cobertura de la vegetación leñosa con las variables de carbono almacenado en los diferentes compartimentos.

De las 24 correlaciones significativas, se registraron 11 correlaciones bastante fuertes $r \geq 0,8$; $P < 0,05$. De estas, en la figura 13 se presentan regresiones lineales considerando variables independientes (eje X) a la de estructura, cobertura arbórea y variables dependientes (eje Y) las del carbono almacenado. En las relaciones entre el área basal y carbono aéreo (árboles, palmas y helechos arbóreos) en la vegetación leñosa $\geq 2,5$ (Figura 13a); ≥ 5 (Figura 13b) y ≥ 10 (Figura 13c) cm de DAP se obtuvieron coeficientes de determinación R^2 mayores al 90% ($P < 0,0001$).



El área basal de la clase diamétrica 6 (G_{C6} – m^2/ha) y sus relaciones con el carbono aéreo y carbono con la madera muerta presentaron coeficientes de determinación R^2 mayores al 65% ($P < 0,0001$) (Figura 13d y 13e, respectivamente).

Con respecto al número de individuos de la clase diamétrica 6 (N_{C6} – N/ha) con el carbono aéreo y con el carbono almacenado en la madera muerta presentaron coeficientes R^2 mayores al 60% ($P < 0,0001$) (Figura 13f y figura 13g). Lo mismo sucede con la relación entre la clase diamétrica 7 de número de individuos con las raíces gruesas. (Figura 13h).

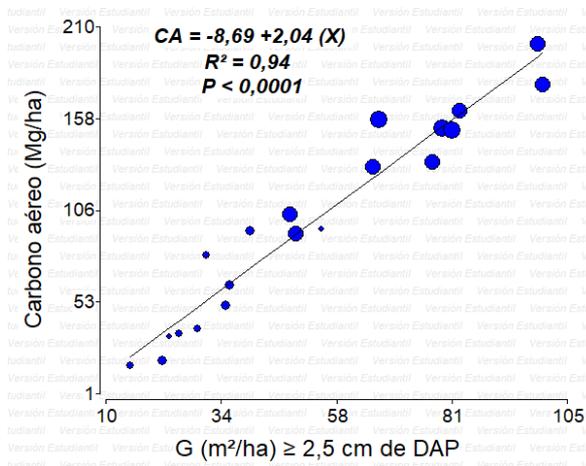
La relación entre el número de individuos de la clase diamétrica 7 (N_{C7}) con el carbono almacenado de las raíces gruesas y con el carbono aéreo presentaron coeficientes de determinación R^2 mayores a 62% ($P < 0,0001$) (Figura 13i y Figura 13j). Por último, la altitud promedio de los individuos (Alt_{prom}) y su relación con el carbono aéreo registró un coeficiente de determinación del 66% ($P < 0,0001$) (Figura 13k).

Tabla 4: Correlaciones de Pearson ($P < 0,05$) entre variables de estructura y cobertura de la vegetación leñosa con el carbono almacenado en diferentes compartimentos, registradas en parcelas de 0,1 ha.

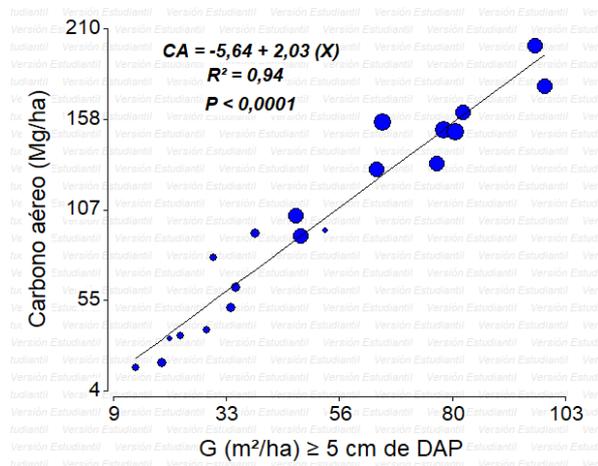
Relaciones entre variables	r	p	Relaciones entre variables	r	p
IAF - carbono aéreo	0,76	0,0001	G \geq 2,5 (cm) - carbono raíces gruesas	0,58	0,0072
IAF- carbono madera muerta	0,64	0,0023	G \geq 5 (cm) - carbono aéreo	0,97	0,0000
G_C4 - carbono aéreo	0,73	0,0002	G \geq 5 (cm) - carbono madera muerta	0,73	0,0003
G_C4 - carbono madera muerta	0,63	0,0028	G \geq 5 (cm) - carbono total	0,62	0,0032
G_C4 - carbono total	0,46	0,0422	G \geq 5 (cm) - carbono raíces gruesas	0,58	0,0075
G_C5 - carbono aéreo	0,79	0,0000	G \geq 10 (cm) - carbono aéreo	0,97	0,0000
G_C5 - carbono madera muerta	0,76	0,0001	G \geq 10 (cm) - carbono madera muerta	0,73	0,0002
G_C6 - carbono aéreo	0,89	0,0000	G \geq 10 (cm) - carbono total	0,63	0,0029
G_C6 - carbono madera muerta	0,82	0,0000	G \geq 10 (cm) - carbono raíces gruesas	0,58	0,0070
G_C7 - carbono aéreo	0,76	0,0001	N \geq 10 (cm) - carbono aéreo	0,66	0,0017
G_C7 - carbono madera muerta	0,45	0,0462	N \geq 10 (cm) - carbono madera muerta	0,45	0,0486
G_C7 - carbono total	0,67	0,0013	Alt_prom - Carbono aéreo	0,82	0,0000
G_C7 - carbono raíces gruesas	0,84	0,0000	Alt_prom-Carbono madera muerta	0,60	0,0048
N_C4 - carbono aéreo	0,73	0,0003	Alt_prom- Carbono total	0,49	0,0282
N_C4 - carbono madera muerta	0,60	0,0048	Alt_prom- Carbono raíces gruesas	0,45	0,0441
N_C5 - carbono aéreo	0,79	0,0000	Alt_max_prom-Carbono aéreo	0,79	0,0000
N_C5 - carbono madera muerta	0,77	0,0001	Alt_max_prom-Carbono madera muerta	0,63	0,0028
N_C6 - carbono aéreo	0,89	0,0000	Alt_max_prom- Carbono total	0,45	0,0491
N_C6 - carbono madera muerta	0,81	0,0000	CE(15cm) - Carbono raíces gruesas	0,56	0,0098
N_C7 - carbono aéreo	0,80	0,0000	CE(15cm) - Carbono orgánico del suelo (30cm)	0,51	0,0203
N_C7 - carbono madera muerta	0,48	0,0318	CE(15cm) - Carbono total	0,61	0,0042
N_C7 - carbono total	0,62	0,0039	CE(30cm) - Carbono raíces gruesas	0,58	0,0068
N_C7 - carbono raíces gruesas	0,83	0,0000	DA (30cm) - Carbono aéreo	-0,47	0,0349
G \geq 2,5 (cm) -carbono aéreo	0,97	0,0000	DA (30cm) - Carbono hojarasca	-0,54	0,0145
G \geq 2,5 (cm) - carbono madera muerta	0,73	0,0003	DA (30cm) - Carbono en el necromasa	-0,54	0,0144
G \geq 2,5 (cm) - carbono total	0,62	0,0033	DA (30cm) - Carbono Total	-0,46	0,0414

Alt max: altura máxima (m); **Alt_prom:** altura promedio (m); **IAF:** Índice de área foliar; **C1....C7:** clases diamétricas; **N:** individuos/ha; **G:** área basal (m²) por ha; **DA:** Densidad aparente del suelo; **CE:** Conductividad eléctrica

