



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES

ESCUELA DE INGENIERÍA EN ECOTURISMO

**ESTIMACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO DE LA
ESPECIE *Polylepis reticulata*, MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES
MULTIESPECTRALES, EN EL BOSQUE DE POLYLEPIS DE LA
RESERVA DE PRODUCCIÓN DE FAUNA CHIMBORAZO.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN
PROYECTO TÉCNICO PARA TITULACIÓN DE GRADO**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL TÍTULO DE INGENIERO EN ECOTURISMO**

VILLEGAS ORTIZ BRAULIO MAURICIO

**RIOBAMBA – ECUADOR
2020**

©2020, **Braulio Mauricio Villegas Ortiz.**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES****ESCUELA DE INGENIERÍA EN ECOTURISMO**

El Tribunal del Trabajo de Titulación, certifica que: El trabajo de titulación denominado: **ESTIMACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO DE LA ESPECIE *Polylepis reticulata*, MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES, EN EL BOSQUE DE POLYLEPIS DE LA RESERVA DE PRODUCCIÓN DE FAUNA CHIMBORAZO**, de responsabilidad del señor egresado Braulio Mauricio Villegas Ortiz, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

JUAN CARLOS CARRASCO BAQUERO
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



ANDREA DAMARIS HERNÁNDEZ ALLAUCA
ASESORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN




Riobamba, 15 de enero del 2020

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Braulio Mauricio Villegas Ortiz, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes y el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

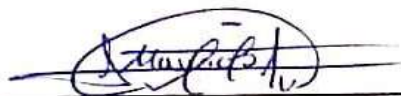
Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Riobamba, 15 de enero del 2020.



Braulio Mauricio Villegas Ortiz
C.I. 180476871-9

Yo, Braulio Mauricio Villegas Ortiz soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis y el patrimonio intelectual del Trabajo de Titulación de Grado pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



BRAULIO MAURICIO VILLEGAS ORTIZ

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación va dedicado: a mis padres Wilson y Rosa por el apoyo incondicional en este proceso de preparación académica y a mi hermana Abigail que ha sido un ejemplo de superación y perseverancia.

Además, a mi abuelita Elvia a quien extraño mucho y siempre estará presente en mi corazón.

Y de manera muy especial a mi novia Jessica, que ha sido uno de los pilares fundamentales en este proceso de formación.

AGRADECIMIENTOS

Quiero empezar agradeciéndole a Dios, por darme salud y vida para poder culminar con éxito este proceso.

También, a todos los maestros que día a día con dedicación impartieron sus conocimientos y nos prepararon para la vida profesional y de manera muy especial quiero agradecer al Ing. Juan Carlos Carrasco y a la Lic. Andrea Hernández por la paciencia y el aporte de sus conocimientos, para que el presente trabajo de investigación se haya desarrollado de la mejor manera.

Gracias a mis padres Rosa y Wilson por sus consejos, por su apoyo incondicional, por su paciencia y porque con su amor y comprensión siempre supieron guiarme, asimismo a mi hermana que con su ejemplo me enseñó que no hay limitaciones para conseguir lo que nos proponemos en la vida.

De manera muy especial quiero agradecer a mi gran amor Jessica, quien fue parte de este proceso y siempre está a mi lado brindándome su apoyo incondicional y motivándome a seguir superándome día a día.

Finalmente, quiero agradecer a todos mis amigos y compañeros de la carrera ya que, de alguna forma u otra, formaron parte de este proceso de formación.

TABLA DE CONTENIDOS

I. ESTIMACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO DE LA ESPECIE <i>Polylepis reticulata</i>, MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES, EN EL BOSQUE DE POLYLEPIS DE LA RESERVA DE PRODUCCIÓN DE FAUNA CHIMBORAZO.....	1
II. INTRODUCCIÓN	1
A. IMPORTANCIA.....	1
B. PROBLEMA	2
C. JUSTIFICACIÓN.....	3
III. OBJETIVOS	4
A. OBJETIVO GENERAL.....	4
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
IV. HIPÓTESIS.....	5
V. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	6
A. PÁRAMO	6
B. POLYLEPIS RETICULATA.....	6
C. CARBONO ORGÁNICO Y BIOMASA	7
1. Ciclo global del carbono.....	7
2. El impacto de los bosques en el ciclo del carbono.....	8
3. Biomasa	8
4. Biomasa y fijación de carbono para los bosques en Ecuador	10
5. Estimación de la Biomasa	10
6. Modelos alométricos de volumen y biomasa	11
7. Ecuaciones alométricas.	12
8. Métodos para Cuantificar el Carbono.....	13
D. VEHÍCULOS AEREOS NO TRIPULADOS (UAV)	14
1. Clasificación de plataformas UAV	15
2. Planeación de vuelo	16
3. Adquisición de imágenes	17
4. Procesamiento de imágenes UAV.....	17
E. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON	18
VI. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
A. CARACTERIZACIÓN DEL LUGAR	20

1. Localización.....	20
2. Ubicación geográfica	20
3. Límites	21
4. Características climáticas	21
5. Clasificación ecológica.....	21
6. Características del suelo.....	24
7. Materiales y equipos.....	24
B. METODOLOGÍA.....	24
VII.RESULTADOS	29
A. APLICACIÓN DE ECUACIONES DE BIOMASA CON DATOS OBTENIDOS EN CAMPO	29
1. Datos dasométricos proporcionados por el proyecto y levantados en campo...29	
2. Estimación de la biomasa, carbono y CO₂.....32	
B. CÁLCULO DE LA BIOMASA DEL BOSQUE CON IMÁGENES MULTIESPECTRALES.....34	
1. Ortofotomosaico	34
2. Imagen multiespectral del área de interés.....35	
3. Modelo digital del terreno.....36	
4. Modelo digital de la superficie.....37	
5. Crop Surface Model	38
6. Análisis estadístico.....42	
7. Estimación de Biomasa, Carbono y CO₂	43
C. CORRELACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE EL CÁLCULO DE BIOMASA CON ECUACIONES Y CON IMÁGENES MULTIESPECTRALES.....45	
VIII. CONCLUSIONES.....	49
IX. RECOMENDACIONES	50
X. RESUMEN	51
XI. SUMMARY.....	52
XII. BIBLIOGRAFÍA.....	53
XIII. ANEXOS.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura VI- 1 Ubicación geográfica del Bosque Polylepis en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo.....	20
Figura VI- 2 Mapa transectos relicto Polylepis	26
Figura VII- 1 Ortofotomosaico IR	34
Figura VII- 2 Imagen multiespectral	35
Figura VII- 3 Modelo digital del terreno.....	36
Figura VII- 4 Modelo digital de la superficie	37
Figura VII- 5 Crop Surface Model Bosque Polylepis	40
Figura VII- 6 Modelo de regresión logarítmica	43
Figura VII- 7 Módulo Coeficiente de Correlación.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla VI- 1 Zonas de vida RPFCH.....	21
Tabla VII- 1 Media de la altura (h)	29
Tabla VII- 2 Media del diámetro a la altura del pecho (dap)	30
Tabla VII- 3 Media diámetro de copa (DC) por parcela	31
Tabla VII- 4 Estimación de biomasa (ton/ha)	32
Tabla VII- 5 Valor digital (CSM) - área total del bosque	38
Tabla VII- 6 Valor digital (CSM).....	38
Tabla VII- 7 Valor digital por parcela capa Crop Surface Model	41
Tabla VII- 8 Coeficientes de regresión	42
Tabla VII- 9 Valores de biomasa, carbono y CO ₂	43
Tabla VII- 10 Conjunto de datos de biomasa agrupados	45
Tabla VII- 11 Correlación estadística - biomasa de las parcelas.....	47
Tabla VII- 12 Correlación estadística - biomasa total.....	48
Tabla VII- 13 Total de biomasa, carbono y CO ₂	48

I. ESTIMACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO DE LA ESPECIE *Polylepis reticulata*, MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES, EN EL BOSQUE DE POLYLEPIS DE LA RESERVA DE PRODUCCIÓN DE FAUNA CHIMBORAZO.

II. INTRODUCCIÓN

A. IMPORTANCIA

Uno de los principales problemas del medio ambiente que afectan al planeta Tierra, está relacionado con el cambio climático (Orrego *et al.*, 2003), ésta variación en la temperatura es provocada principalmente por los gases de efecto invernadero (Ciesla, 1996), siendo el CO₂ el principal gas generado por la actividad humana (Schlegel, 2001). La subsistencia en la atmosfera del CO₂ ha dado lugar a que se genere este fenómeno que produce alteraciones en el ciclo de vida de los ecosistemas y es por esto que las medidas de mitigación están direccionadas a su disminución y captura (Pearson *et al.*, 2005).

Los bosques son ecosistemas de gran importancia debido a que, además de proporcionar servicios ecosistémicos, desempeñan una importante función como sumidero de CO₂ (Gasparri *et al.*, 2004), pueden capturar mayor cantidad de carbono que otros ecosistemas terrestres (Benjamín & Maser, 2001), a nivel mundial almacenan más de 650,000 millones de toneladas de carbono (Harris, Birjandi, & García, 2011). El CO₂ presente en la atmósfera se captura en los procesos metabólicos de las plantas a través de la fotosíntesis; en este proceso, el carbono atmosférico secuestrado nuevamente se expresa en términos de biomasa constituyendo al desarrollo del follaje, ramas, raíces, troncos, flores y frutos (Rodríguez *et al.*, 2006).

En el Ecuador, el tema del cambio climático es tratado dentro de la política nacional, donde la evaluación de los bosques es un tema prioritario, por lo que es relevante la caracterización y valoración de sus servicios ecosistémicos, servicios tales como el carbono almacenado (MAE, 2013). Cerca del 50% del área del país está cubierta por bosques (Sierra, 1999), además un total de 1,63 giga toneladas (Gt) de carbono se encuentran almacenadas en la biomasa del Ecuador. Más de 1 Gt de este carbono está almacenado en áreas que fueron clasificadas como de densidades de carbono alta o muy alta, principalmente en la región amazónica o en los pies de monte de los Andes (MAE, 2010). Es así que el Programa Socio Bosque ecuatoriano busca conservar más de 3 millones de hectáreas de bosque nativo, páramo (praderas a altitudes elevadas) y otros tipos de vegetación nativas del Ecuador, conservando así las reservas de carbono y asegurando los beneficios múltiples (MAE, 2008).

Asimismo, casi el 24% del carbono en la biomasa del país se encuentra almacenado en áreas protegidas y el 8,5% en bosques de protección (MAE, 2007), una de las áreas

protegidas es la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo donde el suministro de carbono orgánico contribuye a la producción de los servicios ecosistémicos, además de los recursos naturales no renovables que son indispensables para la vida (Zhicay, 2016).

El bosque de *Polylepis* (*Polylepis reticulata*) (Hieron, 1896), se encuentra localizado en la parte noreste de la reserva (MAE, 2013), en una gran pared rocosa. Caracterizado por ser un relicto con una extensión de 0,354 hectáreas, hábitat de 6252 especímenes de flora, entre las cuales predomina la especie endémica *Polylepis reticulata* Hieron (Castillo et al., 2017), que ha sido incluida dentro de la categoría “vulnerable” por la Lista Roja de Especies Amenazadas de la UICN (Romoleroux & Pitman, 2004). Como un efecto del calentamiento global y las condiciones modernas está en línea con las predicciones según las cuales los bosques alto andinos podrían ser particularmente vulnerables al cambio climático futuro previsto (Malcolm et al., 2006).

B. PROBLEMA

La estimación de la biomasa en áreas protegidas requiere desarrollar un método de medición con datos que se ajusten a la estructura específica de cada bosque, sin la necesidad de generar tala de árboles (Avenidaño et al., 2009). Para la estimación de biomasa como paso intermedio de la cuantificación de carbono, existen métodos directos que implican la tumba de los árboles conocido como método destructivo e indirectos a partir de medidas dasométricas (Brown, 1997); (Schlegel, 2001) o mediante aplicaciones de teledetección (Montes et al., 2000). Generalmente el método directo ofrece más precisión, dado que los cálculos implican una sola etapa (DAP a biomasa), mientras que el método indirecto requiere varias etapas donde la estimación se puede mejorar dependiendo de la veracidad de los datos de volumen, densidades y factores de expansión (IPCC, 2005).

Aunque los métodos directos son los más frecuentes ya que se han usado para la determinación de la biomasa de árboles, no se adecuan al medio ambiente debido a que llevan implícita la tala de árboles y mayores requerimientos de tiempo y laboriosidad para su procedimiento (Montes et al., 2000); (Zianis & Mencuccini, 2004).

Partiendo de esto el problema en el Bosque de *Polylepis* es que, al estar dentro de un área protegida dedicada a la conservación existen restricciones para la tumba de árboles, es por esto que no es propicio el uso de métodos directos para la estimación de carbono, siendo así la implementación de métodos indirectos a partir de imágenes multiespectrales una alternativa adecuada para la cuantificación de la biomasa en este sitio.

Además la escasa investigación acerca del tema propuesto en el bosque, ha dado lugar a que no existan datos en el área de estudio sobre la capacidad de almacenamiento de carbono de la especie *Polylepis reticulata*, por lo que no se puede conocer el valor tanto económico como ecológico que este sitio tiene dentro de la Reserva y la importancia de conservarlo, ya que al servir de sumidero de CO₂ aporta a la reducción de gases de efecto invernadero, además de purificar el aire que resulta beneficioso para los pobladores de las comunidades aledañas y los turistas que visitan este sitio.

C. JUSTIFICACIÓN

Dado que los bosques actúan como fuentes y sumideros de carbono es necesario estimar la cantidad acumulada en ellos para conocer acerca de su capacidad de almacenamiento, liberación o neutralidad en el ciclo del CO₂ (Brown & Lugo, 1984).

Los Andes del Norte conformados por el occidente de Venezuela, Colombia, Ecuador y norte de Perú son actualmente una de las prioridades mundiales de conservación (Hotspot) debido a su riqueza biológica, el alto nivel de endemismo y las fuertes presiones antrópicas a las que están siendo sometidas (WWF, 2001).

Partiendo de esto cabe recalcar que el estado ecuatoriano es el pionero en reconocer los derechos de la naturaleza a través de la Constitución de la República que en su artículo 397 garantiza el derecho individual y colectivo a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, se compromete, entre otras actuaciones, a asegurar la intangibilidad de las áreas naturales protegidas, a efectos de que se garantice la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de las funciones ecológicas de los ecosistemas, reservándose para sí el manejo y la administración de dichas áreas (Asamblea Nacional, 2008).

Asimismo, cuenta con el Plan de Desarrollo (Plan toda una vida) que en su Eje 1, objetivo 3 se enfoca en garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones (SENPLADES, 2017). En la declaración de Durban, instauró una visión de la contribución de los bosques al logro de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, haciendo hincapié en el siguiente aspecto: Los bosques gestionados de forma sostenible incrementan la resiliencia de los ecosistemas y de las sociedades y permiten aprovechar de manera óptima la función de los bosques y los árboles como sumideros y almacenes de carbono al mismo tiempo que proporcionan otros servicios ambientales (Jacanamejoy, 2012).

A pesar de que existe información espacial accesible, el tema de la estimación de biomasa mediante la teledetección, especialmente por la aplicación de imágenes UAV, sigue siendo un tema poco conocido en el Ecuador; es por eso que se desarrolla la presente investigación, que estará enfocada en estimar la biomasa, almacenamiento de carbono y CO₂ de la especie *Polylepis reticulata*, mediante la aplicación de métodos indirectos en el Bosque de Polylepis de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo. Esto permitirá determinar la importancia de conservar este sitio y priorizar la implementación de actividades ecoturísticas como una alternativa para el uso sostenible de este bosque, que sirve como sumidero de CO₂ y aporta a la mitigación del cambio climático. Además de dar a conocer la relevancia que tiene el uso de estos métodos, sobre todo en Áreas Protegidas donde existen restricciones para la aplicación del método destructivo.

III. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Estimar el carbono almacenado en la especie *Polylepis reticulata*, mediante el uso de imágenes multiespectrales, en el Bosque de Polylepis de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Aplicar ecuaciones de biomasa con datos obtenidos en campo.
2. Calcular la biomasa del bosque con imágenes multiespectrales.
3. Analizar la mejor correlación estadística entre el cálculo de la biomasa con ecuaciones y con imágenes multiespectrales.

IV. HIPÓTESIS

A. ALTERNANTE

El almacenamiento de CO₂ calculado mediante métodos directos e indirectos presenta correlación significativa.

B. NULA

El almacenamiento de CO₂ calculado mediante métodos directos e indirectos no presenta correlación significativa.

V. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A. PÁRAMO

El páramo que es un ecosistema alpino natural Buytaert *et al.* (2011), en Ecuador comúnmente se ubica entre el límite superior del bosque aproximadamente, a 3.500 msnm y las nieves perpetuas; pero las condiciones geológicas, climáticas y antropogénicas hacen que esta delimitación varíe mucho y que se encuentren algunos especialmente en el sur de Ecuador, desde los 2.800 msnm (Mena & Hofstede, 2006).

Los páramos cumplen un rol importante en la conservación de la biodiversidad debido a su alto endemismo, y prestan importantes servicios ambientales como almacenamiento de carbono especialmente en el compartimiento suelo de origen volcánico y la regulación hídrica producto principalmente de factores climáticos, edáficos y bajo consumo de agua por la vegetación permitiendo abastecer de agua a poblaciones que habitan en los valles interandinos (Crespo, 2011); (Tobón, 2009).

Su clima se caracteriza por presentar humedad continua en forma de lluvia y neblina (Tobón, 2009) y generalmente el suelo presenta una capa orgánica relativamente profunda y un alto nivel de retención aún en periodos de baja precipitación (Buytaert *et al.*, 2006); (Lambí *et al.*, 2012).