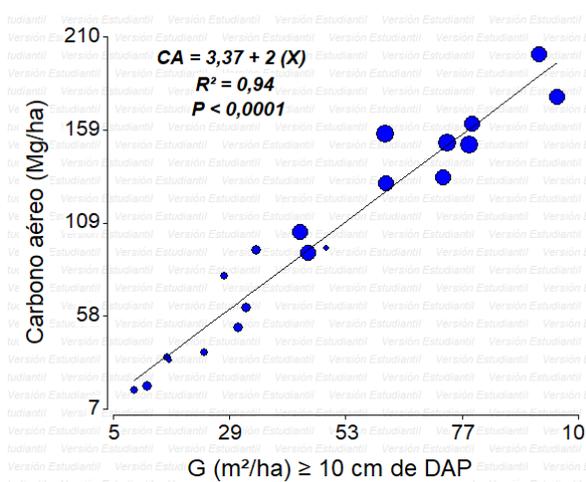
a) Área basal de los individuos con un DAP \geq 2,5cm con el carbono aéreo.



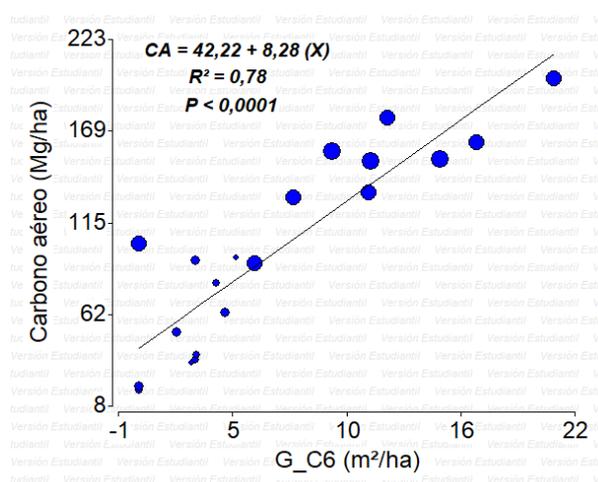
b) Área basal de los individuos con un DAP \geq 5cm con el carbono aéreo.



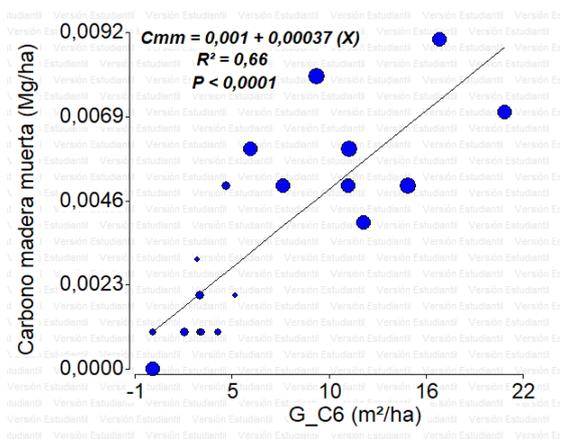
c) Área basal de los individuos con un DAP \geq 10cm con el carbono aéreo.



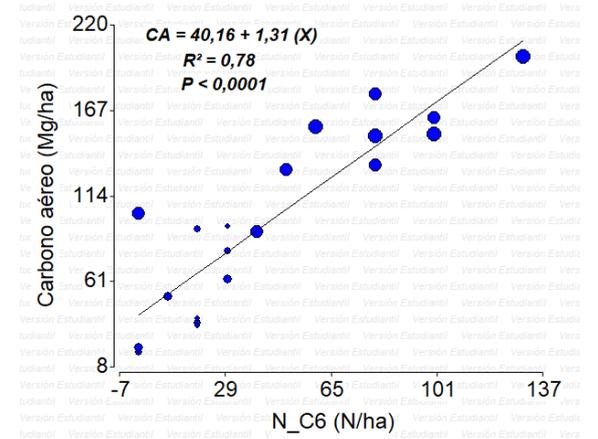
d) Área basal de los individuos de la clase diamétrica 6 con el carbono aéreo.



e) Área basal de los individuos de la clase diamétrica 6 con el carbono de la madera muerta.

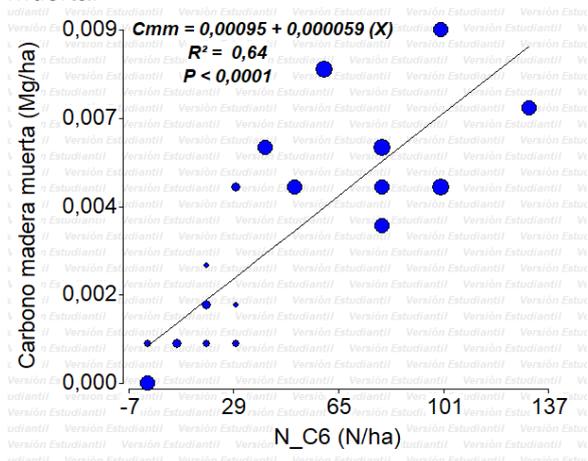


f) Número de individuos de la clase diamétrica 6 con el carbono aéreo.

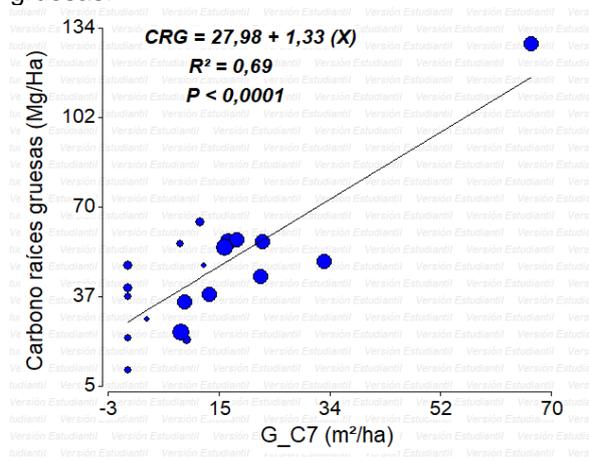




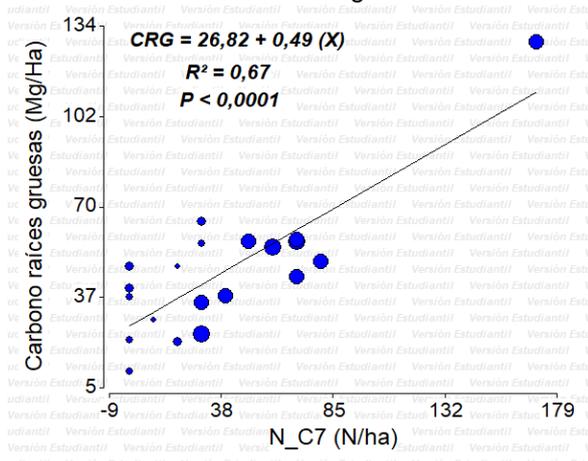
g) Número de individuos de la clase diamétrica 6 con el carbono almacenado en la madera muerta.



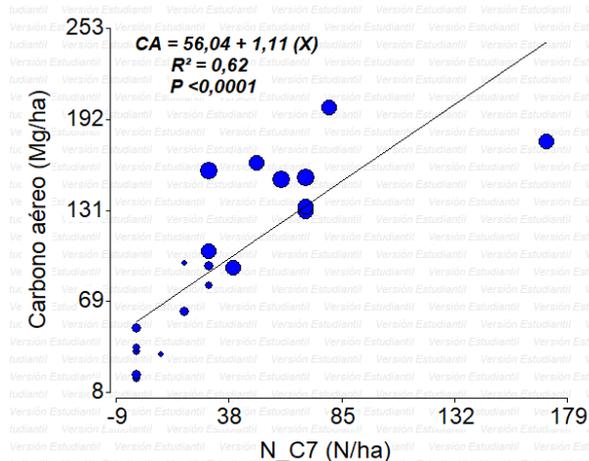
h) Área basal de los individuos de la clase diamétrica 7 con el carbono de las raíces gruesas.



i) Número de individuos de la clase diamétrica 7 con el carbono de las raíces gruesas.



j) Número de individuos de la clase diamétrica 7 con el carbono aéreo.



k) Altura promedio con el carbono aéreo.

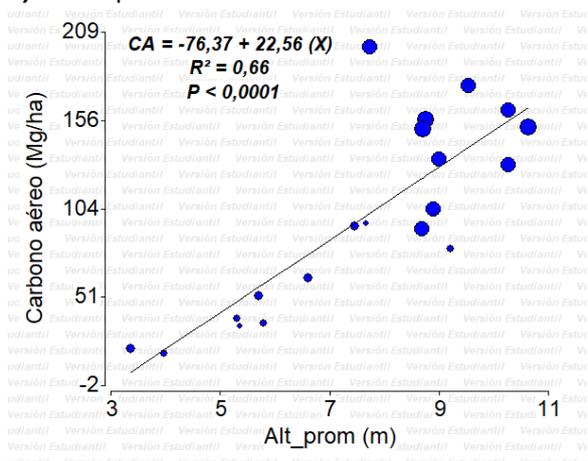


Figura 13: Regresiones lineales entre la estructura y cobertura arbórea con el carbono almacenado en los bosques montanos Andinos del macizo del Cajas. Cada círculo representa una parcela de 0,1 ha. El tamaño de los círculos representa la altitud de cada parcela, círculos pequeños (menor altitud) y círculos grandes (mayor altitud)



8. DISCUSIÓN

Los grupos estructurales de vegetación obtenidos mediante el análisis de conglomerados nos dan a conocer la variación que existe en la estructura de la vegetación entre los grupos de parcelas ubicadas en los dos sitios de estudio. Esto se sustenta ya que para la formación de estos dos grupos se consideró valores de área basal y alturas (altura media y máxima - dominante) que forman parte de la estructura horizontal y vertical de la vegetación, respectivamente. Varios estudios han utilizado técnicas multivariadas para estratificar o tipificar comunidades forestales utilizando parámetros cuantitativos y cualitativos de la vegetación (Jadán, Toledo, et al., 2017; Kalacska et al., 2004). En el presente estudio, confirmó asociadamente con el análisis de similitudes (ANOSIM 8P < 0,05), la percepción inicial a priori sobre la existencia de diferentes tipos de estructuras vegetales en los dos sitios de estudio.

Con respecto a la estructura horizontal, es importante ya que permite predecir la producción y productividad en masas forestales (Clark, Olivas, Oberbauer, Clark, y Ryan, 2008). En el presente estudio, los mayores valores registrados en las parcelas ubicadas a mayor altitud permiten inferir sitios con mayor aptitud forestal dentro de los bosques Andinos. También hace que surjan nuevas preguntas de investigación direccionadas a investigar cuales son las variables ambientales tanto de clima, edáficas y fisiográficas que están influyendo sobre estos resultados. De manera puntual los valores obtenidos en área basal en la parte superior (San Gerardo) considerando los individuos ≥ 5 cm de DAP son sumamente superiores a los registrados por Jadán, Toledo, et al. (2017) en una comunidad forestal de bosque maduro presente en la vertiente oriental andina, en zonas cercanas a nuestra área de estudio (45 m²/ha). Bajo estos mismos resultados, en un bosque dominado por



especies de la familia Podocarpaceae en Zamora Chinchipe a 2100 m s.n.m., se registró (47 m²/ha) (Yaguana, Lozano, Neill, y Asanza, 2012) que comparados con nuestros resultados fueron menores considerando las parcelas ubicadas a mayor altitud o conglomerado 2. Considerando la vegetación leñosa \geq a 10 cm de DAP los resultados obtenidos en el presente estudio son superiores a los reportados por Girardin et al. (2014) en tres países Andinos: la Cordillera del Cóndor en Ecuador (35 m²/ha) en una altitud de 700 m s.n.m.; en Perú (42 m²/ha) a 2700 m s.n.m. y Bolivia (38 m²/ha) a 1200 m s.n.m. Los mayores valores registrados en nuestro estudio corresponden a sitios en la vertiente occidental de los Andes; a nivel de hábitat nuestras parcelas se ubican en zonas con pendientes moderadas en donde posiblemente las condiciones de suelos, geomorfología y formaciones geológicas sean diferentes a los de los otros sitios y estén implicando una alta producción forestal, y por ende valores superiores a nivel regional. Esto debería ser indagado en futuras investigaciones.

Con respecto a la estructura vertical los resultados obtenidos en la altura promedio (9,2 m) del conglomerado 2, es inferior a los resultados obtenidos por Bach et al. (2003) en bosques montanos en Bolivia (< 2100 m s.n.m.) en donde se registró un promedio una altura de 25 m. Este patrón es similar en muchos bosques tropicales en donde la altura del dosel disminuye con la altitud.

Con lo relacionado a la densidad que nos permite conocer la capacidad de albergue que presenta un bosque el cual está condicionado a factores bióticos y abióticos (Cascante, 2001; Donoso, 1981). En nuestro estudio el mayor número de individuos por ha se encontró en el conglomerado 2 (1092,5 ind/ha considerando los individuos con DAP \geq 10), conformado por parcelas ubicadas mayormente en los sitios



de mayor altitud (Figura 5). La densidad registrada en este conglomerado, con árboles ≥ 5 cm de DAP es superior a los reportados por Yaguana et al. (2012) en bosque nublados ubicados en la provincia de Zamora Chinchipe en donde se obtuvo una densidad de 1091 individuos por ha. Bajo los valores registrados en nuestro estudio, posiblemente se relacione con la sucesión secundaria que se da intensamente debido a los aclareos naturales por la caída natural de árboles maduros de gran tamaño en donde emergen una alta cantidad de biotipos arbóreos.

Con respecto a los individuos ≥ 10 cm de DAP los resultados del presente estudio son superiores a los registrados en bosques maduros amazónicos de la Biosfera de Sumaco (700 m s.n.m.) en bosques primarios; aquí Jadán et al. (2015) registró 633 N/ha. También son mayores a los registrados en la provincia de Zamora Chinchipe en un Bosque pie montano (300-1300 m s.n.m.) en donde se registró 660 N/ha. (Jadán, Quizhpe, et al., 2017). Son superiores a los resultados reportados por Segura , Andrade , and Mojica (2019), en un bosque maduro de Colombia (309 N/ha) ubicado entre 3 200 – 3 500 m s.n.m.. Según las comparaciones realizadas la densidad reportada en nuestros resultados es mayor a nivel regional, aspecto muy relevante sobre el cual merece investigar a futuro para determinar cuáles son las variables ambientales que están influyendo sobre estas variaciones.