La vegetación en los páramos de acuerdo con su fisonomía y estructura se clasifica en grandes unidades por encima de la línea de árboles: subpáramo arbustivo, páramo herbáceo o de pajonal, y superpáramo (Cuatrecasas, 1979); (Jorgensen & Ulloa 1994); a esto se suma la presencia de parches de bosques de *Polylepis*, *Gynoxys* y *Buddleja* (Cuestas *et al.*, 2014); Buytaert *et al.*, 2006). Los cambios en la diversidad de comunidades vegetales ocurren en áreas reducidas dentro de estos grandes grupos y depende principalmente de cambios en los gradientes ambientales locales, el grado de exposición al viento, y la intervención humana (Cleef, 1981); (Cuestas *et al.*, 2014).

B. POLYLEPIS RETICULATA

El nombre *Polylepis* deriva de dos palabras griegas, *poly* (muchas) y *letis* (láminas), refiriéndose a la corteza compuesta por múltiples láminas que se desprenden en delgadas capas. Este tipo de corteza es común en todas las especies del género. La corteza es gruesa y cubre densamente el tronco, que lo protege contra bajas temperaturas e incendios. *Polylepis* es un género botánico que incluye pequeños árboles y arbustos, comúnmente llamados Yagual (FCYT *et al.*, 2000).

La especie *Polylepis reticulata* se encuentran desde Colombia hasta Perú. En el Ecuador se distribuye en las provincias de: Azuay, Cañar, Carchi, Chimborazo, Cotopaxi,

Imbabura, Loja, Pichincha, Tungurahua. Esta especie forma bosquetes o pequeños remanentes en el ecosistema páramo con rango altitudinales que varían entre 2750-4300 msnm (Romoleroux, 1992). Según Romoleroux & Pitman (2004), cuatro de las 13 subpoblaciones que se conocen de esta especie se encuentran dentro de la Red de Áreas Protegidas de Ecuador: en la Reserva Ecológica Los Ilinizas, Parque Nacional Cajas, Parque Nacional Llanganates y en la Reserva de Producción Faunística de Chimborazo (Mancheno, 2011). Esta especie es endémica del Ecuador según el Libro Rojo se encuentra en categoría vulnerable VU (Cardoso, 2014).

Son arbusto y/o árboles que miden aproximadamente hasta 15 m, los troncos son retorcidos y tienen la corteza de color café-anaranjado, que se desprende en láminas delgadas como papel. Las hojas y las flores a menudo están cubiertas de pelos. Las hojas son alternas y crecen amontonadas en las puntas de las ramas, están conformadas por 3 hojuelas que miden hasta 2,5 cm de largo, tienen denso vello en la cara inferior, la cara superior lisa, las hojas crecen en las puntas de las ramas. Las inflorescencias son racimos colgantes poco llamativos, de hasta 8 cm de largo. Las flores miden alrededor de 5 mm y son de color verdoso (Romoleroux *et al.*, 2008), con semillas de 2.5 a 4.5 mm de largo (Romoleroux, 1996), habitualmente esta especie se la utiliza para hacer cercas vivas, barreras naturales contra heladas para animales y viviendas, por la dureza y resistencia de la madera se usa como leña y para la elaboración de carbón, sus raíces tienen gran capacidad de penetración y expansión por esto es utilizada para la protección de cuencas hidrográficas, esta especie no daña cultivos cercanos por lo que es apta para implementar sistemas agroforestales (Cardoso, 2014); (Mancheno, 2011).

C. CARBONO ORGÁNICO Y BIOMASA

1. Ciclo global del carbono

Los ecosistemas forestales son un reservorio considerable de carbono y contienen más del 80% del carbono global de la superficie, sin embargo, cuando los bosques están maduros no ocurre asimilación neta de carbono, debido a que se encuentran saturados (González, 2008).

El ciclo del carbono es considerado como un conjunto de cuatro depósitos interconectados: la atmósfera, la biosfera terrestre incluyendo los sistemas de aguas frescas, los océanos y los sedimentos, estos depósitos son fuentes que pueden liberar el carbono, o sumideros que son los que absorben carbono de otra parte del ciclo; los mecanismos principales del intercambio del carbono son la fotosíntesis, la respiración y la oxidación (Álvarez, 2008).

En general, las plantas absorben el CO₂ de la atmósfera a través de la fotosíntesis y este compone las materias primas como la glucosa, que participa en procesos fenológicos para la formación de componentes del árbol. Estos a su vez proporcionan elementos necesarios para su desarrollo y el crecimiento en altura, diámetro, área basal y diámetro de copa principalmente. El carbono se deposita en follaje, tallos, y sistemas radiculares y,

principalmente, en el tejido leñoso de los troncos y ramas principales de los árboles, estos componentes aportan materia orgánica al suelo y al degradarse dan origen al humus, que a su vez contiene CO₂, por esta razón los bosques son considerados importantes reguladores en el nivel de carbono atmosférico (González, 2008).

Los árboles actúan como sumideros de carbono y liberan oxígeno O₂, reteniendo el carbono en la biomasa, principalmente en la madera que contiene un 48% de lignina y celulosa; para almacenar una tonelada de carbono es necesario producir 2.2 toneladas de madera, al quemarse la madera el proceso se revierte, usando el O₂ del aire y el carbono almacenado en la madera para liberar al final CO₂ (Sin Fuentes, 2015), el mismo autor indica que los bosques pueden ser sumideros pero también fuentes de carbono, esto dependerá de cómo y con qué propósito sean manejados y cómo sean utilizados sus productos.

2. El impacto de los bosques en el ciclo del carbono

Un beneficio inherente en la conservación de los bosques es el almacenamiento de grandes cantidades de carbono, que de estar libres en la atmósfera se sumarían a los GEI. Por ende, se debe permitir que los bosques prosperen y hagan su trabajo en la captación de carbono para reducir la amenaza del cambio climático. El ciclo del carbono comienza con la fijación del CO₂ por medio de la fotosíntesis realizada por las plantas, el carbono se almacena tanto en forma de biomasa (troncos, ramas, hojas, raíces, etc.), como en forma de carbono orgánico en el suelo (Winjum *et al.*, 1993). Con el tiempo los bosques acumulan carbono a través del crecimiento de los árboles, por lo tanto, los bosques inmaduros secuestran carbono a tasas elevadas, mientras que el secuestro en bosques maduros es eventualmente igual, es decir, el balance de carbono del ecosistema alcanza un estado estacionario (Streck & Scholz, 2006), por lo que el bosque es sólo un depósito de carbono, pero ya no actúa como un sumidero de carbono (UNFCCC, 2006). Lo anterior significa que los bosques actúan como reservorios para el carbono de la atmósfera; de esta manera las fuentes de GEI depende de varios factores como la edad del bosque, del régimen de manejo, de las alteraciones bióticas y abióticas (por ejemplo, plagas de insectos, incendios forestales, etc.) y de la deforestación inducida por el ser humano. Además del papel fundamental que los bosques desempeñan en el ciclo del carbono, también proporcionan muchos bienes y servicios que la sociedad valora altamente. Esto incluye la madera y los productos no madereros como combustibles y fibras, así como alimentos y medicinas, la biodiversidad, la conservación del suelo y del agua y los recursos recreativos.

3. Biomasa

De acuerdo a la Real Academia Española (RAE) se define, biomasa como la materia total de los seres vivos que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o volumen. Siendo esta una representación ecológica al determinar el índice individual de la actividad de los organismos vivos, dentro de un ecosistema. Otra acepción de la RAE respecto a la biomasa hace referencia a la materia orgánica originada en un

proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Es una noción más reciente y más restringida donde la biomasa es la materia orgánica que puede ser convertida en combustible y es por lo tanto considerada como una fuente potencial de energía. Esta definición ha ido en aumento, y así la biomasa es definida en función de su procedencia, como la fracción biodegradable de los productos, subproductos y residuos procedentes de la agricultura (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal). (García & Martínez, 2014); (Rodríguez Vásquez de Aldana, García Criado, García Ciudad, & Zabalgoeazcoa, 2012).

Atendiendo a la procedencia la biomasa se puede clasificar en:

- Biomasa Natural: Es el resultado directo de la actividad fotosintética de los vegetales;
- Biomasa Forestal: Es la que procede del cultivo de madera, mediante prácticas silvícolas, de los restos de madera y de la limpieza de montes y/o bosques;
- Biomasa Residual: La biomasa natural no es utilizable en su totalidad lo que conlleva la generación de residuos sobrantes de la misma, es decir aquella que procede de residuos ganaderos, residuos agrícolas (v.g. restos de cereal, algodón, etc.), restos arbustivos y leñosos (de podas, cambio de variedad / especie) y residuos industriales (v.g. madera de rechazo, lignina residual, etc.) (ENCE, 2009); (Neches, 2011).

La biomasa tiene una gran importancia en lo que a la historia de las fuentes de energía se refiere, ya que existen pruebas de que fue la primera energía en ser utilizada por el ser humano. Siendo pionera de muchas actividades del ser humano, ya que quemaba la biomasa para cocinar, para calentarse y actividades muy variadas.

La importancia de la Biomasa a nivel mundial, generalmente ha sido por su interés energético, y las ventajas que esta tiene como energía renovable, a partir de la fijación de la energía solar en la fotosíntesis, comprendiendo toda la materia orgánica, ya sea de origen vegetal o animal, incluyendo materiales procedentes de su transformación sea natural o artificial, sin embargo la relación entre la biomasa con la fijación del CO₂ y su influencia positiva en el cambio climático global no era considerada como un tema de interés mundial.

El interés mundial por el cambio climático llevo a que más de 130 países celebren el protocolo de Kioto sobre el cambio climático adoptado el 11 de diciembre de 1997, dentro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC), y que entró en vigor el 16 de febrero de 2005, el mismo que dictamina como objetivo la reducción de las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global: dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), además de tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆), en un porcentaje aproximado de al menos un 5 %, dentro del periodo que va de 2008 a 2012, en comparación a las

emisiones a 1990, Por estos motivos, se propuso la incorporación de la fijación del CO₂ como un objetivo dentro de los criterios de gestión de bosques.

Los cambios en la cobertura, en el uso y manejo de los bosques, producen fuentes y sumideros de dióxido de carbono hacia y desde la biosfera. Para estimar la magnitud de estas fuentes y sumideros se requiere estimaciones fiables de densidad de biomasa en los bosques que se encuentran sometidos a un proceso de cambio (Brown, 1997).

4. Biomasa y fijación de carbono para los bosques en Ecuador

La República del Ecuador se expande sobre un área total de 255.234 Km², de la que cerca del 50% está cubierta por bosques (Sierra, 1999), principalmente bosques siempre verdes de la Amazonía, los pies de monte andinos y los Andes. Más de 6,8 millones de hectáreas de bosque pertenecen a pueblos ancestrales, comunidades indígenas y comunidades afro ecuatorianas. La mayoría de estas tierras se sitúan en la región amazónica del país y en la provincia de Esmeraldas.

De acuerdo a datos de la FAO (2009), Ecuador está entre los países con mayores tasas de deforestación en Latinoamérica, siendo del 1,7% entre los años 2000 y 2005 a diferencia del 1.5% entre los años 1999 y 2000 (Bertzky *et al.*, 2011), a pesar de ser un país rico en biodiversidad, en grandes extensiones de cobertura vegetal, y tener recursos de interés ambiental, las políticas ambientales, así como los organismos de control y regulación de prácticas ambientales no siempre han sido de las más acertadas, no obstante en la actualidad existe una gran tendencia de cambiar esa imagen a través de una voluntad política fuerte, es así como el Ministerio del Ambiente ha desarrollado un nuevo modelo de Gobernanza forestal, donde unos de sus objetivos es la reducción de la deforestación y así dar cumplimiento a una de las metas del Plan Nacional de Desarrollo 2009 - 2013 de la Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES, 2009). Dentro de los objetivos en 2008 se generó el primer mapa de carbono forestal, fusionando coberturas extraídas de la clasificación desarrollada por Sierra (1999), con cuatro clases generales de cobertura para las que existen estimaciones medias del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) del carbono en la biomasa aérea. Posteriormente se actualiza el mapa (2011), basándose en una estratificación actualizada de la vegetación, y en estimaciones de biomasa aérea compiladas a partir de fuentes nacionales, incluyendo el carbono subterráneo y carbono aéreo (Bertzky *et al.*, 2011).

5. Estimación de la Biomasa

Para estimar la biomasa existen diversos métodos, por ejemplo, el método del árbol medio, el de corta, el del análisis dimensional y alométrico o el método múltiple de muestreo (Parde, 1980), no obstante la medición de la cantidad de biomasa aérea en cualquier componente de un ecosistema requiere un análisis destructivo directo, que incluye unos ciertos pasos como: cosechar el árbol, cortar el árbol (incluidas las hojas, ramas y tallo) en pedazos pequeños más manejables, secar estos pedazos en un horno y por último ser pesados, es el método más preciso, sin embargo consume mucho tiempo,

es caro y sobre todo destructivo, como consecuencia de esto, las estimaciones de biomasa a nivel regional, nacional o mundial no deberían basarse en pocas parcelas de medición directa porque las muestras a esta escala no son representativas (Brown *et al.*, 1989), debido a esto, no es un método práctico para obtener estimaciones de biomasa en extensiones completas de bosque, por lo que se realizan estimaciones indirectas del material vegetal para hacer las inferencias respectivas (Acosta *et al.*, 2002), de acuerdo a esto el caso más práctico es realizar estimaciones indirectas, para ello, se debe contar con funciones matemáticas basadas en las relaciones alométricas que ocurren entre los órganos de un individuo (Huxley, Strauss, & Churchill, 1932), a fin de estimar la biomasa total con base en el tamaño y dimensiones de los árboles de un determinado bosque (Acosta *et al.*, 2002). En estas situaciones Brown propone utilizar la información de inventarios forestales, logrando la suficiente cobertura de superficie para representar la población de interés. A partir de datos de inventarios forestales, se tienen dos diferentes métodos de cálculo de estimación de biomasa: el primero basado en ecuaciones matemáticas y el segundo en factores de expansión (Terán, Dauber, & Guzmán, 1992).

6. Modelos alométricos de volumen y biomasa

Para la estimación de la biomasa existe un método indirecto que consiste en generar ecuaciones y modelos calculados a partir de datos generados en inventarios forestales o variables colectadas en terreno mediante las cuales es posible estimar la biomasa a partir del volumen del árbol, en función de su densidad y un factor de expansión para determinar el peso seco total (Brown & Lugo, 1984), teniendo en cuenta que para la obtención de la respuesta a estas variables de interés, se necesita la medición de variables dasométricas básicas de árboles en pie (variables independientes), tal como el diámetro del tronco a la altura del pecho (DAP), la altura total, altura comercial y el diámetro de copa (Loetsch *et al.*, 1973), donde los modelos de regresión se utilizan para convertir los datos de inventario en una estimación de la biomasa aérea (Chave *et al.*, 2005).

Hay que resaltar que los métodos alométricos permiten predecir la producción de biomasa en forma no destructiva (Ares *et al.*, 2002). Pero el uso de modelos alométricos para la estimación de la biomasa desarrollados en regiones diferentes a la andina presenta limitaciones dadas las distintas condiciones que rigen el crecimiento de los árboles (Álvarez, 2008).

En cuanto a la elección de los modelos para estimar la biomasa aérea total existen unos recomendados basados en Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) dado que esta variable es de fácil medición en el campo y tiene mayor precisión (Segura & Kanninen, 2005) por lo que la elección del modelo para estimar la biomasa es crucial, para evitar errores en la estimación, aunque varios autores sugieren utilizar ecuaciones generadas localmente, sin embargo cuando no se dispone de estas, se pueden emplear ecuaciones ya existentes, generadas en condiciones climáticas y edáficas similares a la de la zona de estudio, especialmente cuando se han validado con datos de cosecha (Chave *et al.*, 2005).

Continuando con las teorías que hablan sobre la importancia de los modelos para medir la biomasa, hay que resaltar que los modelos que mejor se ajustan al comportamiento de la biomasa en función del DAP, son de la forma $Y = a X^b$, con transformación logarítmica, donde X corresponderá al DAP y a y b son los parámetros de crecimiento (Schlegel, 2001); (Acosta *et al.*, 2002). Sin embargo, estos modelos presumen un error de estimación ocasionados por heterocedasticidad (Orrego & del Valle, 2001), que radica en una distribución irregular de la varianza de las estimaciones respecto al modelo, y aunque los coeficientes de regresión no se sesgan, se pierde eficiencia, aun así la heterocedasticidad se puede corregir a través de una transformación logarítmica, que linealiza el modelo, no obstante al estimar los valores de biomasa, se comete desde el modelo logarítmico un error sistemático, para esta situación se reportan varios métodos de corrección (Ordoñez, 1996); (Zapata *et al.*, 2001), donde el más eficiente es el de aplicar un medio del cuadrado medio del error del modelo logarítmico como factor de corrección.

7. Ecuaciones alométricas.

Un método indirecto para la estimación de biomasa consiste en generar ecuaciones y modelos calculados a partir de los datos generados en inventarios forestales o variables colectadas en terreno mediante las cuales es posible estimar la biomasa a partir del volumen del árbol, en función de su densidad y un factor de expansión para determinar el peso seco total (Brown & Lugo, 1984), donde los modelos de regresión se utilizan para convertir los datos de inventario en una estimación de la biomasa aérea (Chave *et al.*, 2005). Los métodos alométricos permiten predecir la producción de 18 biomasa en forma no destructiva (Ares *et al.*, 2002). Pero el uso de modelos alométricos para la estimación de la biomasa desarrollados en regiones diferentes a la andina presenta limitaciones dadas las distintas condiciones que rigen el crecimiento de los árboles (Álvarez, 2008).