Con respecto al área basal y el número de individuos por ha diferenciados por clases diamétricas, (Figuras 4d y 5d, respectivamente), es evidente que en las clases superiores el área basal es mayor y la densidad o número de individuos por ha es menor. Estos resultados coinciden con lo reportado por Uslar, Mostacedo, and Saldías (2004), Calzadilla and Cayola (2006) y Jadán et al. (2015) quienes en sus estudios muestran el mismo patrón con respecto a estas variables. Estos patrones se



presentan en bosques naturales maduros con un buen estado de conservación en donde emerge y se desarrolla eficientemente la regeneración natural (Guariguata y Pinard, 1998).

En lo que se refiere a la cobertura del dosel presente en las dos localidades de estudios, nos demuestra que los bosques montanos Andinos presentan una cobertura arbórea muy densa; esto se sustenta en el estudio realizado por Bussmann (2005) en donde se reporta que los bosques Andinos del sur presentan estratos arbóreos muy diversos, los cuales albergan una alta diversidad de especies; asociadamente estas especies con base a su arquitectura de copa forman doseles muy densos. Varios estudios realizados en el trópico andino, por Pillacela (2017), Palomeque et al. (2017) y Jadán et al. (2019) dan a conocer la importancia de la cobertura arbórea nativa sobre las variables de riqueza, diversidad y abundancia en la regeneración natural.

El índice de área foliar (IAF) es la variable que se la relaciona con la productividad y dinámica de un sistema forestal (Clark et al., 2008; Paiva et al., 2015). En los resultados del presente estudio, los mayores valores del IAF registrados en las parcelas ubicadas a mayor altitud o conglomerado 2 se relaciona directamente con los valores del área basal, variable con la cual el IAF está altamente correlacionado ($r = 0,77$ en individuos ≥ 5 cm de DAP y $r = 0,76$ en individuos ≥ 10 cm de DAP). Estos resultados son consistentes con el estudio de Mitchell and Popovich (1997) en donde se reporta relaciones positivas entre estas dos variables. En nuestro estudio el índice de área foliar promedio en el conglomerado 2 (Figura 7b) fue inferior a los reportados por Jiménez and Tulio (2007) en bosques de la reserva de la biosfera de San Francisco ubicados a una altitud que va desde los 2000 y 2290 m s.n.m., en donde se registró un valor promedio de 3 IAF; este comportamiento fue similar al obtenido



por Unger et al. (2013) en donde el resultado fue de 6,6 de IAF en la Cuenca Amazónica a una altitud de 500 m s.n.m. cuyo valor fue superior al del presente estudio. Estas diferencias posiblemente estén relacionadas a las diferencias estructurales y arquitectura de las especies que posiblemente sean diferentes entre estos dos sitios.

Los resultados del carbono almacenado en la hojarasca, que fueron similares entre los conglomerados al no estar correlacionados con la cobertura de dosel, posiblemente estén relacionados con la similitud florística de vegetación siempre verde, poco estacional, que no pierde sus hojas diferenciadamente entre los dos sitios. Esto implica una similar caída y acumulación de hojarasca en el suelo; sin embargo, esto merece ser investigado en estudios exhaustivos posteriores. Los resultados del presente estudio en el conglomerado 2 se asemejan con los resultados obtenidos por Jadán et al. (2015); Jadán, Quizhpe, et al. (2017) con valores de 4,08 y 3,2 Mg C/ha respectivamente, que fueron obtenidos en bosques maduros amazónicos, ubicados en altitudes de 700 m s.n.m. y 800 m s.n.m. Esta similitud, aunque sean resultados obtenidos en diferentes ecosistemas, posiblemente se relacionen al protocolo metodológico y a la similitud de la vegetación con respecto a la superficie foliar y permanencia respecto a su caducidad.

Las diferencias encontradas y mayores cantidades de carbono almacenado de la madera muerta en el conglomerado 2 (Figura 8b) está relacionado con el IAF, variable con la que esta correlacionada positivamente (Tabla 4). Aquí los doseles de los árboles con mayor altura o especies clímax de sucesión avanzada, han suprimido el crecimiento de especies de sucesión temprana como las asteráceas que emergen por los aclareos naturales. Por lo tanto, estas especies que han cumplido su ciclo de



vida, actualmente están aportando como madera muerta. Esto se asocia con el viento que es intenso en los ecosistemas alto Andinos, el cual se encarga de tumbar a los árboles que están muertos en pie. Con respecto a este componente de almacenamiento conjuntamente con la hojarasca, a más de poseer carbono almacenado, se constituyen en fuentes de aportes directos de materia orgánica y nitrógeno al suelo. (Delgado y Pérez, 2002)

Los resultados similares de raíces finas entre los dos conglomerados posiblemente estén ligados a respuestas a factores asociados al estrés, competencias y las limitaciones de nutrientes disponibles en el suelo. Esto es diferente a lo reportado por Moser et al. (2011) quienes afirman que el carbono almacenado en las raíces finas aumenta conforme se incrementa la altitud. Estas diferencias posiblemente estén relacionadas con aspectos físicos del suelo, tanto en textura y estructura, que pueden ser diferentes entre los dos sitios. En lo que se refiere al carbono almacenado en las raíces gruesas, cuyos resultados no son significativos, pero sí notables, superiores en el conglomerado 2, puede ser explicado bajo las correlaciones con el área basal y número de individuos de mayor tamaño, concretamente de la clase diamétrica 7 (Tabla 4). Esto explica el aporte que dan a este componente los árboles de mayor tamaño, los cuales están presentes en las parcelas ubicadas a mayor altitud. Estos resultados son similares a los resultados obtenidos por Moser et al. (2011) quienes reportan el mismo patrón con respecto a la altitud en las provincias de Loja y Zamora Chinchipe en bosques montañosos y premontañosos, lo cual es explicado como una adaptación morfológica de las especies arbóreas ubicadas a mayor altitud las cuales desarrollan mayores raíces para sobrevivir frente a los vientos intensos.



Con respecto a los resultados de carbono en la biomasa aérea los cuales fueron superiores en el conglomerado 2, intrínsecamente se deben a los mayores valores en diámetro y altura e individuos registrados en las parcelas de mayor altitud. Estos resultados son atípicos con los reportados a nivel regional en bosques Andinos por Girardin et al. (2014) en Ecuador, Bolivia y Perú en donde la biomasa aérea disminuye conforme se incrementa la altitud. Las condiciones de sitio ligados a variables edáficas, topográficas y de clima, estarían influyendo sobre este resultado atípico a nivel regional, lo cual merece ser indagado exhaustivamente en estudios posteriores.

El carbono orgánico del suelo presente en los dos conglomerados registró resultados similares (no significativos); esto está relacionado directamente con la cantidad de materia orgánica que fue similar entre los dos sitios (Tabla 3). Los resultados de carbono acumulado en el suelo del presente estudio (Figura 11) son superiores a los obtenidos por Moser et al. (2011), en donde se registraron valores de 106 y 204 Mg C/ha a 30 cm entre altitudes de 1 050 a 3 060 m s.n.m. Nuestros resultados, aunque no son diferentes estadísticamente entre los conglomerados, los mayores valores se registraron en el conglomerado 2 (291 Mg C/ha) ubicado a mayor altitud, cuyo patrón es similar a lo reportado en el estudio anterior, es decir el carbono en este compartimento aumenta conforme se incrementa la altitud. Esto se consolida y fundamenta al comparar los resultados del presente estudio que son superiores a los obtenidos en otros ecosistemas ubicados a menores altitudes, reportados por Sierra et al. (2007) en bosques tropicales y obtenidos a la misma profundidad (30 cm) en Colombia (96 Mg C/ha) en un gradiente de 900 a 1500 m s.n.m. y por Jadán et al. (2015) en la amazonia norte del Ecuador con 66 Mg C/ha.



El carbono orgánico total almacenado fue superior en el conglomerado ubicado a mayor altitud, lo cual se explica bajo la existencia de una mayor biomasa arbórea junto a contenidos superiores de carbono orgánico del suelo. Los resultados obtenidos en el presente estudio, en los dos conglomerados son superiores a los registrados en sitios de menor altitud, reportados por Sierra et al. (2007) con 384 Mg C/ha en Colombia a 900 – 1 500 msnm y Jadán et al. (2015) con 334 Mg C/ha a 700 m s.n.m. Esto permite inferir a nivel regional que existe una relación positiva entre el carbono orgánico total con la altitud. Con lo referente a nuestro estudio, el componente que mayor contenido de carbono aportó fue el carbono orgánico del suelo, esto se corrobora con el estudio realizado por Álvarez, García, Krasilnikov, and García (2013) en bosque montanos de niebla, en donde registró que contenido de carbono orgánico del suelo fue superior a los demás componente de almacenamiento.

Las correlaciones obtenidas en nuestro estudio evidencian que existe una alta correlación entre el área basal y el carbono aéreo, donde las regresiones lineales mostraron un coeficiente de determinación $R^2 = 0,94$. Este comportamiento es similar al reportado por Acosta , Carrillo , and Díaz (2009) en un ecosistema forestal mono específico en donde el área basal presenta una relación fuerte con el carbono almacenado en el biomasa aérea; $R^2 = 0,89$. Este resultado también es consistente con lo reportado por Cuenca et al. (2017), en donde el DAP fue la que mayor predice como variable independiente a la biomasa aérea en arboles leñosos.

Además el área basal se correlacionó con el carbono acumulado en las raíces gruesas con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,69$; esto se corrobora con los resultados obtenidos por Orrego and Valle (2001), en donde se estima mediante ecuaciones la biomasa de raíces gruesas en función del área basal, bajo ajustes



representados con el 98% del coeficiente de determinación. En cuanto a la correlación entre la densidad (N/ha) con el carbono almacenado en parte aérea mostró un coeficiente de determinación de 0,67. Aquí se evidencia el aporte positivo que da la densidad de la vegetación sobre el carbono almacenado. Estos resultados se consolidan bajo lo reportado por Acosta et al. (2009), en donde se enuncia que a mayor densidad de la vegetación se incrementa la cantidad de biomasa.

La relación significativa entre la altura promedio con el carbono aéreo ($R^2 = 0,66$), se consolida bajo el estudio realizado por Escalona et al. (2007) en donde reportó una fuerte relación ($R^2 = 0.89$) entre el contenido de carbono aéreo con base a las variables independientes de altura y también el diámetro. Con respecto a las correlaciones entre el área basal y densidad, con el carbono almacenado en la madera muerta, no existen estudios pertinentes hasta el momento que nos permitan constatar o ratificar la validez de los resultados obtenidos en el presente estudio.



9. CONCLUSIONES

En la estructura arbórea en los Bosques Andinos estudiados, se diferenció dos grupos estructurales de vegetación leñosa: en el conglomerado 1 formado por parcelas ubicadas en la localidad de Chaucha (menor altitud, excepto las parcelas 5 y 10, que corresponden al conglomerado 2) y; el conglomerado 2 mayormente conformadas por las parcelas ubicadas en sitios de mayor altitud. El área basal y el número de individuos fueron mayores en el conglomerado 2, al igual que la cobertura de dosel y el índice de área folia (IAF).

El carbono almacenado en los componentes de la necromasa (hojarasca y madera muerta) fue mayor en el conglomerado 2. En las raíces finas se encontraron valores superiores en el conglomerado 1, no obstante, para las raíces gruesas la mayor cantidad estuvo en el conglomerado 2; el carbono aéreo y el carbono del suelo fueron superiores en el conglomerado 2. En general, el carbono orgánico total fue mayor en el conglomerado 2 es decir en sitios de mayor altitud, en donde el carbono orgánico del suelo y la biomasa aérea fueron los que mayor contenido de carbono orgánico aportaron en ambos conglomerados.

De las relaciones entre las variables de estructura, cobertura con el carbono almacenado se encontraron 24 correlaciones significativas; de estas se registraron 11 correlaciones bastante fuertes, entre ellas el área basal con el carbono aéreo, número de individuos con el carbono acumulado de la madera muerta, área basal con el carbono de las raíces gruesas, número de individuos con el carbono aéreo y la altura promedio de los individuos con el carbono aéreo.



Con los resultados obtenidos se evidencia que existen correlaciones altas entre las variables estudiadas, esto permite el desarrollo de ecuaciones que aportan a la estimación de carbono almacenado en los bosques montanos Andinos, lo que facilitara optimizar recursos, tiempo y una intervención mínima en los ecosistemas. Además con este tipo de estudio se resalta la importancia que tienen los bosques Andinos en base al almacenamiento de carbono, que está ligado directamente con la mitigación del cambio climático, así también se impulsa la conservación y manejo correcto de los bosques Andinos.

10. RECOMENDACIONES

Para conocer cómo funciona de mejor manera la dinámica de los bosques tropicales, es importante que se realice en el futuro más estudios donde se evalué las variables ambientales ya que pueden ser factores condicionantes para la estructura, diversidad y el almacenamiento de carbono de los bosques Andinos.



11. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Acosta , M., Carrillo , F., y Díaz , M. (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et cham. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 105-114.
- Aguirre, C., Valdez, J., Ángeles, G., Santos, H., y Aguirre, A. (2011). Mapeo del índice de área foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos SPOT 5 HRG: regresión y k-nn. *Agrociencia*, 45(1), 105-119.
- Álvarez, G., García, N., Krasilnikov, P., y García, F. (2013). Almacenes de carbono en bosques montanos de niebla de la sierra norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 47(2), 171-180.
- Alves, L., Vieira, S., Scaranello, M., Camargo, P., Santos, F., Joly, C., y Martinelli, L. (2010). Forest structure and live aboveground biomass variation along an elevational gradient of tropical Atlantic moist forest (Brazil). *Forest ecology and management*, 260(5), 679-691.
- Andrade, H., Segura, M., y Rojas, A. (2016). Carbono orgánico del suelo en bosques riparios, arrozales y pasturas en Piedras, Tolima, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 233-241.
- Avilés, V., Velázquez, A., Angeles, G., Etchevers, J., los Santos, H., y Llanderal, T. (2009). Variación en almacenes de carbono en suelos de una toposecuencia. *Agrociencia*, 43(5), 457-464.
- Bach, K., Schawe, M., Beck, S., Gerold, G., Gradstein, S., y Moraes, R. (2003). Vegetación, suelos y clima en los diferentes pisos altitudinales de un bosque montano de Yungas, Bolivia: Primeros resultados. *Ecología en Bolivia*, 38(1), 3-14.
- Barthlott, W., Mutke, J., Rafiqpoor, D., Kier, G., y Kreft, H. (2005). Global centers of vascular plant diversity. *Nova Acta Leopoldina NF*, 92(342), 61-83.
- Barthlott, W., Schmit-Neuerburg, V., Nieder, J., y Engwald, S. (2001). Diversity and abundance of vascular epiphytes: a comparison of secondary vegetation and primary montane rain forest in the Venezuelan Andes. *Plant ecology*, 152(2), 145-156.
- Bond, B., Wang, C., y Gower, S. (2003). Annual carbon flux from woody debris for a boreal black spruce fire chronosequence: Comparison of carbon exchange between boreal black spruce forests and the atmosphere for a wildfire age sequence (FIRE-EXB). *Journal of geophysical research*, 108(D3), WFX1. 1-WFX1. 10.
- Bourgeron, P. (1983). Spatial aspects of vegetation structure. *Ecosystems of the world*.
- Brandão, Z., y Zonta, J. (2016). Hemispherical photography to estimate biophysical variables of cotton. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(9), 789-794.
- Bruijnzeel, L., Kappelle, M., Mulligan, M., y Scatena, F. (2010). Tropical montane cloud forests: state of knowledge and sustainability perspectives in a changing world: Tropical montane cloud forests. *Science for Conservation and Management*
- Bussmann, R. (2005). Bosques Andinos del sur de Ecuador, clasificación, regeneración y uso. *Revista peruana de Biología*, 12(2), 203-216.