La utilización de ecuaciones alométricas se encuentra principalmente representada en la estimación del contenido de carbono para plantaciones (Coníferas principalmente), géneros como *Pinus spp.*, *Eucalyptus sp.*, y en especies como *Hevea brasiliensis*, *Bactris gasipaes*, *Schizolobium parahybum*, *Centrolobium tomentosum*, (Vidal *et al.*, 2001); (Ares *et al.*, 2002). En bosques naturales los principales estudios se enfocan en la amazonia (Houghton *et al.*, 2001). De las ecuaciones reportadas por la literatura (Pearson *et al.*, 2005), no se registra a la fecha ninguna que se aplique a ecosistemas andinos, si no a ciertas especies, o ecosistemas diferentes, sin embargo, para Colombia Navarrete *et al.* 2010 reporta ecuaciones alométricas para bosques húmedos montanos y montanos bajos. Es evidente que la implementación de las relaciones entre biomasa y las variables que implica usar ecuaciones alométricas ha sido especialmente escasa en estos ecosistemas. Los modelos recomendados para estimar biomasa aérea total están basados en Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) dado que esta variable es de fácil medición en el campo y tiene mayor precisión (Segura & Kanninen, 2005).

Los modelos que mejor se ajustan al comportamiento de la biomasa en función del DAP, son de la forma $Y = a X^b$, con transformación logarítmica, donde X corresponderá al

DAP y a y b a los parámetros de crecimiento. (Caritat *et al.*, 1992); (Schlegel *et al.*, 2001). Sin embargo estos modelos suponen un error de estimación generados por heterocedasticidad (Orrego & Del Valle, 2001), que consiste en una distribución irregular de la varianza de las estimaciones respecto al modelo, y aunque los coeficientes de regresión no se sesgan, se pierde eficiencia, aun así la heterocedasticidad se puede corregir mediante una transformación logarítmica, que linealiza el modelo, no obstante al estimar los valores de biomasa, se comete desde el modelo logarítmico un error sistemático, para esta situación se reportan varios métodos de corrección (Ordoñez, 1996); (Zapata *et al.*, 2001), donde el más eficiente es el de aplicar un medio del cuadrado medio del error del modelo logarítmico como factor de corrección. Además, que permite rescribir el modelo, adicionando el nuevo factor al valor independiente (Zapata *et al.*, 2001); (Orrego & del Valle, 2001).

8. Métodos para Cuantificar el Carbono

Los flujos de CO₂ entre la atmósfera y los ecosistemas se controlan fundamentalmente por captación, mediante la fotosíntesis de las plantas, y por liberación, a través de la respiración, la descomposición y la combustión de materia orgánica (IPCC, 2006).

Debido a la importancia de los bosques y plantaciones forestales como mecanismos de captura y almacenamiento de carbono, se hace necesario la búsqueda de diferentes métodos para estimar la biomasa, que es un parámetro que caracteriza la capacidad de los ecosistemas para acumular materia orgánica, a lo largo del tiempo, tanto en su parte aérea como subterránea que incluye el compartimento suelo (Torres, 2011); (Schlegel *et al.*, 2001).

Existen dos razones fundamentales para llevar a cabo un monitoreo de carbono:

- a. Es un requisito lógico de los proyectos de mitigación; y
- b. como mecanismo para medir el impacto de los proyectos, que probablemente implique beneficios económicos en un futuro cercano.

a. Método Directo

Denominado también método destructivo, que consiste en relacionar mediante una ecuación de regresión y/o funciones matemáticas la biomasa (peso total seco) y variables de fácil medición como el diámetro, altura total, entre otras que se registran mediante inventarios forestales (Calderón & Lozada 2010); (Torres, 2011).

Este método directo tiene como desventajas el alto costo de su aplicación, dificultad en la extracción del componente subterráneo y la destrucción de una cantidad significativa de ejemplares para obtener mejores resultados (Álvarez, 2008). Sin embargo, es el más preciso para la estimación de la biomasa aérea (Calderón & Lozada 2010). El método directo es utilizado convencionalmente para proyectos locales, pero implica altas inversiones de tiempo, recursos y mano de obra (Gibbs *et al.*, 2007) por lo que no es recomendado para niveles regionales o escalas nacionales (Snowdon *et al.*, 2002), debido a la extracción de una cantidad significativa de ejemplares para obtener mejores resultados (Álvarez, 2008).

b. Método Indirecto

El método indirecto consiste en utilizar ecuaciones o factores de expansión que permitan relacionar algunas dimensiones básicas obtenidas en campo (diámetro, altura, diámetro de copa) y en inventarios forestales con características de interés como el volumen y/o densidad de la madera, de forma que no sea necesario medir estas últimas para obtener la biomasa total del árbol. Estas ecuaciones son generadas por medio de una técnica estadística llamada análisis de regresión y se lo utiliza cuando los árboles tienen dimensiones muy grandes que es lo usual en bosques naturales (Schlegel, 2001); (Torres, 2011).

c. Estimaciones por Sensores Remotos

En la actualidad, la información proporcionada por los sensores remotos ha venido ganando importancia tanto por la necesidad de obtener información sobre la heterogeneidad estructural a nivel global del bosque o plantación, cuanto por la posibilidad de conseguir esquemas espaciales de variables ambientales que faciliten un control sobre los procesos ecológicos que en ellos se llevan a cabo (Calderón & Lozada 2010). Los sensores remotos pueden proveer de datos que permitan responder a las interrogantes e incertidumbres respecto al ciclo dinámico de la biomasa, ya que posibilitan la evaluación frecuente de cambios de cobertura boscosa en grandes extensiones (Brown & Lugo, 1992). Las técnicas más comúnmente usadas con estos fines han sido la interpretación visual de imágenes y la clasificación digital (Lillesand & Kiefer, 2000).

En estos últimos años se ha implementado monitoreo de biomasa con vehículo aéreo no tripulado (UAV), comúnmente conocido como “dron”; que consiste en generar modelo de superficie digital tridimensional en base a un número suficiente de fotografías aéreas, corregidas por algoritmos. Cabe señalar que a pesar que es muy útil en zonas de difícil acceso y que permite caracterizar extensas áreas, esta técnica, necesita de información adicional recolectada en campo para corregir los modelos de objetos (bosque, plantación, etc.) y de ecuaciones alométricas calculadas con niveles de confianza potentes para poder tener resultados confiables (Torres & Cadena, 2016).

D. VEHÍCULOS AEREOS NO TRIPULADOS (UAV)

Los vehículos aéreos no tripulados, o sistemas UAV, también llamados UVS (sistema de vehículo no tripulado) o UAS (sistema de aeronave no tripulada), son aeronaves que vuelan autónomamente a través de un sistema de piloto automático que es monitoreado desde un centro de control en tierra (Everaerts, 2008).

El uso de estas plataformas aéreas tuvo inicio en el campo militar en los años cincuenta con tareas de reconocimiento, vigilancia, mapeo y misiones en territorios hostiles. Sin embargo, los primeros usos en aplicaciones geomáticas tuvo lugar a comienzos de los años ochenta, y solo recientemente los sistemas UAV han llegado a ser de uso común en

estas aplicaciones al punto de llegar a ser actualmente una alternativa a las plataformas aéreas tripuladas para la adquisición de imágenes (Nex & Remondino, 2013). Colomina & Molina (2014) presentan tabulada la cantidad de plataformas UAV referenciadas en el periodo 2005-2013 a nivel mundial, notándose el mayor aumento en los temas de producción y desarrollo de plataformas (207 en 2005 a 540 en 2013) y el uso en aplicaciones de uso civil y comercial (55 en 2005 a 247 en 2013). En el desarrollo de plataformas UAV, una gran cantidad de investigaciones han realizado la captura de datos partir de prototipos UAV no comerciales como el “Pelican” (Marenchino, 2009), el Quanta-H y G (Berni *et al.*, 2009) o el “NEO S-300” (Kohoutek & Eisenbeiss, 2012). Mientras que en el uso comercial compañías privadas con plataformas más sofisticadas, mencionadas más adelante, ofrecen productos fotogramétricos (modelos digitales de superficie y ortomosaicos) generados a partir de la información recolectada con estos sistemas (Nex & Remondino, 2013).

1. Clasificación de plataformas UAV

Actualmente debido a la gran cantidad de plataformas aéreas consideradas UAV, se presentan diferentes maneras para clasificarlas. Estas pueden ser: por tamaño, por capacidad de carga, por altura de vuelo, por autonomía de vuelo o por tipo de misión, entre otras. En el contexto de la adquisición de datos fotogramétricos una clasificación representativa es la de por tipo de plataforma, ya que esta define la forma de vuelo, y por tanto, las áreas más apropiadas de aplicación. De acuerdo con el tipo de plataforma UAV se presentan dos tipos (figura 1): de ala fija o tipo avión (Marenchino, 2009); (Vallet, Panissod, Strecha & Tracol, 2012), y multirrotor, de ala rotatoria o tipo helicóptero (Yahyanejad, Quaritsch & Rinner, 2011). Watts, Ambrosia & Hinkley (2012) presentan una revisión amplia de los diferentes modelos de plataformas UAV y el nivel de complejidad de estas, de acuerdo con las áreas de aplicación. Las ventajas que ofrece cada una de las plataformas dependen del caso de uso. Nizam, Tahar & Ahmad (2013) compararon el uso de una plataforma UAV de ala fija y una multirrotor en la generación de un modelo digital de pendientes. En esa investigación se determinó que las mayores diferencias son el menor costo de la plataforma multirrotor, y la leve mejora en la precisión de los resultados de esta plataforma, que en la investigación puede estar asociado a la diferencia de altura en la toma de datos (80 m y 320 m para el UAV multirrotor y el de ala fija, respectivamente). En tanto que la plataforma de ala fija presentó un menor consumo de tiempo en las etapas de captura y procesamiento de las imágenes, por lo que para el uso mencionado se puede establecer que las dos plataformas son igualmente apropiadas. Sin embargo, el modo de vuelo de estas dos plataformas determina que, para espacios reducidos, registro fotográfico a baja altura o modelamiento 3D de objetos, las plataformas multirrotor son las apropiadas, mientras que el registro de grandes extensiones y vuelos a mediana y gran altura, las plataformas de ala fija presentan mayores ventajas. Con respecto a cómo se compone un sistema UAV estándar empleado en actividades fotogramétricas, se pueden definir dos elementos principales: una plataforma aérea y un centro de control en tierra, enlazados a través de una señal de radiocomunicación. La plataforma aérea está equipada generalmente con un sistema de

navegación o piloto automático que permite la navegación autónoma, siguiendo una ruta de vuelo predefinida por el usuario desde la estación de control en tierra. Esta navegación autónoma es posible por medio de la integración de un sistema inercial y un sistema GPS en la plataforma aérea, que permiten conocer la postura y posición de esta durante el vuelo. Esta información es enviada en tiempo real a la estación de control desde donde se realiza el seguimiento de la plataforma. En el caso de la ausencia de un sistema de navegación, el uso de un control remoto es la única manera de dirigir la plataforma aérea, aunque el control remoto también puede servir como complemento del sistema de navegación en momentos como el despegue y descenso del UAV. En el caso de plataformas UAV más sofisticadas, actualmente se encuentran sistemas que permiten la vinculación con receptores GNSS como el eBee RTK (Sensefly, 2014), el Gatewing UX5 (Trimble, 2014), en los que la plataforma se conecta a una estación base en tierra y desde esta se transmiten datos de corrección de posición a la plataforma, permitiendo que las imágenes capturadas tengan asociada una posición de alta precisión; la inclusión de cámaras multiespectrales como en el eBee Ag (Sensefly, 2014) y el MD4-1000 (Microdrones, 2014) en donde bandas espectrales como el infrarrojo y el infrarrojo cercano son empleadas para agricultura; la transmisión de video en tiempo real como el Aibot X6 (Aibotix, 2014); o la implementación de cámaras giroestabilizadas y de tipo Gimbal como el Zephyr2 UAV (Marcus, 2014).

2. Planeación de vuelo

En un vuelo en modo autónomo, la planeación inicia con la definición de una región de interés, generalmente dibujada sobre un mapa base georreferenciado (por ejemplo, Google Earth). Para el caso de un vuelo en modo manual (maniobrado con control remoto), la definición de la región dependerá de la dirección dada a la plataforma aérea con el control remoto por parte del operador de vuelo. Una vez se define la región de interés, es necesario ingresar los parámetros de vuelo y, a partir de esta información, el software calcula automáticamente las líneas de vuelo. Los parámetros de vuelo requeridos son: la altura de vuelo o alternativamente el GSD (ground sample distance) y los porcentajes de traslape entre imágenes (longitudinal y transversalmente). Para el caso de sistemas UAV los porcentajes de traslape considerados apropiados varían entre 60-80 % o más, según el nivel de detalle requerido. En el caso de la altura de vuelo que está relacionada con el GSD (medido en cm/pixel), alturas grandes generan GSD grandes (menor resolución), mientras que alturas de vuelo bajas generan GSD pequeños (mayor resolución). En la generación de modelos 3D detallados por lo general se requiere de alturas de vuelo bajas y de altos porcentajes de traslape (Nex & Remondino, 2013). En el caso de vuelos en modo manual, sin sistema de navegación, los valores de altura y porcentajes de traslape quedan a consideración del operador de vuelo a través del control remoto, o a través de la configuración de la cámara para tomar fotos en intervalos de tiempo fijos (Neitzel & Klonowski, 2011).

3. Adquisición de imágenes

Luego de la etapa de planeación, el siguiente paso es la ejecución del vuelo para la adquisición de las imágenes, esto inicia con el lanzamiento de la plataforma aérea. Las plataformas tipo avión requieren de un lanzamiento manual o por medio de catapultas, mientras que en las plataformas tipo helicóptero o multirrotores el despegue se realiza automáticamente. Por medio del sistema de navegación la plataforma aérea busca autónomamente el inicio de la ruta de vuelo programada y da inicio a la captura de las imágenes de manera secuencial de acuerdo con los parámetros establecidos. Mientras tanto, en la estación de control en tierra se monitorea el estado del vuelo y de la plataforma a través de información como tiempo de vuelo, nivel de batería, temperatura e intensidad de la señal de comunicación. Igualmente es posible ajustar los parámetros de vuelo en tiempo real. Otra de las características que se presenta en la adquisición de imágenes con sistemas UAV es la vinculación de cada foto con los valores de posición y orientación, registrados con los sistemas GPS e inercial en el momento de la captura. Esta es información que puede ser utilizada en las etapas posteriores de procesamiento. Por otra parte, con respecto a las características de las imágenes capturadas. Turner, Lucieer & Watson (2012), hacen mención de las diferencias fundamentales que presentan las imágenes capturadas con sistemas UAV con respecto a las plataformas aéreas tripuladas: la altura de vuelo de los UAV es baja en relación con la variación de altura dentro de la escena registrada, lo que causa grandes distorsiones perspectivas, y por tanto influye negativamente en el ejercicio estereoscópico; la inestabilidad de la plataforma UAV que causa líneas de vuelo irregulares, y como efecto genera áreas de traslape variable entre imágenes, así como grandes variaciones angulares y rotacionales (ángulos en plataformas UAV de hasta 15° con la horizontal, mientras en fotogrametría tradicional el máximo permitido es 3°); y diferencias de escala y de iluminación entre imágenes adyacentes, que dificulta identificar elementos comunes entre ellas. Debido a estas diferencias, el procesamiento de imágenes UAV debe ser diferente. Por tanto, es necesario implementar estrategias de procesamiento alternativas a las empleadas en fotogrametría tradicional, que tengan en cuenta las características de las imágenes UAV. Algunas de estas estrategias serán presentadas a continuación.

4. Procesamiento de imágenes UAV

El uso de sistemas UAV para fotogrametría, o fotogrametría UAV, como lo define Eisenbeiss (2009), describe las plataformas de medición fotogramétrica que son operadas remotamente, de manera autónoma o semiautónoma sin un piloto, así como el procesamiento de las imágenes tomadas con estas plataformas. En la fotogrametría UAV se identifican dos productos cartográficos tradicionales: los modelos digitales de superficie y los ortomosaicos georreferenciados (Nex & Remondino, 2013); (Colomina & Molina, 2014).

a. Modelo Digital de Superficie (DSM)

Representa la información de altura de la superficie de la Tierra asociada a un sistema de referencia global, de todos los elementos registrados en la escena, es decir considerando las alturas de edificaciones, vegetación y demás objetos presentes en la superficie (Rumpler, Wendel & Bischof, 2013)

b. Modelos Digitales del Terreno (DTM)

Son aquellos en los que se han eliminado las elevaciones que no corresponden al terreno como también para la producción de ortoimágenes reales, el reconocimiento automático y extracción de edificios, el análisis de redes de comunicación, el modelamiento urbano, la simulación de desastres naturales, la planeación de vuelos, los estudios ambientales y las visualizaciones fotorrealistas en 3D, entre otras actividades (Lei, Fan, Ji & Zhai, 2008).

c. Ortomosaico

Un mosaico, corresponde al conjunto de imágenes tomadas desde una o varias cámaras, que presentan áreas de traslape entre sí, y que son unidas y combinadas en una sola imagen para ampliar el rango de visión de la escena (Cheng, Xue & Li, 2007). Cuando el mosaico es corregido de las distorsiones causadas por el relieve del terreno y los objetos en él, se denomina ortomosaico.

En el procesamiento de imágenes UAV para la generación de estos productos cartográficos, se combinan estrategias empleadas en fotogrametría tradicional y en visión por computador. Por tanto, se cuenta con una diversa cantidad de métodos. A pesar de que algunas investigaciones establecen que emplear software comercial no es apropiado (Arthur *et al.*, 2012), debido a que estos están basados en fotogrametría tradicional, y a que en la fotogrametría UAV no se presentan las condiciones estereoscópicas normales que esta requiere, Gini *et al.* (2013) concluyen que las imágenes tomadas con sistemas UAV son aptas para ser procesadas por diferentes softwares fotogramétricos, incluyendo aquellos que son considerados tradicionales.

E. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON

Según Vararey (2015), en estadística, el coeficiente de correlación de Pearson es una medida lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables.

De manera menos formal, podemos definir el coeficiente de correlación de Pearson como un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas y continuas.

Interpretación:

El valor del índice de correlación varía en el intervalo $[-1,1]$, indicando el signo el sentido de la relación:

- Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.
- Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva.
- Si $r = 0$, no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables.
- Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa.
- Si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

A. CARACTERIZACIÓN DEL LUGAR

1. Localización

El trabajo de titulación se realizó en el Bosque de Polylepis, que se encuentra al noreste de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo, a una altura de 4319 m.s.n.m., dicha reserva está localizada en los límites provinciales entre Chimborazo, Tungurahua y Bolívar.

2. Ubicación geográfica

El bosque Polylepis está localizado en las siguientes coordenadas UTM: ZONA 17S, DATUM WGS 84:

Altitud: 4329 m.s.n.m.

X = 735373

Y= 9829664



Figura VI- 1 Ubicación geográfica del Bosque Polylepis en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo
Fuente: Cartografía base del IGM – Ecociencia y MAE 2012.

3. Límites

Los límites de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo son:

Norte: Provincias de Bolívar y Tungurahua

Sur: Provincias de Bolívar y Chimborazo

Este: Provincias de Tungurahua y Chimborazo

Oeste: Provincia de Bolívar

4. Características climáticas

En la zona es frecuente en los días más fríos y húmedos que ocurra precipitación en forma de nieve o escarcha en las zonas más altas. Se registra una precipitación promedio anual de 761 mm que varía entre 626 mm en las zonas menos lluviosas y los 896 mm en las zonas más húmedas.

La temperatura en el interior de la RPFCH varía dependiendo de la altitud en la que se establezca. Se pueden encontrar temperaturas promedio extremas que varían entre un mínimo de $-0,11^{\circ}\text{C}$ en la cumbre del Chimborazo y un máximo de $8,81^{\circ}\text{C}$ en las estribaciones oriental y occidental de la reserva en los páramos. La temperatura mínima registrada en la RPFCH es de $-4,80^{\circ}\text{C}$ en el mes de diciembre y la máxima de $11,40^{\circ}\text{C}$ en el mes de noviembre.

El bosque Polylepis tiene un clima Frio andino con variación de templado permanente húmedo a templado periódicamente seco, con una temperatura de 0° a 10°C (MAE, 2006).

5. Clasificación ecológica

De acuerdo con (MAE, 2014), la RPFCH cuenta con 8 zonas de vida, las cuales se describen en la tabla VI- 1.

Tabla VI- 1 Zonas de vida RPFCH

ZONA DE VIDA	ALTURA	DESCRIPCIÓN
Herbazal del Páramo	3400 – 4300 msnm	Herbazal denso dominado por gramíneas amacolladas mayores a 50 cm de altura; este ecosistema abarca la mayor extensión de los ecosistemas de montaña en el Ecuador; se extiende a lo largo de los Andes desde el Carchi hasta Loja. Es característico del piso montano alto superior y se localiza generalmente en los valles glaciares,

		laderas de vertientes disectadas y llanuras subglaciares sobre los 3400 msnm.
Herbazal y Arbustal siempre verde subnival del Páramo	4100 – 4500 msnm	Son arbustales bajos y matorrales alto andinos paramunos. Herbazal mezclado con arbustos esclerófilos semipostrados con una altura entre 0,5 a 1,5, ocurre en morrenas, circos glaciares, escarpamentos rocosos, depósitos de rocas glaciares y pendientes pronunciadas de arena o quebradas estrechas. Este ecosistema se caracteriza por tener una vegetación fragmentada, los parches de vegetación que se localiza en las cumbres más altas de la cordillera formando un sistema insular restringido al norte del Ecuador.
Arbustal siempre verde y Herbazal del Páramo	3300 - 3900 msnm	Incluye al páramo de almohadillas, sector norte y centro de la cordillera oriental, subregión norte y centro. Pajonales arbustivos alti montano paramunos. Arbustales frecuentemente dispuestos en parches de hasta 3 m de altura, mezclados con pajonales amacollados de alrededor de 1,20 m. Consideran un ecosistema diferente localizado sobre la línea de bosque; sin embargo, otros autores consideraron a éste como franja del ecosistema de bosque montano alto.
Herbazal inundable del Páramo	3300 - 4500 msnm	Son herbazales inundables en los que existen especies que forman cojines o parches aislados de vegetación flotante; este ecosistema es azonal, en el que las condiciones edáficas o micro climáticas locales tienen una mayor influencia sobre la vegetación que los factores climáticos asociados al gradiente altitudinal.
Herbazal ultra húmedo subnivel del Páramo	4400 - 4900 msnm	Corresponde a vegetación dominada por arbustos postrados o almohadillas dispersas. Se encuentra en laderas abruptas y escarpadas cubiertas por depósitos glaciares y con suelos geliturbados. Los patrones de humedad local y valores de precipitación mensual están determinados por una alta humedad, causada por su orientación hacia las

		zonas de formación de precipitación de la Amazonía.
Bosque siempre verde del Páramo	3200 - 4100 msnm	Son bosques densos siempre verdes, con alturas entre 5 y 7 m, que por efectos de las condiciones climáticas crecen de forma torcida y ramificada, confiriéndoles un aspecto muy particular. Este tipo de ecosistema se encuentra en formas de parches aislados en una matriz de vegetación herbácea o arbustiva. Estos parches tienden a ocurrir en sitios menos expuestos al viento y la desecación como laderas abruptas, fondo de los valles glaciares o en la base de grandes bloques de rocas de los circos glaciares.
Herbazal húmedo subnival del Páramo	(3400 - 4300 msnm)	Generalmente se ubica en laderas periglaciares en suelos clasificados como entisoles poco profundos, con un desarrollo exiguo, caracterizados por un contenido de materia orgánica extremadamente bajo con capacidad de retención de agua y regulación muy pobre. Este ecosistema se encuentra presente en los Illinizas, Pichincha, Cotopaxi y las vertientes occidentales del Chimborazo y Antisana.
Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo	3500 - 4200 msnm	Son herbazales abiertos, que se encuentran dominados por especies de los géneros Stipa, Senecio y Plantago; se encuentra en enclaves volcánicos localizados en fondos de valles glaciares llamados Glacis con litología de tipo: lapilli de pómez, toba y cenizas asociados a efectos de sombra de 27 lluvia, como en el flanco occidental del volcán Chimborazo. En este ecosistema son pocas las especies que resisten a las extremas condiciones climáticas. Debido a la humedad relativamente baja de estos ecosistemas la concentración de carbono orgánico en el suelo es menor que en los páramos más húmedos

6. Características del suelo

Los suelos de la reserva son de origen volcánico, formados de rocas, sedimentos y tobas volcánicas pliocénicas y más antiguas. Al sur del volcán Chimborazo, la serranía de la Calera, su prolongación austral y el páramo de Puyal, están desprovistos de andesitas pliocénicas. El cerro negro Yanarumi de 4.156 m.s.n.m., vecino del Chimborazo, exhibe los característicos conglomerados del cretáceo superior y marca el extremo septentrional del páramo Puyal. En el fondo del valle del río Totorillas, entre el Chimborazo y el Yanarumi, aparecen pizarras y areniscas cretáceas (MAE, 2006).

7. Materiales y equipos

a. Materiales:

- CD's
- Resmas de papel
- Libreta de campo
- Esferográficos
- Lápiz

b. Equipos:

- Calculadora
- Cámara
- Impresora
- GPS
- Computadora

B. METODOLOGÍA

La presente es una investigación fundamentalmente aplicada, que se llevó a cabo usando técnicas de revisión bibliográfica y de campo a un nivel exploratorio, descriptivo, analítico y prospectivo.

A continuación, se detalla la metodología utilizada para el cumplimiento de los objetivos:

1. Objetivo 1: Aplicar ecuaciones de biomasa con datos obtenidos en campo.

Para la aplicación de ecuaciones existentes de biomasa se aplicó la siguiente metodología:

- a. Se realizó una revisión documental de bibliografía especializada en libros, artículos y ponencias científicas sobre ecuaciones alométricas para el cálculo de la biomasa.
- b. Se seleccionó la siguiente ecuación alométrica, ya que está ajustada en un estudio de caso similar para el cálculo de biomasa de la especie *Polylepis reticulata*. (Calderón & Lozada, 2010).

$$\text{Ln(Biomasa)} = -1,872642324 + 0,7680340465 * \text{Ln(DAP)} + 0,4046725486 * \text{Ln(ALTURA)} + 1,240463771 * \text{Ln(COPA)}$$

Donde:

Ln = logaritmo natural en base e

Biomasa = biomasa total del individuo en g.

DAP = diámetro a la altura del pecho en cm.

ALTURA = altura total del árbol en cm.

COPA = diámetro de copa en cm.

La ecuación lineal para la determinación de biomasa quedaría de la siguiente forma:

$$\text{Biomasa} = 0,1546 * \text{DAP}^{0,76803} * \text{ALTURA}^{0,40467} * \text{COPA}^{1,24046}$$

Donde:

Biomasa = biomasa total del individuo en g.

DAP = diámetro a la altura del pecho en cm.

ALTURA = altura total del árbol en cm.

COPA = diámetro de copa en cm.

- c. El diseño experimental para la recolección de datos de campo supuso la implementación de una metodología de inventario específica.

Para sistematizar el análisis del bosque, el área se dividió en 54 parcelas de aproximadamente 10 × 10 m cada una (Figura VI-2). Los individuos se registraron mediante un procedimiento de codificación que consta de un carácter de A a H y una serie numérica de 2 dígitos del 01 al 07 para identificar el transecto.

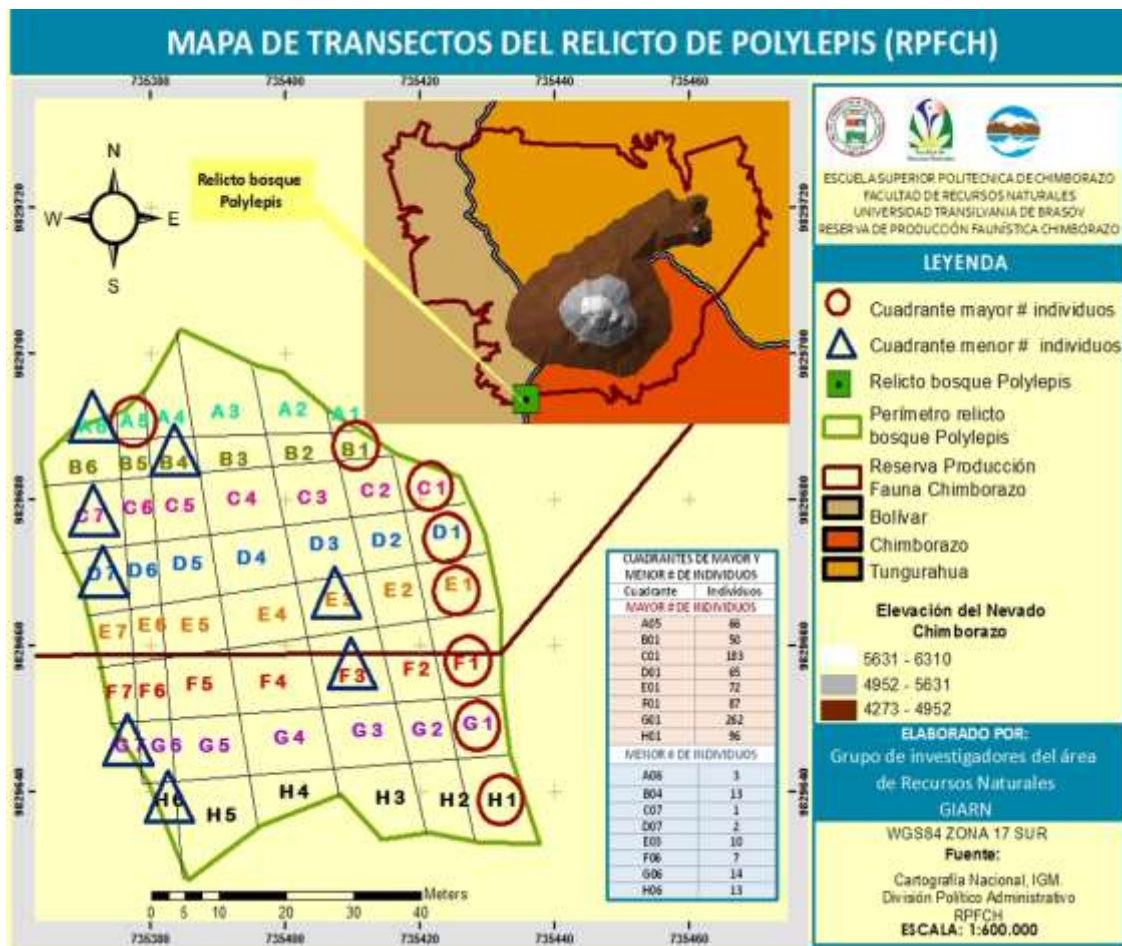


Figura VI- 2 Mapa transectos relicto Polylepsis
Nota: Elaborado por equipo de investigación

Todos los individuos de *Polylepis reticulata* se registraron utilizando 3 parámetros: altura (h), DAP (diámetro a la altura del pecho) y BA (área basal). Los valores de DAP consideraron a todos los individuos que presentaron una altura mayor de 1 m y se calcularon dividiendo el CAP (Circunferencia a la altura del pecho medida a 1.3 m) por la constante π ($\pi = 3.1416$); en el caso de árboles con tallos múltiples, la medida no fue registrada. Luego, el área basal de cada individuo se calculó utilizando la fórmula $BA = \pi(DAP^2/4)$, (Castillo et al. 2017). Posteriormente se determinó la media por parcela y la media del área total de estudio.

- d. Se procedió a levantar datos dasométricos no inventariados, para la aplicación de la ecuación, información que se adquirió en las mismas parcelas y códigos para cada individuo.

En el inventario forestal proporcionado por el proyecto “El Ecoturismo en los Andes Ecuatorianos y sus implicaciones para la conservación del Bosque de Polylepsis (*Polylepis reticulata*), en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo, Ecuador”, el diámetro de copa es el dato dasométrico faltante para poder aplicar la ecuación alométrica, por lo que se hizo un levantamiento en campo de la siguiente forma:

Según Philip (1998), el diámetro de copa se suele determinar mediante una medida en cruz en dos direcciones, la dirección Norte-Sur y la dirección Este-Oeste y tomando como referencia la proyección de los extremos de la misma sobre el suelo, midiéndose la distancia entre ambos extremos. Así se obtienen dos medidas (dc1 y dc2), siendo la medida final del diámetro de copa el promedio de las dos medidas tomadas (dc):

$$dc = \frac{dc1 + dc2}{2}$$

Posteriormente se determinó la media por parcela del área de estudio.

- e. Usando el software Microsoft Excel se aplicó la ecuación alométrica para el cálculo de biomasa, empleando los datos dasométricos levantados en campo y del inventario forestal de cada uno de los individuos de la especie *Polylepis reticulata* del proyecto de investigación “El Ecoturismo en los Andes Ecuatorianos y sus implicaciones para la conservación del Bosque de Polylepis (*Polylepis reticulata*), en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo, Ecuador”.
- f. Para el cálculo del carbono se tomó en cuenta que, el contenido de este corresponde al 50% de la biomasa presente, constante que ha sido fundamentada en razón de que toda materia vegetal contiene en su estructura un 50 % de carbono, una vez que ha sido removida el agua (Aguirre, 2004). Es así, que el carbono orgánico es el producto de la biomasa por la constante 0,5.
- g. La conversión de carbono orgánico a CO₂ se realizó con la siguiente ecuación (Herrera & Waisberg, 2002):

$$\text{CO}_2 = \text{Kr} * \text{C}$$

Donde:

CO₂ = Dióxido de carbono (Kg).

C = Carbono (Kg).

Kr = 3,667 (Relación de pesos moleculares de CO₂ y C).

2. Objetivo 2: Calcular la biomasa del bosque con imágenes multiespectrales.

Para el cálculo de la biomasa mediante imágenes multiespectrales se realizó lo siguiente:

- a. Se analizó la imagen multiespectral proporcionada por el proyecto de investigación “El Ecoturismo en los Andes Ecuatorianos y sus implicaciones para la conservación del Bosque de Polylepis (*Polylepis reticulata*), en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo, Ecuador”.
- b. Utilizando el software ARCGIS 10.3 se realizó el siguiente proceso:
 - 1) Se recortó el área de interés.
 - 2) Se realizaron los modelos digitales de elevación (MDE)
 - 3) Obtención del modelo digital del terreno (MDT)

- 4) Obtención del modelo digital de la superficie (MDS)
- 5) Se realizó el Crop Surface Model (CSM) mediante dos métodos diferentes.
 - a) La primera fue obtener los valores de MDS y MDT mediante el software ARCGIS (Dangermond, 1969), aplicando un resample a 8 m para cada uno y una malla de muestreo se consiguió que las parcelas coincidan con las levantadas en campo. Posteriormente se realizó la resta correspondiente en el software Microsoft Excel obteniendo los valores de la altura media por transecto.
 - b) La segunda se realizó directamente en ARCGIS mediante una resta raster, además de un resample a 8 m., y una malla de muestreo con la misma dimensión, obteniendo así los valores de la altura media por parcela o valor digital del CSM.
 - c. Se realizó un análisis estadístico en los programas informáticos IBM SPSS Statistics 22 (Norman *et al.* 1968) y Microsoft Excel donde:
 - 1) Los datos de biomasa obtenidos mediante la ecuación alométrica se compararon con el valor digital o altura media del CSM, se aplicó una correlación, permitiendo generar un modelo de regresión logarítmica entre la variable dependiente (Biomasa por alometría) e independiente (altura media CSM).
 - 2) Se generó un diagrama de dispersión con la ecuación logarítmica y el coeficiente de correlación R^2 .
 - d. Mediante la ecuación obtenida se estimó la biomasa y posteriormente el carbono y CO₂ empleando el programa Microsoft Excel.