- Buytaert, W., Iniguez, V., y De Bievre, B. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest ecology and management*, 251(1-2), 22-30.
- Calzadilla, M., y Cayola, L. (2006). Estructura y composición florística de un bosque amazónico de pie de monte, Área Natural de Manejo Integrado Madidi, La Paz-Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 41(2), 117-129.
- Cascante, M. (2001). Composición florística y estructura de un bosque húmedo premontano en el Valle Central de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 49(1), 213-225.
- Castañeda, A., y Montes, C. (2017). Carbono almacenado en páramo andino. *Entramado*, 13(1), 210-221.
- Castellanos-Castro, C., y Newton, A. C. (2015). Environmental heterogeneity influences successional trajectories in Colombian seasonally dry tropical forests. *Biotropica*, 47(6), 660-671.
- Clark, D. B., Olivas, P. C., Oberbauer, S. F., Clark, D. A., y Ryan, M. G. (2008). First direct landscape-scale measurement of tropical rain forest Leaf Area Index, a key driver of global primary productivity. *Ecology letters*, 11(2), 163-172.
- Cuenca, M., Jadán, O., Cueva, K., y Aguirre, C. (2017). Carbono y ecuaciones alométricas para grupos de especies y bosque de tierras bajas, Amazonía Ecuatoriana. *CEDAMAZ*, 4(1).
- Cuesta, F., Peralvo, M., y Valarezo, N. (2009). *Los bosques montanos de los Andes Tropicales*: Programa Regional ECOBONA-Intercooperation.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M., Delitti, W., . . . Goodman, R. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), 3177-3190.
- Chazdon, R. (2008). Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *science*, 320(5882), 1458-1460.
- Chazdon, R., Pearcy, R., Lee, D., y Fetcher, N. (1996). Photosynthetic responses of tropical forest plants to contrasting light environments *Tropical forest plant ecophysiology* (pp. 5-55): Springer.
- Delgado, L., y Pérez, R. A. P. (2002). La madera muerta de los ecosistemas forestales. *Foresta Veracruzana*, 4(2), 59-66.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M., y Robledo, C. (2014). InfoStat versión 2014. InfoStat Group, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Díaz, M., Lencinas, J., y del Valle, H. (2014). Introducción a la fotografía hemisférica en ciencias forestales. *Madera y bosques*, 20(1), 109-117.
- Dixon, R., Solomon, A., Brown, S., Houghton, R., Trexier, M., y Wisniewski, J. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems.
- Donoso, C. (1981). *Ecología forestal: el bosque y su medio ambiente*. Retrieved from Escalona, F., Aldrete, A., Guerrero, A., González, A., Alcalá, V., y Huerta, H. (2007). Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de pinus greggii Engelm. *Revista Fitotecnía Mexicana*, 30(3), 251-254.
- Eyherabide, M., Sainz, H., Barbieri, P., y Echeverría, H. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelos.
- FAO. (2017). Carbono orgánico del suelo el potencial oculto. doi:978-92-5-309681-7
- Fyllas, N., Bentley, L., Shenkin, A., Asner, G., Atkin, O., Díaz, S., . . . Guerrieri, R. (2017). Solar radiation and functional traits explain the decline of forest



- primary productivity along a tropical elevation gradient. *Ecology letters*, 20(6), 730-740.
- Giam, X. (2017). Global biodiversity loss from tropical deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(23), 5775-5777.
- Gibbon, A., Silman, M., Malhi, Y., Fisher, J., Meir, P., Zimmermann, M., . . . Garcia, K. (2010). Ecosystem carbon storage across the grassland–forest transition in the high Andes of Manu National Park, Peru. *Ecosystems*, 13(7), 1097-1111.
- Girardin, C., Farfan-Rios, W., Garcia, K., Feeley, K., Jørgensen, P., Murakami, A., . . . Fuentes, A. (2014). Spatial patterns of above-ground structure, biomass and composition in a network of six Andean elevation transects. *Plant Ecology y Diversity*, 7(1-2), 161-171.
- Girardin, C., Malhi, Y., Aragao, L., Mamani, M., Huaraca, H., Durand, L., . . . Silman, M. (2010). Net primary productivity allocation and cycling of carbon along a tropical forest elevational transect in the Peruvian Andes. *Global Change Biology*, 16(12), 3176-3192.
- Grewal, K., Buchan, G., y Sherlock, R. (1991). A comparison of three methods of organic carbon determination in some New Zealand soils. *Journal of Soil Science*, 42(2), 251-257.
- Guariguata, M., y Pinard, M. (1998). Ecological knowledge of regeneration from seed in neotropical forest trees: implications for natural forest management. *Forest ecology and management*, 112(1-2), 87-99.
- Homeier, J., Breckle, S., Günter, S., Rollenbeck, R., y Leuschner, C. (2010). Tree diversity, forest structure and productivity along altitudinal and topographical gradients in a species-rich Ecuadorian montane rain forest. *Biotropica*, 42(2), 140-148.
- Hoyle, F. (2013). *Managing soil organic matter: a practical guide*: GRDC.
- IPCC. (2003). Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*.
- Jadán Maza, O., Cedillo Tapia, H., Zea Dávila, P., Bermudez, F., Díaz Granda, L., Pillacela Chin, J. P., . . . Vaca Vaca, C. M. (2019). Regeneración de árboles en ecosistemas naturales y plantaciones de *Pinus patula* (Pinaceae) dentro de un gradiente altitudinal andino (Azuay, Ecuador).
- Jadán, O., Cedillo, H., Pillacela, P., Gualpa, D., Gordillo, A., Zea, P., . . . Quizhpe, W. (2019). Regeneración de *Pinus patula* (Pinaceae) en ecosistemas naturales y plantaciones, en un gradiente altitudinal andino, Azuay, Ecuador. *Revista de Biología Tropical*, 67(1).
- Jadán, O., Cifuentes, M., Torres, B., Selesi, D., Veintimilla, D., y Günter, S. (2015). Influence du couvert forestier sur la diversité, les stocks de carbone et la productivité des cacaoyères dans la région amazonienne de l'équateur. *Bois y Forêts des tropiques*, 325(325), 35-47.
- Jadán, O., Quizhpe, W., Pacheco, E., Aguirre, Z., González, M., Ponce, E., y Peña, D. (2017). Riqueza florística y carbono almacenado en tres pisos altitudinales de bosques amazónicos, Zamora Chinchipe, Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 7(1).
- Jadán, O., Toledo, C., Tepán, B., Cedillo, H., Peralta, Á., Zea, P., . . . Vaca, C. (2017). Comunidades forestales en bosques secundarios alto-Andinos (Azuay, Ecuador). *Bosque (Valdivia)*, 38(1), 141-154.



- Jiménez, L., y Tulio, M. (2007). *Determinación del Índice de Área Vertical en dependencia del Índice de Área Foliar, en un bosque de Cresta Andino en la Reserva de Biosfera San Francisco*. Universidad del Azuay.
- Kalacska, M., Sanchez, G., Calvo, J., Quesada, M., Rivard, B., y Janzen, D. (2004). Species composition, similarity and diversity in three successional stages of a seasonally dry tropical forest. *Forest ecology and management*, 200(1-3), 227-247.
- Klinge, H., Rodrigues, W., Brunig, E., y Fittkau, E. (1975). Biomass and structure in a central Amazonian rain forest *Tropical ecological systems* (pp. 115-122): Springer.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1-2), 1-22.
- MacDicken, K. (1997). A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. 87.
- MEA. (2005). *Ecosystems and human well-being* (Vol. 5): Island press Washington, DC:.
- Melo, O., y Vargas, R. (2003). Evaluación ecológica y silvicultural de ecosistemas boscosos. *Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia*.
- Mitchell, J., y Popovich, S. (1997). Effectiveness of basal area for estimating canopy cover of ponderosa pine. *Forest ecology and management*, 95(1), 45-51.
- Mogollón, J., Rivas, W., Martínez, A., Campos, Y., y Márquez, E. (2015). Carbono orgánico del suelo en un gradiente altitudinal en la Península de Paraguaná, Venezuela. *Multiciencias*, 15(3), 271-280.
- Moser, G., Leuschner, C., Hertel, D., Graefe, S., Soethe, N., y Iost, S. (2011). Elevation effects on the carbon budget of tropical mountain forests (S Ecuador): the role of the belowground compartment. *Global Change Biology*, 17(6), 2211-2226.
- Mulkey, S., Chazdon, R., y Smith, A. (2012). *Tropical forest plant ecophysiology*: Springer Science y Business Media.
- Nelson, B., Mesquita, R., Pereira, J., De Souza, S., Batista, G., y Couto, L. (1999). Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *Forest ecology and management*, 117(1-3), 149-167.
- Orrego, S., y Valle, J. (2001). *Existencias y tasas de incremento neto de la biomasa y del carbono en bosques primarios y secundarios de Colombia*. Paper presented at the Valdivia: Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales.
- Paiva, A. O., Silva, L. C. R., y Haridasan, M. (2015). Productivity-efficiency tradeoffs in tropical gallery forest-savanna transitions: linking plant and soil processes through litter input and composition. *Plant Ecology*, 216(6), 775-787.
- Palomeque, X., Günter, S., Siddons, D., Hildebrandt, P., Stimm, B., Aguirre, N., . . . Weber, M. (2017). Natural or assisted succession as approach of forest recovery on abandoned lands with different land use history in the Andes of Southern Ecuador. *New forests*, 48(5), 643-662.
- Penman, G., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., . . . Tanabe, K. (2003). Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. *Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático*, 628.



- Pillacela, D. (2017). *Evaluación de la regeneración natural su relación con variables ambientales y de cobertura arbórea en ecosistemas naturales alto Andinos de la Provincia del Azuay*.
- Poorter, L., Van Der Sande, M., Thompson, J., Arets, E., Alarcón, A., Álvarez-Sánchez, J., . . . Boit, A. (2015). Diversity enhances carbon storage in tropical forests. *Global Ecology and Biogeography*, 24(11), 1314-1328.
- Promis, Á. (2013). Medición y estimación del ambiente lumínico en el interior del bosque: Una revisión. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(1), 139-146.
- Ramirez, J., Cuesta, F., Devenish, C., Peralvo, M., Jarvis, A., y Arnillas, C. (2014). Using species distributions models for designing conservation strategies of Tropical Andean biodiversity under climate change. *Journal for Nature Conservation*, 22(5), 391-404.
- Richter, M., Diertl, K., Peters, T., y Bussman, R. (2008). Vegetation structures and ecological features of the upper timberline ecotone. *Ecological Studies*, 198, 123.
- Salazar, M., Vílchez, B., Chazdon, R., Gutiérrez, M., Malavasi, E., y Bonilla, M. (2012). Diversidad y estructura horizontal en los bosques tropicales del Corredor Biológico de Osa, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 9(23), 19-28.
- Sánchez, P., y Castaño, C. (1994). Aproximación a la definición de criterios para la zonificación y ordenamiento forestal en Colombia: Carlos Castaño Uribe Editores.
- Schulte, E., y Hopkins, B. (1996). Estimation of soil organic matter by weight loss-on-ignition. *Soil organic matter: Analysis and interpretation(soilorganicmatt)*, 21-31.
- Segura, D., Jiménez, D., Chinchero, M., Iglesias, J., y Sola, A. (2016). Evaluación nacional forestal del Ecuador, un proceso en construcción hacia el monitoreo de los bosques y la biodiversidad.
- Segura, M., Andrade, H., y Mojica, C. (2019). Estructura, composición florística y almacenamiento de carbono en bosques nativos del páramo de Anaime, Tolima, Colombia. *Ciência Florestal*, 29(1), 157-168.
- Sierra, C., Valle, J., Orrego, S., Moreno, F., Harmon, M., Zapata, M., . . . Restrepo, D. (2007). Total carbon stocks in a tropical forest landscape of the Porce region, Colombia. *Forest ecology and management*, 243(2-3), 299-309.
- Somarriba, E., Cerda, R., Orozco, L., Cifuentes, M., Dávila, H., Espin, T., . . . Poveda, V. (2013). Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, ecosystems y environment*, 173, 46-57.
- Spracklen, D., y Righelato, R. (2014). Tropical montane forests are a larger than expected global carbon store. *Biogeosciences*, 11(10), 2741-2754.
- Swenson, N., y Enquist, B. (2008). The relationship between stem and branch wood specific gravity and the ability of each measure to predict leaf area. *American Journal of Botany*, 95(4), 516-519.
- Unger, M., Homeier, J., y Leuschner, C. (2013). Relationships among leaf area index, below-canopy light availability and tree diversity along a transect from tropical lowland to montane forests in NE Ecuador. *Tropical Ecology*, 54(1), 33-45.



- Uslar, Y., Mostacedo, B., y Saldías, M. (2004). Composición, estructura y dinámica de un bosque seco semidecíduo en Santa Cruz, Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 39(1), 25-43.
- Walkley, A., y Black, A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.
- Yaguana, C., Lozano, D., Neill, D., y Asanza, M. (2012). Diversidad florística y estructura del bosque nublado del Río Numbala, Zamora-Chinchipec, Ecuador: El “bosque gigante” de Podocarpaceae adyacente al Parque Nacional Podocarpus. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 1(3), 226-247.
- Yepes, A., Sierra, A., Niño, L., López, M., Garay, C., Vargas, D., . . . Barbosa, A. (2016). Biomasa y carbono total almacenado en robledales del sur de los Andes Colombianos: aportes para el enfoque REDD+ a escala de proyectos. *Revista de Biología Tropical*, 64(1), 415-428.

12. ANEXOS

Anexo 1: Bosques pertenientes macizo del cajas, localidad de San Gerardo (izquierda) y Chaucha (derecha).



Anexo 2: Toma de DAP de un individuo y cuadrante de muestreo de la hojarasca.



Anexo 3: Recolección de muestras de raíces finas, gruesas y toma de muestras de suelo.





Anexo 4: Toma de datos de cobertura arbórea: cobertura del dosel (densiómetro) y el índice de área foliar.





Anexo 5: Total de correlaciones obtenidas, se muestra las variables relacionadas con su respectivo coeficiente de Pearson y su significancia.