3. **Objetivo 3: Analizar la mejor correlación estadística entre el cálculo de la biomasa con ecuaciones y con imágenes multiespectrales.**

Se utilizó un análisis de correlación por el método de Pearson, con el fin de contrastar las estimaciones de biomasa total resultantes de las dos metodologías empleadas en el presente proyecto. Esta correlación proporciona la medida de intensidad de la relación lineal entre las dos metodologías; para lo cual se procedió de la siguiente forma:

- a. Se elaboró una tabla donde se agruparon los dos conjuntos de datos de biomasa a correlacionar.
- b. Se procesaron los dos conjuntos de datos en el software estadístico IBM SPSS Statistics 22, lo que permitió conocer los coeficientes de correlación de Pearson.
- c. Se realizó un análisis de los resultados arrojados por el programa IBM SPSS Statistics 22.

VII. RESULTADOS

A. APLICACIÓN DE ECUACIONES DE BIOMASA CON DATOS OBTENIDOS EN CAMPO

1. Datos dasométricos proporcionados por el proyecto y levantados en campo

En la tabla VII- 1 se puede observar una media de la altura (h) por parcela y total del transecto donde: NI = no hay individuos; NI>1 = no existen individuos mayores a un metro y NQ = no existe cuadrante.

Tabla VII- 1 Media de la altura (h)

A		B		C		D		E		F		G		H	
PARCELA	MEDIA H	PARCELA	MEDIA H	PARCELA	MEDIA H	PARCELA	MEDIA H	PARCELA	MEDIA H	PARCELA	MEDIA H	PARCELA	MEDIA H	PARCELA	MEDIA DE H
A01	1,55	B01	3,51	C01	2,09	D01	2,55	E01	3	F01	1,97	G01	1,63	H01	1,24
A02	2,4	B02	6,65	C02	3,76	D02	3,69	E02	4,16	F02	2,77	G02	2,29	H02	1,48
A03	4,04	B03	3,47	C03	8,17	D03	3,61	E03	3,95	F03	1,38	G03	2,57	H03	1,5
A04	2,5	B04	4,13	C04	6,05	D04	1,98	E04	4,59	F04	1,97	G04	3,11	H04	2,12
A05	1,3	B05	3,93	C05	0,96	D05	8,32	E05	3,31	F05	1,87	G05	1,4	H05	1,8
A06	NI>1m	B06	3,77	C06	0,58	D06	2,71	E06	1,68	F06	1,5	G06	1,4	H06	1,63
A07	NQ	B07	3	C07	3,25	D07	1,03	E07	NI	F07	NI	G07	NI	H07	NQ
TOTAL	2,35	TOTAL	4,06	TOTAL	3,55	TOTAL	3,4	TOTAL	3,44	TOTAL	1,91	TOTAL	2,06	TOTAL	1,62

Nota: Equipo de investigación

En la tabla VII- 2 se puede observar una media del diámetro a la altura del pecho (DAP) por parcela y total del transecto donde: NI = no hay individuos; NI>1 = no existen individuos mayores a un metro y NQ = no existe cuadrante.

Tabla VII- 2 Media del diámetro a la altura del pecho (DAP)

A		B		C		D		E		F		G		H	
PARCELA	MEDIA DAP	PARCELA	MEDIA DAP	PARCELA	MEDIA DAP	PARCELA	MEDIA DAP	PARCELA	MEDIA DAP	PARCELA	MEDIA DAP	PARCELA	MEDIA DAP	PARCELA	MEDIA DAP
A01	2.53	B01	3.34	C01	4.41	D01	9.72	E01	9.19	F01	5,12	G01	1.89	H01	0
A02	6,47	B02	9,5	C02	10,43	D02	15,32	E02	11,85	F02	9,34	G02	7,15	H02	3,05
A03	9,27	B03	13,28	C03	14.72	D03	21.92	E03	16.9	F03	6,6	G03	7,38	H03	2.08
A04	11.5	B04	13,44	C04	4,69	D04	10,65	E04	15,58	F04	10.61	G04	12.3	H04	4,75
A05	7,44	B05	13.79	C05	14,43	D05	15,27	E05	13,69	F05	6,31	G05	3,77	H05	5,32
A06	NI>1m	B06	10,59	C06	13,13	D06	11,25	E06	10,77	F06	3.59	G06	0	H06	5.59
A07	NQ	B07	7,37	C07	9,54	D07	1	E07	NI	F07	NI	G07	NI	H07	NQ
TOTAL	7,44	TOTAL	10,18	TOTAL	10,19	TOTAL	12,16	TOTAL	12,9	TOTAL	6,92	TOTAL	5,41	TOTAL	3,46

Nota: Equipo de investigación

En la tabla VII- 3 se visualiza una media del diámetro de copa por parcela donde: NI = no hay individuos; NI>1 = no existen individuos mayores a un metro y NQ = no existe cuadrante.

Tabla VII- 3 Media diámetro de copa (DC) por parcela

A		B		C		D		E		F		G		H	
PARCELA	MEDIA DC	PARCELA	MEDIA DC	PARCELA	MEDIA DC	PARCELA	MEDIA DC	PARCELA	MEDIA DC	PARCELA	MEDIA DC	PARCELA	MEDIA DC	PARCELA	MEDIA DC
A01	38,82	B01	51,15	C01	67,51	D01	148,83	E01	72,23	F01	78,5	G01	28,01	H01	0
A02	99,03	B02	145,48	C02	159,76	D02	246,54	E02	169,72	F02	142,96	G02	109,48	H02	46,72
A03	141,94	B03	203,18	C03	225,4	D03	335,54	E03	258,69	F03	101,09	G03	113,09	H03	31,89
A04	176,06	B04	205,74	C04	71,88	D04	163,04	E04	238,43	F04	162,46	G04	188,29	H04	72,67
A05	113,94	B05	196,55	C05	220,85	D05	233,77	E05	209,48	F05	96,65	G05	57,76	H05	81,52
A06	NI>1	B06	150,94	C06	201,04	D06	172,23	E06	144,17	F06	54,98	G06	0	H06	85,66
A07	NQ	B07	91,65	C07	146,15	D07	15,31	E07	NI	F07	NI	G07	NI	H07	NQ

Nota: Recolección de datos en campo, 2018

2. Estimación de la biomasa, carbono y CO₂

A continuación, se muestra los resultados de la estimación de biomasa a partir de la ecuación alométrica descrita en la metodología, además la cuantificación de carbono y CO₂.

Tabla VII- 4 Estimación de biomasa (ton/ha)

PARCELA	TOTAL DE INDIVIDUOS	BIOMASA (g)	BIOMASA (ton/ha)	CARBONO (ton/ha)	CO ₂ (ton/ha)
A01	32	14897,3871	0,0149	0,0074	0,0273
A02	58	152552,9665	0,1526	0,0763	0,2797
A03	59	436278,2836	0,4363	0,2181	0,7999
A04	50	346136,5959	0,3461	0,1731	0,6346
A05	31	68732,2347	0,0687	0,0344	0,1260
A06	NI>1m	0	0	0	0
A07	NQ	0	0	0	0
B01	46	53422,2514	0,0534	0,0267	0,0979
B02	29	203497,0848	0,2035	0,1017	0,3731
B03	17	188213,2174	0,1882	0,0941	0,3451
B04	13	154029,9875	0,1540	0,0770	0,2824
B05	29	351381,0938	0,3514	0,1757	0,6443
B06	29	171998,9834	0,1720	0,0860	0,3154
B07	16	37326,1500	0,0373	0,0187	0,0684
C01	43	76788,9854	0,0768	0,0384	0,1408
C02	29	244791,9745	0,2448	0,1224	0,4488
C03	12	288234,1927	0,2882	0,1441	0,5285
C04	29	90874,7242	0,0909	0,0454	0,1666
C05	12	130152,6771	0,1302	0,0651	0,2386
C06	15	160323,6577	0,1603	0,0802	0,2940
C07	1	4402,4509	0,0044	0,0022	0,0081
D01	20	98289,8905	0,0983	0,0491	0,1802
D02	20	311523,2578	0,3115	0,1558	0,5712
D03	8	190782,8863	0,1908	0,0954	0,3498
D04	15	106540,4389	0,1065	0,0533	0,1953
D05	14	193447,9753	0,1934	0,0967	0,3547
D06	19	110488,6854	0,1105	0,0552	0,2026
D07	1	29,7497	0,000030	0,000015	0,00005
E01	47	133236,6458	0,1332	0,0666	0,2443
E02	31	237249,5113	0,2372	0,1186	0,4350
E03	10	234218,1518	0,2342	0,1171	0,4294
E04	17	266939,9275	0,2669	0,1335	0,4894
E05	16	153969,2983	0,1540	0,0770	0,2823

E06	32	171397,1942	0,1714	0,0857	0,3143
E07	NI	0	0	0	0
F01	35	50727,2894	0,0507	0,0254	0,0930
F02	36	177657,7697	0,1777	0,0888	0,3257
F03	22	45212,9052	0,0452	0,0226	0,0829
F04	23	110927,9093	0,1109	0,0555	0,2034
F05	25	50869,3762	0,0509	0,0254	0,0933
F06	7	4724,0896	0,0047	0,0024	0,0087
F07	NI	0	0	0	0
G01	28	4758,1853	0,0048	0,0024	0,0087
G02	36	121825,9424	0,1218	0,0609	0,2234
G03	14	38204,7047	0,0382	0,0191	0,0700
G04	20	194740,2402	0,1947	0,0974	0,3571
G05	21	22703,8297	0,0227	0,0114	0,0416
G06	8	0	0	0	0
G07	NI	0	0	0	0
H01	10	0	0	0	0
H02	31	18030,7214	0,0180	0,0090	0,0331
H03	11	5713,8711	0,0057	0,0029	0,0105
H04	36	52869,7957	0,0529	0,0264	0,0969
H05	15	40966,0341	0,0410	0,0205	0,0751
H06	12	28352,4637	0,0284	0,0142	0,0520
H07	NQ	0	0	0	0
TOTAL		6350433,6392	6,3504	3,1752	11,6435

Nota: Villegas, 2019

En la tabla VII- 2 se reflejan los resultados del cálculo de biomasa, carbono y CO₂ por parcela y total del bosque, siendo la A03 la de mayor cantidad con 0,4363 ton/ha de biomasa, 0,2181 ton/ha de carbono y 0,7999 ton/ha de CO₂.

La menor cantidad de biomasa, carbono y CO₂ se visualizó en el cuadrante D07 con valores de 0,000030 ton/ha, 0,000015 ton/ha y 0,000055 ton/ha respectivamente. Además, en varias parcelas no se observaron individuos (NI), eran menores a un metro (NI>1) o no existe cuadrante (NQ).

Al final se obtuvo un total de 6,3504 ton/ha de biomasa, 3,1752 ton/ha de carbono y 11,6435 ton/ha de CO₂.

B. CÁLCULO DE LA BIOMASA DEL BOSQUE CON IMÁGENES MULTIESPECTRALES

1. Ortofotomosaico

El Ortofotomosaico proporcionado por el proyecto de investigación se caracteriza por tener una resolución de 9 cm y 4 bandas espectrales (Banda roja 1, Banda verde 2, Banda azul 3, Banda infrarroja 4) determinada por las características que se muestran en la Figura VII- 1.

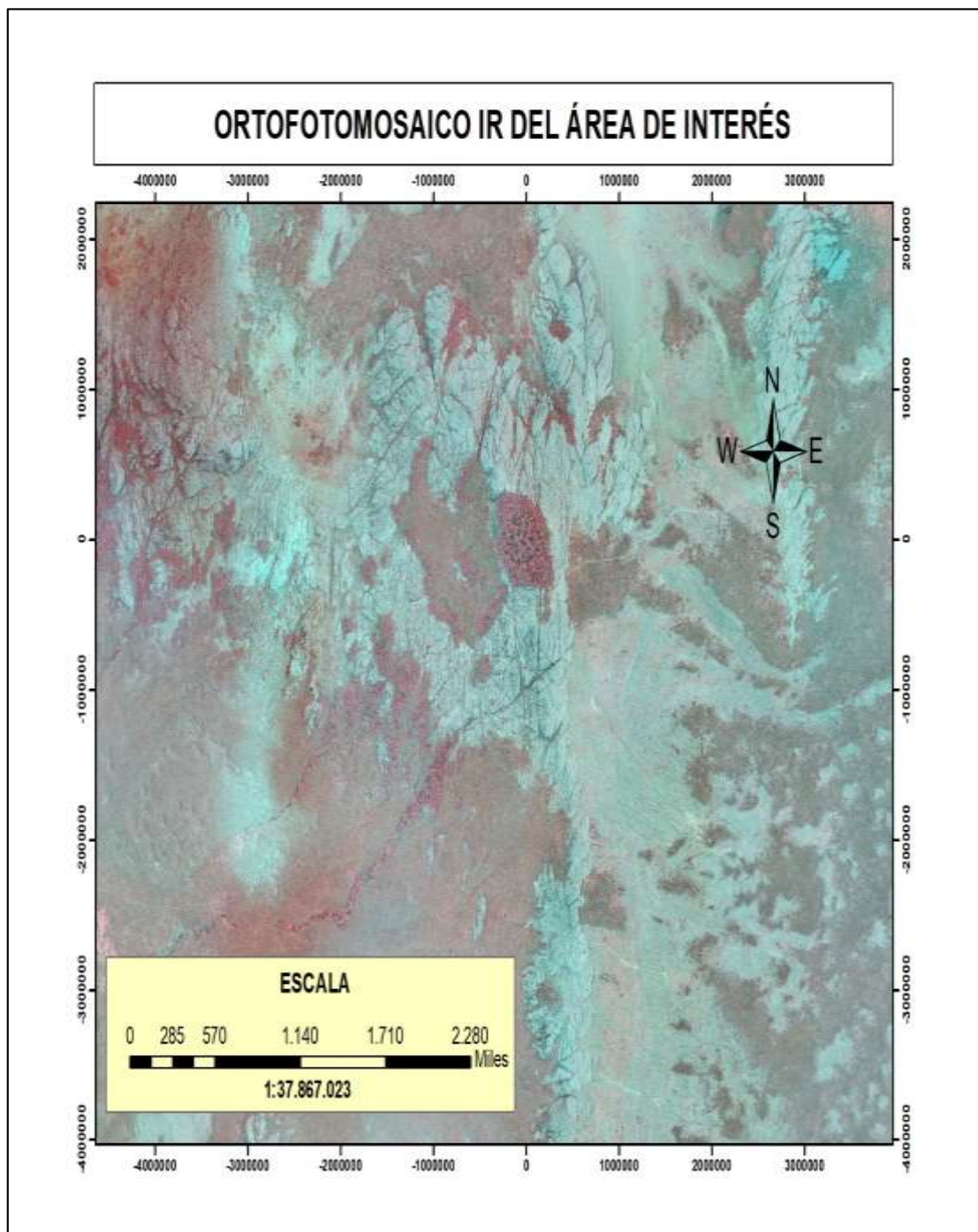


Figura VII- 1 Ortofotomosaico IR
Nota: Equipo de investigación

2. Imagen multiespectral del área de interés

En la figura VII- 2, se puede observar la imagen multiespectral que fue construida usando el proceso conocido como Layer Stack o Union of Bands (Castillo *et al.* 2018), además se aplicó una máscara para extraer el área de interés que corresponde al Bosque de Polylepis de la Reserva de producción de Fauna Chimborazo.

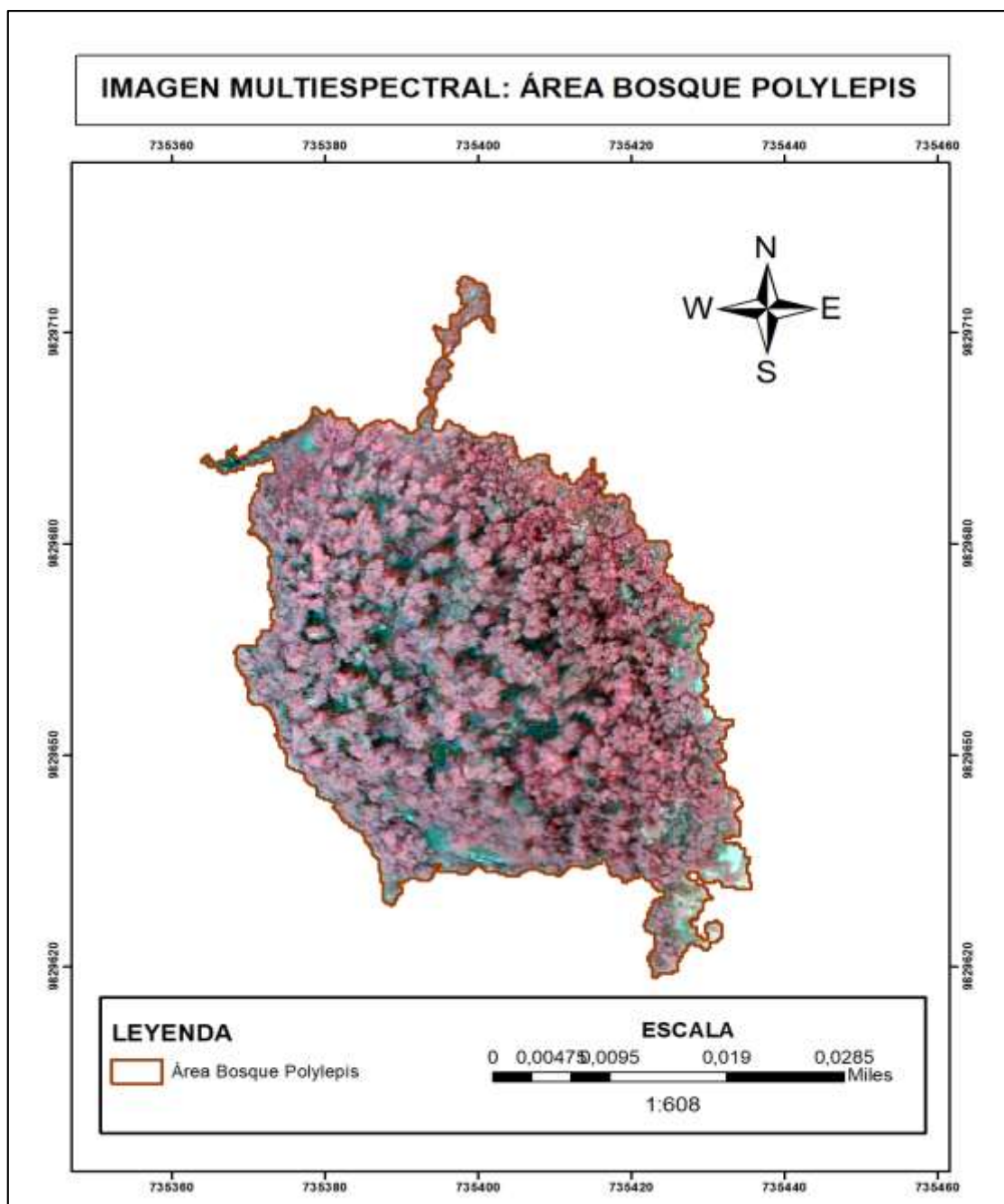


Figura VII- 2 Imagen multiespectral

Nota: Villegas, 2019

3. Modelo digital del terreno

En la figura VII- 3 se muestra el modelo digital del terreno en tonos grises. El mismo que corresponde el relieve al nivel del suelo donde se reflejan los accidentes geográficos y todos los elementos que se encuentran en la zona de estudio. En consecuencia, la variación de color muestra la variación de la altura en metros, con un máximo de 4360,15 m., un mínimo de 4312,4 m., y una media de 4338,15 m.

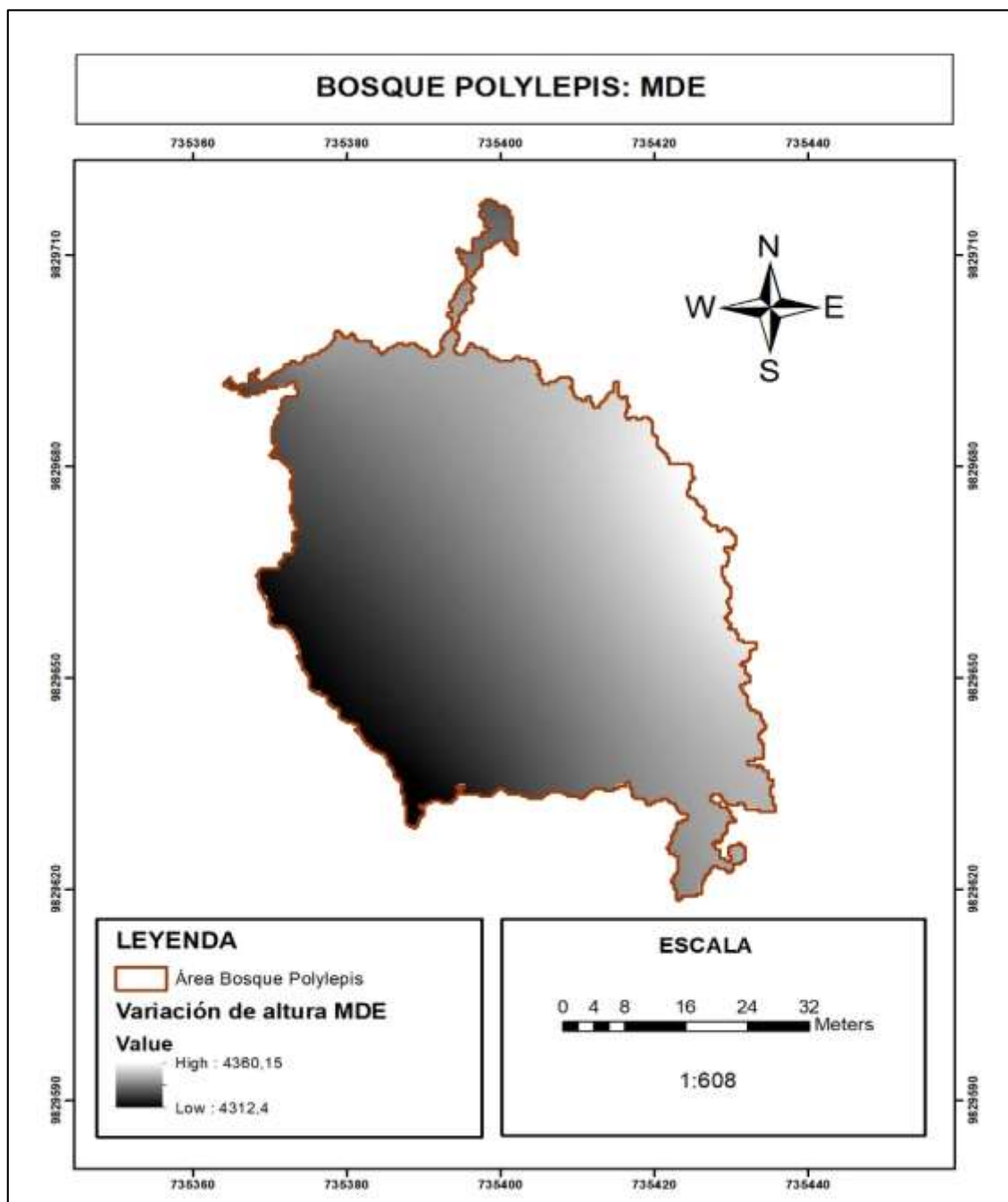


Figura VII- 3 Modelo digital del terreno

Nota: Villegas, 2019

4. Modelo digital de la superficie

En la figura VII- 4 se visualiza el modelo digital de la superficie en tonos grises, este representa todos los elementos existentes en la superficie de la zona de estudio. La degradación en los tonos del modelo representa la variación de la altura en metros, dicha variación nos arroja un máximo de 4361,28 m., un mínimo de 4312,45 m., y una media de 4345,76 m.

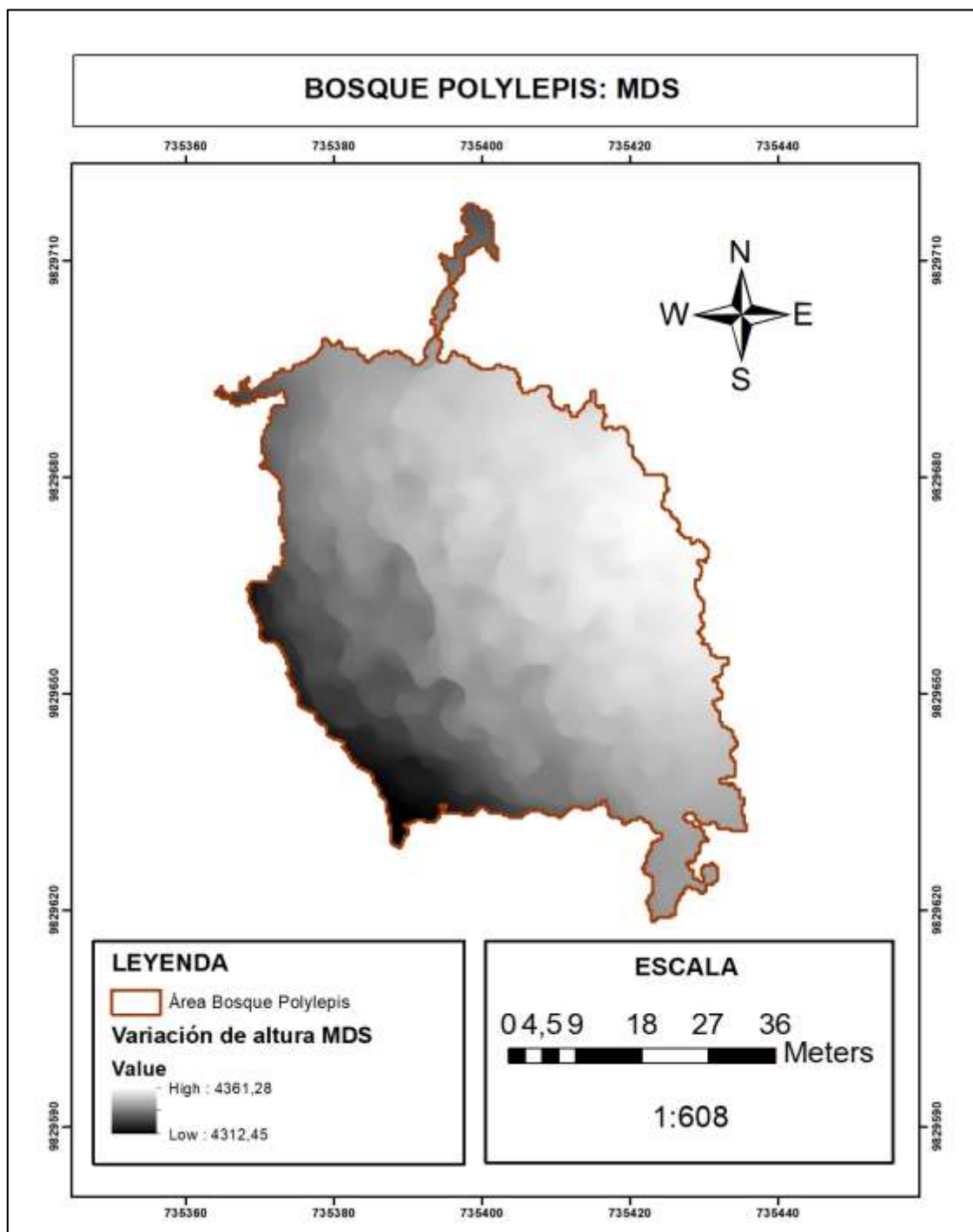


Figura VII- 4 Modelo digital de la superficie

Nota: Villegas, 2019

5. Crop Surface Model

El Crop Surface Model (CSM) o modelo de superficie de cultivo, es la diferencia entre el modelo digital de la superficie (MDS) y el modelo digital del terreno (MDT) (Bending *et al.*, 2014) y nos permite conocer la altura de los árboles del área de interés que en la presente investigación corresponde a la especie *Polylepis reticulata*.

A continuación, se muestra los resultados del CSM del área total del bosque en sus puntos máximo, mínimo y una media.

Tabla VII- 5 Valor digital (CSM) - área total del bosque

	MDS	MDT	CSM
Máximo	4361,2832	4360,1494	1,1338
Mínimo	4312,4531	4312,3989	0,0542
Media	4345,7617	4338,1454	7,6163

Nota: Villegas, 2019

a. **Crop Surface Model (MDS-MDT) procesado individualmente**

En la siguiente tabla se visualizan los resultados del CSM por parcela, cuyos valores fueron obtenidos de los datos generados en ARCGIS individualmente para cada modelo digital de elevación (MDS-MDT).

Tabla VII- 6 Valor digital (CSM)

PARCELA	MDS	MDT	CSM
A01	4355,542	4348,619	6,923
A02	4352,929	4345,137	7,792
A03	4351,888	4342,306	9,582
A04	4347,339	4339,568	7,771
A05	4339,176	4335,977	3,199
B01	4362,058	4357,365	4,693
B02	4359,006	4352,702	6,304
B03	4355,645	4347,593	8,052
B04	4353,01	4343,352	9,658
B05	4349,37	4339,581	9,789
B06	4347,416	4335,915	11,501
B07	4341,156	4331,898	9,258
C01	4361,137	4356,945	4,192
C02	4359,549	4351,026	8,523
C03	4356,153	4345,751	10,402
C04	4354,45	4341,051	13,399
C05	4349,588	4336,719	12,869
C06	4343,991	4332,575	11,416

C07	4339,544	4328,661	10,883
D01	4359,255	4354,253	5,002
D02	4358,366	4348,581	9,785
D03	4352,403	4343,295	9,108
D04	4349,85	4338,348	11,502
D05	4347,568	4333,657	13,911
D06	4340,96	4329,118	11,842
D07	4334,104	4324,603	9,501
E01	4356,978	4351,155	5,823
E02	4353,754	4345,714	8,04
E03	4351,534	4340,458	11,076
E04	4348,703	4335,349	13,354
E05	4337,732	4330,409	7,323
E06	4337,166	4325,594	11,572
F01	4355,298	4352,048	3,25
F02	4354,552	4347,436	7,116
F03	4352,841	4342,502	10,339
F04	4346,146	4337,266	8,88
F05	4343,578	4331,937	11,641
F06	4334,991	4326,761	8,23
G01	4350,575	4348,085	2,49
G02	4349,976	4344,402	5,574
G03	4346,208	4339,751	6,457
G04	4341,219	4334,33	6,889
G05	4335,566	4328,514	7,052
G06	4328,703	4322,954	5,749
H01	4346,77	4345,921	0,849
H02	4346,412	4342,388	4,024
H03	4344,068	4341,639	2,429
H04	4338,483	4335,904	2,579
H05	4322,549	4319,065	3,484
H06	4318,839	4318,079	0,76

Nota: Villegas, 2019

En la tabla VII- 6 se expresa los valores del CSM que corresponden a una media de la altura de los arboles por parcela, donde se puede observar que los individuos de mayor altura se encuentran en el cuadrante D05 con 13,911 m., y los de menor elevación en la parcela H06 con un valor de 0,76 m.

b. Crop Surface Model generación de una nueva capa

En la figura VII- 5 se observa la nueva capa generada denominada CSM, que corresponde a la resta de los modelos digitales de elevación (MDS-MDT) directamente en el software ARCGIS, donde se visualizan los valores máximo y mínimo.

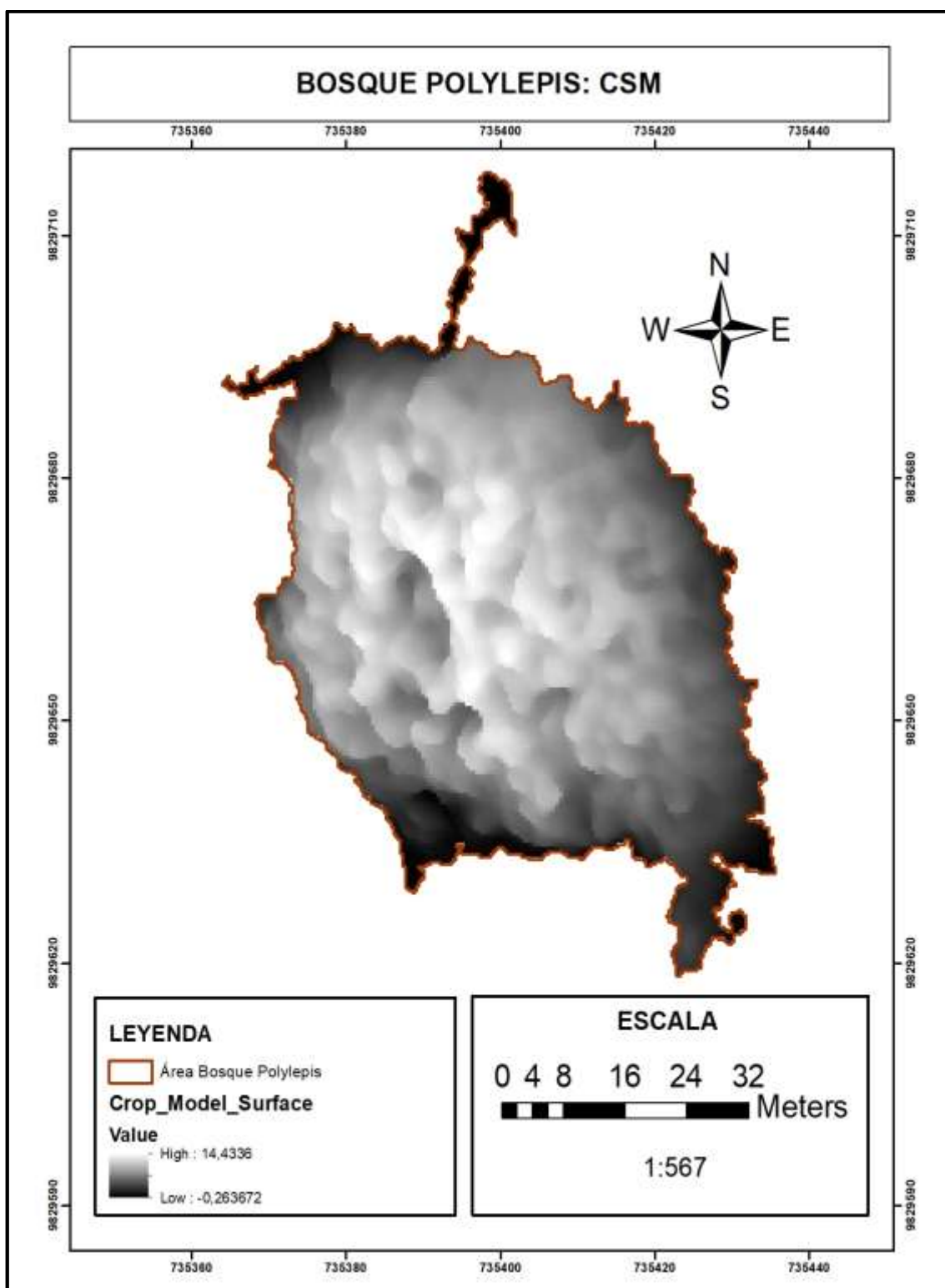


Figura VII- 5 Crop Surface Model Bosque Polylepis

Nota: Villegas, 2019

Los valores digitales por parcela obtenidos de la capa antes mencionada se expresan en la tabla VII- 7.

Tabla VII- 7 Valor digital por parcela capa Crop Surface Model

PARCELA	CROP SURFACE MODEL
A01	6,854
A02	7,765
A03	9,533
A04	7,606
A05	3,198
B01	4,550
B02	6,257
B03	8,038
B04	9,660
B05	9,858
B06	11,500
B07	9,659
C01	4,141
C02	8,531
C03	10,646
C04	13,484
C05	12,645
C06	11,543
C07	11,011
D01	4,977
D02	9,551
D03	9,771
D04	11,521
D05	13,964
D06	12,039
D07	9,550
E01	5,766
E02	7,943
E03	11,006
E04	13,283
E05	7,326
E06	11,663
F01	3,145
F02	7,108
F03	10,139
F04	8,525
F05	11,667
F06	8,249
G01	2,429

G02	5,546
G03	6,362
G04	6,992
G05	6,715
G06	5,492
H01	0,785
H02	3,939
H03	2,390
H04	2,577
H05	3,011
H06	0,611

Nota: Villegas, 2019

En la tabla anterior se observan los valores digitales por parcela que corresponden a la media de la altura de la especie en estudio, donde se visualiza mayor rango en el cuadrante D05 con 13,964 m., y los individuos que presenta menor elevación se encuentran en la parcela H06 con un valor de 0,611.

6. Análisis estadístico

En la tabla VII- 8 se aprecian los coeficientes obtenidos de la regresión, a través del programa estadístico SPSS, dando como resultado la siguiente ecuación:

$$y = 0,073\ln(x) - 0,01$$

Donde:

y = variable dependiente = Biomasa Total (tn/ha).

x = variable independiente = (CSM) media de la altura por parcela (m)

Tabla VII- 8 Coeficientes de regresión

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error estándar	Beta		
ln(CSM)	0,073	0,021	0,454	3,531	0,001
(Constante)	-0,011	0,041		-0,267	0,791

Nota: Villegas, 2019

En la tabla anterior se muestran los coeficientes de regresión logarítmica. La columna marcada Coeficientes no estandarizados, contiene los coeficientes de regresión parcial que define la ecuación estadística de regresión. El coeficiente correspondiente a la constante es el origen de la curva de regresión; el coeficiente correspondiente a ln (CSM), es la pendiente de la curva de regresión e indica el cambio medio que corresponde a la variable dependiente (Biomasa Total) por cada unidad de cambio de la variable independiente (Valor digital del modelo CSM). Además de obtener los estadísticos t y

sus niveles críticos (Sig.) diferentes de cero; lo cual nos permite interpretar que entre la variable dependiente e independiente existe relación logarítmica significativa.

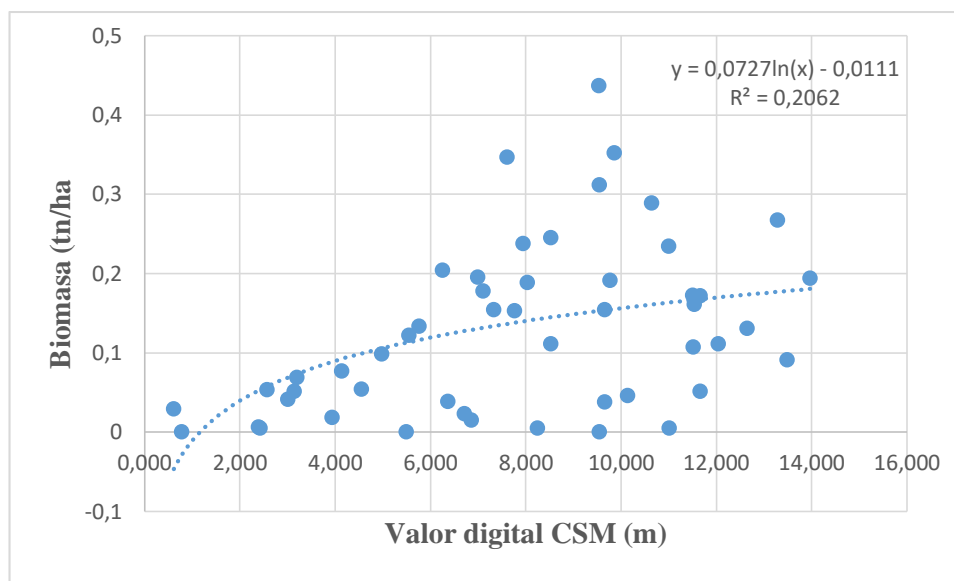


Figura VII- 6 Modelo de regresión logarítmica

Nota: Villegas, 2019

En la figura VII- 6 se muestra el modelo de regresión logarítmica con una correlación positiva ($R^2=0,2062$); asimismo se visualiza que a cada valor digital del modelo CSM le corresponde una estimación de Biomasa basado en un incremento de $-0,0111$ más $0,0727$ logaritmo natural del valor digital del modelo CSM.

7. Estimación de Biomasa, Carbono y CO₂

La tabla VII- 9 se muestran los resultados de la estimación de biomasa por CSM utilizando la ecuación $y = 0,073\ln(x) - 0,01$, partiendo de los datos obtenidos por ecuaciones alométricas de los 50 transectos muestreados, dentro de los 8 metros de resolución del modelo CSM.

Tabla VII- 9 Valores de biomasa, carbono y CO₂

PARCELA	CSM (m)	Biomasa			
		por alometría tn/ha	Biomasa- CSM (tn/ha)	Carbono (tn/ha)	CO ₂ (tn/ha)
A01	6,854	0,015	0,129	0,064	0,236
A02	7,765	0,153	0,138	0,069	0,253
A03	9,533	0,436	0,153	0,076	0,280
A04	7,606	0,346	0,136	0,068	0,250
A05	3,198	0,069	0,073	0,037	0,135

B01	4,550	0,053	0,099	0,050	0,182
B02	6,257	0,204	0,122	0,061	0,224
B03	8,038	0,188	0,140	0,070	0,257
B04	9,660	0,154	0,154	0,077	0,282
B05	9,858	0,351	0,155	0,078	0,285
B06	11,500	0,172	0,166	0,083	0,305
B07	9,659	0,037	0,154	0,077	0,282
C01	4,141	0,077	0,092	0,046	0,169
C02	8,531	0,245	0,145	0,072	0,265
C03	10,646	0,288	0,161	0,080	0,295
C04	13,484	0,091	0,178	0,089	0,326
C05	12,645	0,130	0,173	0,087	0,318
C06	11,543	0,160	0,167	0,083	0,306
C07	11,011	0,004	0,163	0,082	0,299
D01	4,977	0,098	0,106	0,053	0,194
D02	9,551	0,312	0,153	0,076	0,280
D03	9,771	0,191	0,155	0,077	0,283
D04	11,521	0,107	0,167	0,083	0,305
D05	13,964	0,193	0,181	0,090	0,331
D06	12,039	0,111	0,170	0,085	0,311
D07	9,550	0,000	0,153	0,076	0,280
E01	5,766	0,133	0,116	0,058	0,213
E02	7,943	0,237	0,140	0,070	0,256
E03	11,006	0,234	0,163	0,082	0,299
E04	13,283	0,267	0,177	0,088	0,324
E05	7,326	0,154	0,134	0,067	0,245
E06	11,663	0,171	0,167	0,084	0,307
F01	3,145	0,051	0,072	0,036	0,132
F02	7,108	0,178	0,131	0,066	0,241
F03	10,139	0,045	0,157	0,079	0,288
F04	8,525	0,111	0,145	0,072	0,265
F05	11,667	0,051	0,168	0,084	0,307
F06	8,249	0,005	0,142	0,071	0,261
G01	2,429	0,005	0,053	0,027	0,098
G02	5,546	0,122	0,113	0,057	0,208
G03	6,362	0,038	0,123	0,062	0,226
G04	6,992	0,195	0,130	0,065	0,239
G05	6,715	0,023	0,127	0,064	0,233
G06	5,492	0,000	0,113	0,056	0,207
H01	0,785	0,000	-0,029	-0,014	-0,053
H02	3,939	0,018	0,089	0,044	0,162
H03	2,390	0,006	0,052	0,026	0,096

H04	2,577	0,053	0,058	0,029	0,106
H05	3,011	0,041	0,069	0,035	0,127
H06	0,611	0,028	-0,047	-0,023	-0,086
TOTAL		6,350	6,348	3,174	11,639

Nota: Villegas, 2019

Como se observa en la tabla anterior el total de Biomasa que presenta el área de estudio es de 6,348 tn/ha, además se puede visualizar un 3,174 tn/ha de Carbono captado y un 11,639 de absorción de CO₂; siendo el transecto D05 el de mayor valor tanto para Biomasa, Carbono y CO₂ con datos de 0,181 tn/ha; 0,090 tn/ha y 0,331 tn/ha respectivamente. Asimismo, se nota que la parcela de menor cantidad es la H06 que muestra valores negativos de -0,047 tn/ha de Biomasa, -0,023 tn/ha de Carbono y -0,086 tn/ha de CO₂.

C. CORRELACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE EL CÁLCULO DE BIOMASA CON ECUACIONES Y CON IMÁGENES MULTIESPECTRALES.

En la tabla VII- 10 se puede observar los dos conjuntos de datos de biomasa agrupados, tanto los obtenidos mediante la ecuación alométrica como los calculados mediante la imagen multiespectral o Crop Surface Model, los datos mostrados en la tabla fueron procesados en el software IBM SPSS Statistics 22.

Tabla VII- 10 Conjunto de datos de biomasa agrupados

BIOMASA POR ALOMETRÍA TN/HA	BIOMASA CSM (TN/HA)
0,015	0,129
0,153	0,138
0,436	0,153
0,346	0,136
0,069	0,073
0,053	0,099
0,204	0,122
0,188	0,140
0,154	0,154
0,351	0,155
0,172	0,166
0,037	0,154
0,077	0,092
0,245	0,145
0,288	0,161
0,091	0,178
0,130	0,173

0,160	0,167
0,004	0,163
0,098	0,106
0,312	0,153
0,191	0,155
0,107	0,167
0,193	0,181
0,111	0,170
0,000	0,153
0,133	0,116
0,237	0,140
0,234	0,163
0,267	0,177
0,154	0,134
0,171	0,167
0,051	0,072
0,178	0,131
0,045	0,157
0,111	0,145
0,051	0,168
0,005	0,142
0,005	0,053
0,122	0,113
0,038	0,123
0,195	0,130
0,023	0,127
0,000	0,113
0,000	-0,029
0,018	0,089
0,006	0,052
0,053	0,058
0,041	0,069
0,028	-0,047

Nota: Villegas, 2019

La tabla anterior presenta dos variables con un total de 50 datos de biomasa, a las que se les aplicó una correlación bivariada, que nos permitió medir el grado de dependencia existente entre las dos variables, mediante la cuantificación por el denominado coeficiente de correlación lineal de Pearson con su respectivo nivel de significación.



Figura VII- 7 Módulo Coeficiente de Correlación

Nota: Villegas, 2019

En la figura anterior se puede observar que las dos variables a correlacionar tienen una prueba de significación bilateral (de dos colas), es decir que su análisis se encuentra con un nivel de confianza al 95%.

En la tabla VII- 11 se muestran los resultados de la correlación de Pearson calculados en el software estadístico IBM SPSS Statistics 22 para las 50 parcelas y refleja en que grado se encuentran relacionados los dos conjuntos de datos.

Tabla VII- 11 Correlación estadística - biomasa de las parcelas

		Biomasa_alometría	Biomasa_CSM
Biomasa_alometría	Correlación de Pearson	1	,454**
	Sig. (bilateral)		0,001
	N	50	50
Biomasa_CSM	Correlación de Pearson	,454**	1
	Sig. (bilateral)	0,001	
	N	50	50

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

Nota: Villegas, 2019

En la tabla anterior se puede visualizar que existe una correlación significativa entre las dos variables ya que el grado de significación es 0,001. También se puede deducir que la biomasa calculada por alometría y la biomasa obtenida mediante Crop Surface Model tienen una correlación positiva, además su coeficiente de correlación de Pearson r tiene un valor de 0,454 lo que nos indica que las dos variables tienen una relación con intensidad media.

Asimismo, en la tabla VII- 12 se observa un mayor valor en el coeficiente de correlación ($r=0,99$), que nos indica que la relación entre las dos variables es de intensidad alta, esto se debe a que para el análisis se añadió el total de biomasa obtenido mediante la ecuación alométrica y la imagen multiespectral (con el método CSM) que tienen una cantidad de biomasa similar (ver tabla VII- 13).

Tabla VII- 12 Correlación estadística - biomasa total

		Biomasa_alometría	Biomasa_CSM
Biomasa_alometría	Correlación de Pearson	1	,994**
	Sig. (bilateral)		0
	N	51	51
Biomasa_CSM	Correlación de Pearson	,994**	1
	Sig. (bilateral)	0	
	N	51	51

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

Nota: Villegas, 2019

En la tabla VII- 13 se muestran el total de biomasa, carbono y CO₂ en el relicto del bosque de Polylepis obtenidos mediante la ecuación alométrica y la imagen multiespectral

Tabla VII- 13 Total de biomasa, carbono y CO₂

	BIOMASA (ton/ha)	CARBONO (ton/ha)	CO₂ (ton/ha)
ECUACIÓN ALOMÉTRICA	6,348	3,174	11,639
IMAGEN MULTIESPECTRAL (CSM)	6,350	3,175	11,644

Nota: Villegas, 2019

Como se puede observar los valores de biomasa, carbono y CO₂ obtenidos mediante las dos metodologías son similares.

VIII. CONCLUSIONES

Se cuantificó la biomasa de la especie *Polylepis reticulata* a partir de la ecuación alométrica $Biomasa = 0,1546 * DAP^{0,76803} * ALTURA^{0,40467} * COPA^{1,24046}$ obteniendo un total de 6,3504 ton/ha; además se calculó la capacidad de almacenamiento de carbono que corresponde al 50% de la biomasa de lo cual se obtuvo 3,1752 ton/ha y finalmente se realizó la conversión de carbono a dióxido de carbono con la ecuación $CO_2 = Kr * C$ que arrojó un valor de 11,6435 ton/ha.

Para el cálculo de biomasa, carbono y CO_2 a partir de la imagen multiespectral se utilizó la metodología denominada Crop Surface Model (CSM) o modelo de superficie de cultivo, que hace referencia al valor digital de la resta entre los modelos digitales de superficie y terreno (MDS-MDT), además de un análisis estadístico entre la biomasa obtenida mediante la ecuación alométrica y el valor digital, para conseguir la ecuación $y = 0,073 \ln(x) - 0,01$ donde “y” corresponde a la biomasa y “x” al valor digital de CSM obteniendo como resultado valores de 6,350 ton/ha; 3,175 ton/ha y 11,644 ton/ha para cada caso.

Para la correlación estadística de Pearson de la biomasa calculada mediante la ecuación alométrica y la imagen multiespectral (CSM) se realizaron dos análisis uno que corresponde al valor para cada parcela y otro al cual se añadió el total de biomasa del relicto del bosque; en ambos casos se obtuvo una correlación significativa en un grado de significación de nivel 0,001, con un coeficiente de correlación $r = 0,454$ para el primero y $r = 0,99$ para el segundo caso, lo que quiere decir que mediante las dos metodologías se obtienen valores por parcela y total similares.

IX. RECOMENDACIONES

Se recomienda la aplicación de métodos no destructivos para cuantificar la capacidad de almacenamiento de carbono específicamente en áreas forestales que están dentro de reservas naturales, que poseen especies endémicas, que contengan especies que consten en la Lista Roja de Especies Amenazadas de la UICN o a su vez que se encuentren en zonas de difícil acceso y en grandes extensiones de bosque, ya que mediante metodologías indirectas de estimación de biomasa se aporta a la conservación, además de generar ahorro de tiempo y dinero.

La conservación del Bosque de *Polylepis* es de gran importancia ya que sirve como sumidero de CO₂ y aporta a la mitigación del cambio climático, es por esto que se debería realizar mayor control por parte de las autoridades pertinentes sobre el número de turistas que ingresan diariamente a este sitio, para poder contrarrestar la degradación de las especies endémicas como el *Polylepis reticulata* que están dentro del relicto del bosque.

Se recomienda realizar la valoración económica de la captura de carbono de la especie *Polylepis reticulata*, como una opción para mejorar la apreciación de la importancia que tiene el sitio para la mitigación de los gases de efecto invernadero, por parte de los visitantes, las comunidades aledañas y la administración de la RPFCH, logrando que se le dé la relevancia que tiene el bosque dentro de la reserva y para las poblaciones contiguas.

X. RESUMEN

La presente investigación propone: estimar el carbono almacenado en la especie *Polylepis reticulata*, mediante el uso de imágenes multiespectrales, en el Bosque de *Polylepis* de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo; mediante dos metodologías, la primera que se basó en una revisión de bibliografía especializada para obtener la ecuación alométrica que se utilizó para el cálculo de la biomasa, para lo cual se necesitó registrar datos como el diámetro a la altura del pecho (DAP), altura (h) y diámetro de copa (DC), mismos que fueron levantados dividiendo el área del bosque en 54 parcelas, como resultado un valor de 6,3504 ton/ha de biomasa, posteriormente se cuantificó el carbono que corresponde al 50% de biomasa y su valor resultante fue 3,1752 ton/ha y finalmente se obtuvo el CO₂ con un total de 11,6435 ton/ha. La segunda metodología parte del procesamiento en el software ARCGIS de un ortofotomosaico que se caracteriza por tener una resolución de 9 cm y 4 bandas espectrales, dicha metodología se denomina Crop Surface Model o Modelo de Superficie de Cultivo (CSM), que corresponde a una resta entre el modelo digital de superficie (MDS) y el modelo digital del terreno (MDT), obteniendo la altura media por transecto de los individuos de la especie en estudio, a continuación, a través de un análisis estadístico se generó una ecuación logarítmica misma que se utilizó para el cálculo de la biomasa, con un valor total de 6,348 ton/ha, posteriormente se obtuvo el carbono con un valor de 3,174 ton/ha y finalmente un total de 11,639 ton/ha para CO₂. Al final se realizó una correlación estadística de Pearson entre las dos metodologías, la cual indicó que existe una correlación significativa con un coeficiente positivo $r=0,99$.

Palabras Clave: CARBONO ALMACENADO — BIOMASA — ESPECIES FORESTALES.

Por: Braulio Villegas



XI. SUMMARY

The present investigation proposes: to estimate the carbon stored in the *Polylepis reticulata* species, through the use of multispectral images, in the *Polylepis* Forest of the Chimborazo Fauna Production Reserve; through two methodologies, the first that was based on a review of specialised literature to obtain the allometric equation that was used for the calculation of biomass, for which it was necessary to record data such as Diameter at Breast Height (DBH), height (h) and cup diameter (CD), which were raised by dividing the forest area into 54 plots, resulting in a value of 6,3504 ton/ha of biomass, then carbon corresponding to 50% of biomass was quantified. Its resulting value was 3,1752 ton/ha, and finally, CO₂ was obtained with a total of 11,6435 ton/ha. The second methodology starts from the processing in the ArcGIS software of an orthophoto mosaic that is characterized by having a resolution of 9 cm and four spectral bands, said methodology is called Crop Surface Model or Crop Surface Model (CSM), which corresponds to a subtraction between the digital surface model (MDS) and the digital terrain model (MDT), obtaining the average transect height of the individuals of the species under study, then, through a statistical analysis, a logarithmic equation was generated that it was used for the calculation of biomass, with a total value of 6,348 tons/ha, then carbon with a value of 3,174 tons/ha was obtained and finally a total of 11,639 tons/ha for CO₂. In the end, a statistical correlation of Pearson was made between the two methodologies, which indicated that there is a significant correlation with a positive coefficient $r = 0.99$.

Keywords: STORED CARBON – BIOMASS – FOREST SPECIES.



XII. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta Mireles, M., Vargas Hernández, J., Velázquez Martínez, A., & Etchevers Barra, J. D. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones Alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México: *Agrociencia*, 36, 725–736.
- Álvarez, G. (2008). Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia. (Tesis de posgrado. Magister Scientiae en Manejo y Conservación de Bosques Naturales y Biodiversidad). Escuela de Posgrado. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica.
- Avendaño, H. Acosta, M., Carrillo, A. Etchevers, F., & Barra, J. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32, 233-238.
- Ares, A., Boniche, J., Quesada, J., Yost, R., Molina, E., & Smyth, T. (2002). Estimación de biomasa por métodos alométricos, nutrientes y carbono en plantaciones de palmito en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 26, 19-30.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2008). Ambiente sano y ecológicamente equilibrado. Artículo 397. Constitución de la República del Ecuador. Quito: Asamblea del Ecuador.
- Bedoya, A., & Alberto, C. (2016) Estimación de biomasa aérea forestal en bosque de robledales del altiplano norte de Antioquia, utilizando teledetección. (Tesis de posgrado. Magister en Medio Ambiente y Desarrollo). Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.
- Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., & Bareth, G. (2014). Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. *Remote Sensing*, 6(11), 10395-10412.
- Bertzky, M., Ravilious, C., Kapos, V., Dickson, B., Carrión, D., & Chiu, M. (2011). Carbono, biodiversidad y servicios ecosistémicos: explorando los beneficios múltiples. Ecuador. UNEPWCMC, Cambridge, Reino Unido.
- Brown, S. (1997). Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. XI Congreso Forestal Mundial. US Environmental Protection Agency, National Health and Environmental Effects Research Laboratory, Western Ecology Division. pp. 13-22.
- Brown, S. (1997a). Estimating biomass and biomass change of tropical forest: a primer. FAO forestry paper. Roma: FAO. p. 134.
- Brown, S., & Lugo, A. (1984). Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes. *Science* 223, 1290. *Science*. 223, 1290 - 1293.

- Buytaert, W., Cuesta Camacho, F., & Tobón, C., (2011). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 20, 19–33.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Rev.* 79, 53–72.
- Calderón Loor, M. R., & Lozada Velastegui, V. S. (2010). Determinación de biomasa y contenido de carbono en plantaciones forestales de *Polylepis incana* y *Polylepis reticulata*. (Tesis de grado. Ingeniero Ambiental). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Cantillo, E., Avella, E., & Rodríguez, K. (2005). La vegetación leñosa de la reserva forestal Cárpatos (Guasca-Cundinamarca). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. D.C. p. 105.
- Cardoso, J. (2014). Identificación y selección de árboles semilleros de especies forestales nativas por medio de imágenes satelitales en la microcuenca del Río Chimborazo. (Tesis de grado. Ingeniero Forestal). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Castañeda-Martín, A. E., & Montes-Pulido, C. R. (2017). Carbon stock in andean paramo. *Entramado*, 13(1), 210-221.
- Castillo, D. D., Jara, C. A., Ricaurte, C. B., Vaca, B. E., & Quevedo, L. A. (2018). Photosynthetic activity and canopy height model determined by uav rgb and ir close-range remote-sensing in the high andean polylepis relict forest, ecuador. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. Series II*, 11(1), 1-16.
- Castillo, D. D., Carrasco, J. C., Quevedo, L. A., Ricaurte, C. B., Gavilanes, A. V., & Borz, S. A. (2017). Diversity, composition and structure of Andean high forest in Ecuador, South America. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. Series II*, 10(2), 1-16.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., ... & Lescure, J. P. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99.
- Chave, J. (2005). Wood density measurement protocol. Measuring wood density for tropical forest trees. A field manual for the CTFS sites. Lab. Evolution et Diversité Biologique Université Paul Sabatier. Toulouse, France. p. 7.
- Crespo, P. J., Feyen, J., Buytaert, W., Bücker, A., Breuer, L., Frede, H.G., Ramírez, M., (2011). Identifying controls of the rainfall-runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *J. Hydrol.* 407, 164–174.

- Cuatrecasas J. (1979). Growth forms of the Espeletiinae and their correlation to vegetation types of the high tropical Andes. En: Larsen K, Holm-Nielsen LB, Editores. *Tropical Botany*. New York: Academic Press. pp. 397–410.
- Cuesta, F., Báez, S., Muriel, P., & Salgado, S. (2014). La vegetación de los páramos del Ecuador. En: Cuesta F, Sevink J, & Llambí L.D, De Bièvre B, Posner J, Editores. *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos*, CONDESAN.
- Everaerts, J. (2008). The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for remote sensing and mapping. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII(B1), 1187-1192. Recuperado el 15 de mayo del 2018 de: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/203.pdf.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1993). *Evaluación de los recursos forestales 1990 Países tropicales Evaluación de los recursos forestales*. Roma. FAO.
- García, J. L., & Martínez, M. J. (2014). *Biomasa y Biotecnología*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- Gasparri, I., Manghi, E., Montenegro, I., Parmuchi, L., Bono, L., & Strada, G. (2004). Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales Argentinas. Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal. Dirección de Bosques. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Argentina. p. 29.
- Goetz, S., & Dubayah, R. (2011). Advances in remote sensing technology and implications for measuring and monitoring forest carbon stocks and change. *Carbon Management*, 2(3), 231-244.
- González, A., & De Miguel, S. (2007). Aplicaciones de la teledetección en España en el contexto del protocolo de Kyoto. *Revista de Teledetección* 28, 106-112.
- González, M. (2008). Estimación de biomasa aérea. Recuperado el 15 de mayo del 2018 de: CATIE: <http://orton.catie.ac.cr/REPDOC/A2922E/A2922E.PDF>
- Grupo Empresarial Energía y Celulosa. (2009). *El Valor de la Biomasa Forestal*. España.
- Houghton, R., Lawrence, K., Hackler, J., & Brown, S. (2001). The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. *Global Change Biology* 7, 731-746.
- Huxley, J., Strauss, R. E., & Churchill, F. B. (1993). *Problems of relative growth*. Intergovernmental Panel on Climate Change. New York.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., and Tanabe K. (eds). Publicado por: IGES, Japón. pp. 1-25.

- Jacanamejoy, G. M. (2012). Pueblos indígenas, territorio y desarrollo sostenible. Comité especial de la CEPAL sobre población y desarrollo. Quito, Ecuador. pp. 18-25.
- Jorgensen, P. M., & Ulloa, U. (1994). Seed plants of the high Andes of Ecuador: a checklist. Dinamarca. p. 34.
- Lara, M. C. P., & Timoté, J. J. D. (2010). estimación del carbono contenido en la biomasa forestal aérea de dos bosques andinos en los departamentos de Santander y Cundinamarca.
- Luteyn, J. L. (1992). Páramos: why study them? In: Balslev, H., Luteyn, J. L. (Eds.), Páramo: an Andean ecosystem under human influence. Academic Press, London. pp. 1-14.
- Llambí L. D. (2012). Ecología, hidrología y suelos de páramos. Proyecto Páramo Andino. Ecuador. pp. 1-28.
- Ministerio del Ambiente Ecuador. (2006). Plan gerencial Reserva de Producción Faunística de Chimborazo. Riobamba: MAE.
- Ministerio del Ambiente Ecuador. (2007). Políticas y Plan Estratégico del Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador 2007-2016. Informe Final de Consultoría. Proyecto GEF: Ecuador Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP-GEF). REGAL-ECOLEX, Quito, Ecuador.
- Ministerio del Ambiente Ecuador. (2008). Proyecto Socio Bosque. Mapa de Priorización Geográfica. Memoria Técnica. MT-PSB-001. Ministerio del Ambiente del Ecuador. Quito, Ecuador: MAE.
- Ministerio del Ambiente Ecuador. (2010). Consultoría para la Elaboración del Mapa Preliminar de Bosques del Ecuador Continental, con Énfasis en Cuantificación de Depósitos de Carbono. MAE, Quito, Ecuador.
- Malcolm, J. R., Liu, C., Neilson, R. P., Hansen, L., & Hannah, L. E. E. (2006). Global warming and extinctions of endemic species from biodiversity hotspots. *Conservation biology*, 20(2), 538-548.
- Mancheno, A. (2011). Análisis de los impactos en la calidad del suelo causados por el Pino (*Pinus patula*) en comparación con el suelo ocupado por *Polylepis (Polylepis reticulata)* en el Parque Nacional Cajas. Cuenca, Azuay, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Manrique, S., Franco, J., Nuñez, V., & Seghezzi, L. (2009). Stock de biomasa y carbono en una zona del chaco occidental en el Municipio Coronel Moldes, la Viña, Salta.
- Marcus, R. (2014). Personal UAV Systems For Photography, Surveillance and More. Recuperado el 20 de septiembre de 2018 de: <http://www.marcusuav.com/>
- Martín, A., Perez, J., Cabello, F., de la Riva Fernández, J., Puigdevall, J., & Herranz, E. (2006). Estimación de la biomasa residual forestal mediante técnicas de

- teledetección y SIG en masas puras de *Pinus halepensis* y *P. sylvestris*. Montesinos, A. Fernández, F. (Eds.), Teledetección Agua y desarrollo sostenible. Asociación Española de Teledetección, España. pp. 345-348.
- Mena, P., Hofstede, R. (2006). Los páramos ecuatorianos. Botánica económica de los Andes Centrales. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz.
- Montes, N., Gauquelin, T., Badri, W., Bertaudiere, V., & Zaoui, E. (2000). A non-destructive method for estimating above-ground forest biomass in threatened woodlands. *Forest Ecology and Management* 130, 37-46.
- Neches Olaso, R. (2011, abril). Energías Renovables - Análisis y diagnóstico - La Biomasa, usos y aplicaciones. (Editorial Agrícola Española, Ed.). *Agricultura*, (939), 266–269.
- Neitzel, F., & Klonowski, J. (2011). Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII, 1–6. Recuperado el 22 de septiembre del 2018 de: http://143.93.114.105/sites/default/files/public/data/uav-g_neitzel_klonowski.pdf
- Nex, F., & Remondino, F. (2013). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1-15. Recuperado el 5 de mayo del 2019 de: <http://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Orrego, J., Del Valle, J., & Moreno, F. (2003). En medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia. (Eds.) Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Pearson, T., Walker S., & Brown, S. (2005). Sourcebook for land use, land-use change and forestry projects. Winrock International and the BioCarbon Fund of the World Bank. p. 64.
- 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. Ginebra. p. 628.
- Puerto Lara, A. E. (2017) Clasificación y cuantificación de maleza en cultivos de hortalizas por medio de procesamiento de imágenes digitales multiespectrales (Tesis de posgrado. Magister en Ingeniería Electrónica). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Rodriguez, R., Jimenez, J., Aguirre, O., & Treviño, E. (2006). Estimación del carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México: *CIENCIA UANL* 9, 179.

- Rodríguez Vásquez de Aldana, B., García Criado, B., García Ciudad, A., & Zabalgogezcoa, I. (2012). Biomasa y cultivo de la colza. *Energía Sostenible Para Todos*. pp. 1–5
- Romoleroux, K. (2000). I Congreso Internacional de Ecología y Conservación de Bosques de Polylepis. Resúmenes. Cochabamba, Bolivia.
- Romoleroux, K., Cárate, D., & Erler, R. (2008). Los Bosques olvidados de los Andes. *Nuestra Ciencia*. Cochabamba. pp. 34-37.
- Rumpler, M., Wendel, A. & Bischof, H. (2013). Probabilistic Range Image Integration for DSM and True-Orthophoto Generation. En: J.-K. Kämäräinen y M. Koskela (eds.). *Image Analysis* (pp. 533–544). Espoo, Finlandia: Springer Berlin Heidelberg. Recuperado el 5 de octubre del 2018 de: http://doi.org/10.1007/978-3-642-38886-6_50
- Schlegel, B. (2001). Estimación de la biomasa y del carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. *Simpisio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*, Valdivia, Chile
- Segura, M., & Kanninen, M. (2005). Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica: *Biotropica* 37: 2-8.
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2017). El Plan Nacional de Desarrollo (denominado “Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021.Toda una Vida”). Quito: SENPLADES
- Shoji, S., Nanzyo, M., & Dahlgren, R., (1993). *Volcanic Ash Soils: Genesis, Properties and Utilisation*. *Developments in Soil Science*, vol. 21. Elsevier, Amsterdam.
- Sierra, R. (Ed.). (1999). Propuesta preliminar de un sistema de clasificación de vegetación para el Ecuador continental. Proyecto INEFAN/GEF-BIRF y EcoCiencia. Quito, Ecuador: Rimana.
- Sinfuentes, V. (2015). Carbono almacenado y capturado en la biomasa aérea. Recuperado el 21 de mayo del 2018 de: UNAS:http://www.unas.edu.pe/web/sites/default/files/web/archivos/actividades_academicas/CARBONO%20FINAL.pdf
- Streck, C., & Scholz, S. M. (2006). Journal Compilation. Blackwell Publishing Ltd/The Royal Institute of International Aff airs. *International Aff airs* 82: 5 (2006) 861–879. Recuperado el 25 de mayo del 2018 de: <http://dspace.cigilibrary.org/jspui/bitstream/123456789/19664/1/The%20role%20of%20forests%20in%20global%20climate%20change%20whence%20we%20come%20and%20where%20we%20go.pdf?1>
- Terán, J., Dauber, E., & Guzmán, R. (1992). Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1, 1–10.

- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2006). Defines a sink as ‘any process, activity or mechanism which removes a greenhouse gas, an aerosol or a precursor of a greenhouse gas from the atmosphere’ (art. 1.8)
- Tobón, C. (2009). Los Bosques Andinos y el Agua. Serie Investigación y Sistematización 04. Programa Regional ECOBONA – INTERCOOPERATION, CONDESAN, Quito, Ecuador. p. 122.
- Torres, S., & Cadena, C. (2016). Calibración de Ecuaciones alométricas para *Polyepis incana* y *Polylepis reticulata*. Quito: FONAG.
- Vararey, F. (2015). Coeficiente de Correlación Lineal de Pearson. Recuperado el 15 de junio del 2019 de: <https://personal.us.es/vararey/adatos2/correlación.pdf>
- Vidal, A., Benítez, J., Rodríguez, J., Carlos, R., & Gra, H. (2001). Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la EFI La Palma de la provincia de Pinar del Río, Cuba. *Quebracho* 11: 60-66.
- Zapata, M., Colorado, G., & del Valle, J. (2003). Ecuaciones de biomasa aérea para bosques primarios intervenidos y secundarios. En medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia. Orrego, J. del Valle, J. & Moreno, F. (Eds.) Universidad Nacional de Colombia. Medellín
- Zhicay, J. (2016). Determinación de los servicios ecosistémicos que suministra la Reserva de Producción de fauna chimborazo. Recuperado el 15 de mayo del 2018, de: <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/5438/1/23T0572.pdf>
- Zianis D., & Mencuccini, M. (2004). On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management* 187, 311-332.

XIII. ANEXOS

Anexo 1. Fotografías de las salidas de campo para la toma de datos (Diámetro de Copa)