Relaciones entre variables	Pearson	p-valor
IAF - carbono aéreo	0,7569	0,0001
IAF - carbono madera muerta	0,6413	0,0023
G_C4 - carbono aéreo	0,7346	0,0002
G_C4 - carbono madera muerta	0,6322	0,0028
G_C4 - carbono total	0,4581	0,0422
G_C5 - carbono aéreo	0,7878	0,0000
G_C5 - carbono madera muerta	0,7550	0,0001
G_C6 - carbono aéreo	0,8904	0,0000
G_C6 - carbono madera muerta	0,8223	0,0000
G_C7 - carbono aéreo	0,7584	0,0001
G_C7 - carbono madera muerta	0,4506	0,0462
G_C7 - carbono total	0,6664	0,0013
G_C7 - carbono raíces gruesas	0,8398	0,0000
N_C4 - carbono aéreo	0,7266	0,0003
N_C4 - carbono madera muerta	0,6042	0,0048
N_C5 - carbono aéreo	0,7873	0,0000
N_C5 - carbono madera muerta	0,7714	0,0001
N_C6 - carbono aéreo	0,8876	0,0000
N_C6 - carbono madera muerta	0,8139	0,0000
N_C7 - carbono aéreo	0,8018	0,0000
N_C7 - carbono madera muerta	0,4811	0,0318
N_C7 - carbono total	0,6154	0,0039
N_C7 - carbono raíces gruesas	0,8292	0,0000
G>2,5 cm - carbono aéreo	0,9695	0,0000
G>2,5 cm - carbono madera muerta	0,7282	0,0003
G>2,5 cm - carbono total	0,6238	0,0033
G>2,5 cm - carbono raíces gruesas	0,5812	0,0072
G>5 cm - carbono aéreo	0,9705	0,0000
G>5 cm - carbono madera muerta	0,7286	0,0003
G>5 cm - carbono total	0,6250	0,0032
G>5 cm - carbono raíces gruesas	0,5790	0,0075
N>10 cm - carbono aéreo	0,6551	0,0017
N>10 cm - carbono madera muerta	0,4462	0,0486
G>10 cm - carbono aéreo	0,9714	0,0000
G>10 cm - carbono madera muerta	0,7329	0,0002
G>10 cm - carbono total	0,6306	0,0029
G>10 cm - carbono raíces gruesas	0,5830	0,0070
Prom_Alt - carbono aéreo	0,8221	0,0000
Prom_Alt - carbono madera muerta	0,6037	0,0048
Prom_Alt - carbono total	0,4901	0,0282



Prom_Alt - carbono raíces gruesas	0,4545	0,0441
Prom_Alt_max - carbono aéreo	0,7902	0,0000
Prom_Alt_max - carbono madera muerta	0,6313	0,0028
Prom_Alt_max - carbono total	0,4454	0,0491
CE(15cm) - carbono raíces gruesas	0,5625	0,0098
CE(15cm) - carbono orgánico del suelo (30cm)	0,5142	0,0204
CE(15cm) - carbono total	0,6099	0,0043
CE(30cm) - carbono raíces gruesas	0,5841	0,0068
Densidad (30cm) - carbono aéreo	-0,4734	0,0350
Densidad (30cm) - carbono hojarasca	-0,5374	0,0145
Densidad (30cm) - carbono necromasa	-0,5377	0,0145
Densidad (30cm) - carbono total	-0,4597	0,0414



Anexo 6: Hoja de campo para la descripción general de la parcela de 0,1 ha.

FICHA GENERAL DE PARCELA

NOMBRE DE LA PARCELA:
RESPONSABLE:

FECHA DE INICIO:
FECHA DE FINALIZACIÓN:
PERSONAS IMPLICADAS:

COORDENADAS EN PUNTO 1:
COORDENADAS EN PUNTO 7:
ALTITUD:
PENDIENTE:
ORIENTACIÓN EJE LARGO (50 m):
ORIENTACIÓN EJE CORTO (20 m):
POSICIÓN TOPOGRÁFICA:

DESCRIPCIÓN GENERAL

- esquema de la parcela y alrededores (subparcelas, orientación, y cualquier heterogeneidad)
- tipo de bosque
- instrucciones exactas de cómo llegar
- tipo de cobertura vegetal (ej. suelo desnudo, mucha hojarasca, mucho arbusto...)
- distancia a carreteras / caminos
- particularidades de la vegetación (presencia de árboles / lianas gruesas, helechos, ...)
- otras particularidades (sendas cercanas, arroyos, árboles caídos, etc)
- frecuencia y tipo de disturbancias comunes
- influencia humana (visible, posible, cercanía potreros, uso de tierra, etc)
- información sobre la matriz en la que se enclava la parcela



Anexo 7: Hoja de campo para los datos del muestro de suelo.

MUESTREO DE SUELO (0-15 cm)

NOMBRE DE LA PARCELA:

RESPONSABLE:

FECHA:

1) ANÁLISIS QUÍMICOS (5 sub- muestras)

•		•		•
	•		•	

Profundidad del horizonte orgánico (cm) en

Sub-muestra 1:

sub- muestra 2:

sub- muestra 3: promedio:

sub- muestra 4:

sub- muestra 5:

Color del suelo en fresco de la muestra total :

2) DENSIDAD APARENTE (3 sub- muestras)

•				•
		•		

Volumen del cilindro utilizado:



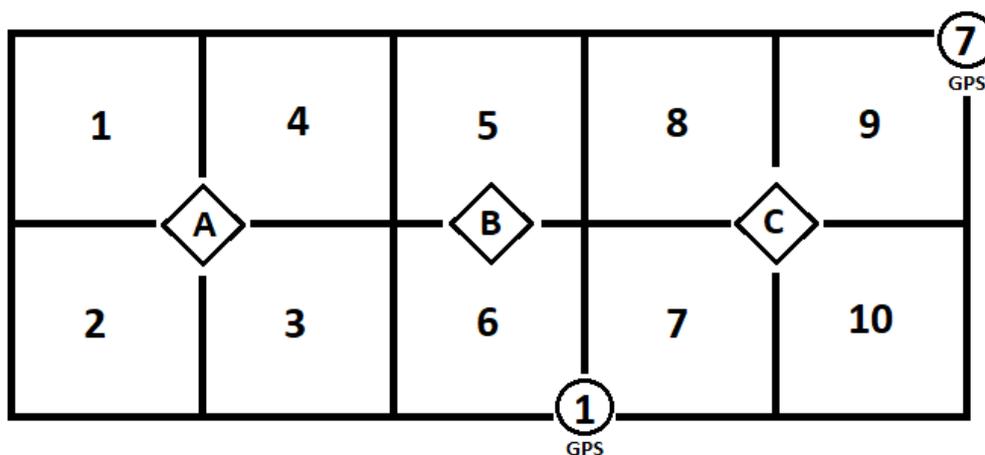
Anexo 8: Hoja de campo en donde se indica los puntos de muestreo y los datos de los parámetros de cobertura arbórea.

FOTOS HEMISFÉRICAS Y DENSIÓMETRO

NOMBRE DE LA PARCELA:

RESPONSABLE:

FECHA:



TOMAR FOTOS HEMISFÉRICAS CON EL LAI EN LOS PUNTOS

NOMBRE DEL ARCHIVO EN A:

NOMBRE DEL ARCHIVO EN B:

NOMBRE DEL ARCHIVO EN C:



TOMAR DATOS CON EL DENSIÓMETRO EN LOS PUNTOS

DATOS EN A: N= S= E= W=

DATOS EN B: N= S= E= W=

DATOS EN C: N= S= E= W=

COORDENADAS EN PUNTO 1:

COORDENADAS EN PUNTO 7:

