



**“Estimación del valor económico del carbono almacenado en la biomasa total del Área Protegida
“Cordillera Oriental del Carchi” mediante RADAR y análisis geoestadístico de las características físico-
químicas del suelo.”**

García Mancero, Carolina Estefanía y Suquillo Cocanguilla, Christopher Emanuel

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente

Dr. Rodríguez Espinosa, Fabián Francisco

4 de Agosto del 2022



TESIS_FINAL_1.pdf

Scanned on: 20:2 August 1, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	229
Words with Minor Changes	125
Paraphrased Words	202
Omitted Words	3342

Firma:



Firma electrónica por:
FABIAN FRANCISCO
RODRIGUEZ
ESPINOSA

Dr. Rodríguez Espinosa, Fabián Francisco

C. C: 1706853759



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, "Estimación del valor económico del carbono almacenado en la biomasa total del Área Protegida "Cordillera Oriental del Carchi" mediante RADAR y análisis geoestadístico de las características físico-químicas del suelo." Fue realizado por la señorita García Mancero Carolina Estefanía y el señor Suquillo Cocanguilla Christopher Emanuel el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; por lo tanto, cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 2 de Agosto del 2022

Firma:



Forma de autenticación por:
FABIAN FRANCISCO
RODRIGUEZ
ESPINOSA

Dr. Rodríguez Espinosa, Fabián Francisco

C. C: 1706853759



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **García Mancero Carolina Estefanía** con cédula de ciudadanía No. 1725135618 y **Suquillo Cocanguilla Christopher Emanuel** con cédula de ciudadanía No. 1723404115, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Estimación del valor económico del carbono almacenado en la biomasa total del Área Protegida “Cordillera Oriental del Carchi” mediante RADAR y análisis geoestadístico de las características físico-químicas del suelo.”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 2 de Agosto del 2022



García Mancero, Carolina Estefanía
CC. 1725135618



Suquillo Cocanguilla Christopher Emanuel
CC. 1723404115



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Autorización de Publicación

Nosotros, **García Mancero Carolina Estefanía** con cédula de ciudadanía No. 1725135618 y **Suquillo Cocanguilla Christopher Emanuel** con cédula de ciudadanía No. 1723404115, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Estimación del valor económico del carbono almacenado en la biomasa total del Área Protegida “Cordillera Oriental del Carchi” mediante RADAR y análisis geoestadístico de las características físico-químicas del suelo.”** En el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 2 de Agosto del 2022

García Mancero, Carolina Estefanía
CC. 1725135618

Suquillo Cocanguilla, Christopher Emanuel
CC. 1723404115

Dedicatoria

Para Dios y la Virgen del Buen Suceso, por haberme elegido como su siervo.

Para mis padres, quienes han sido mis maestros de vida.

Para mi abuelita Esther, mi angelita del cielo.

Para mis hermanos, que han sido mi soporte.

Para mis cuñadas, quienes son mis hermanas.

Para mis sobrinitos, que, con su sonrisa, iluminan mi camino.

Para mis tíos y primos, que, con sus locuras, alegran mi corazón.

Para mis amigos y amigas, que con ellos encontré una familia.

Para mis queridos profesores, que me brindaron su apoyo incondicional en toda mi vida académica.

Para el GAD parroquial rural Fernández Salvador, sin su ayuda y disposición este proyecto no habría sido posible.

Para mis perritos, con quienes encontré un refugio.

Esto es posible gracias a ustedes.

Carolina

Dedicatoria

Quiero dedicar mi esfuerzo y dedicación en toda mi carrera universitaria a mi madre que supo guiarme y sacarme adelante, a mis hermanas, sobrinas, tíos, primos, abuelitos y amigos, por sus consejos, apoyo y paciencia, lo logrado y lo que aún falta, es gracias a ellos. Finalmente, a mis mascotas, que, sin decir una palabra, me brindaron su compañía en largas noche de estudio.

Christopher

Agradecimiento

En particular, considero que plasmar en papel todas las emociones y pensamientos, es darle fin a una época e iniciar una nueva historia. Es una locura haber llegado hasta esta instancia, por un momento pensé que no lo lograría, pero aquí estamos con un nudo en la garganta, por todos los recuerdos, por las aventuras y por el agradecimiento a: A Dios y la Virgen del Buen Suceso, por brindarme su amor y vida. A mis padres, Bachita y Vicente, por ser mis maestros, mi espejo, por nunca dejarme a pesar de mis errores, por enseñarme a valorar los pequeños detalles y ser mi ejemplo de amor incondicional. A mi abuelita Esther, porque sé que desde el cielo me cuida y por ella sé que los ángeles existen. A mis hermanos, Vicente y Diego, son ellos que me enseñaron a creer en mí, a ser auténtica, a que los sueños si se cumplen, a entender que “Ni el cielo es el límite” y sobre todo por brindarme claridad en cada momento de incertidumbre. A mis cuñadas, Pao y Pauli, quienes son mis hermanas de corazón y me brindaron el honor de ser tía de Fernando y Martin. A mis tíos y primos, es hermoso tener una familia con un corazón tan alegre y noble. A mis amigos y amigas, por convertirse en mi familia, por haber compartido noches de desvelo, consejos, enojos, farras inolvidables y campamentos. Sin duda la vida es mejor con amigos. A mis queridos profesores, en especial al Dr. Fabián Rodríguez y al Dr. Izar Sinde, quienes se han convertido en mis amigos, gracias a ustedes por brindarnos su tiempo, conocimiento y entrega en este proyecto. A mi querida ESPE, es un honor haber cursado las aulas de esta noble institución. A la carrera de INGENIERIA GEOGRAFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE, aún recuerdo cuando mi hermano me decía que estaba por entrar a la mejor carrera de la ESPE, no se equivocó. Al GAD Parroquial Fernández Salvador, por su predisposición para la realización de este proyecto, por brindarnos la oportunidad de investigar dentro de su territorio y sobre todo otorgarnos el apoyo logístico.

Carolina

Agradecimiento

Agradezco:

A mi madre y hermanas por el apoyo, y confianza depositada en mí.

A mis amigos de vida, que me brindaron sus consejos, apoyo y fortaleza, en momentos de angustia.

A mis amigos universitarios, que entre risas y alegría nos fuimos formando como profesionales.

Además, mis agradecimientos a los docentes que nos apoyaron en la realización de este trabajo: Dr. Rodríguez Fabián y Dr. Izar Sinde, por sus ideas, orientación, asesoramiento y seguimiento en la investigación, así mismo, a Esther Guascal, quién nos brindó su ayuda en parte de la metodología del tema de investigación.

Al GAD Parroquial Fernández Salvador, que nos dió la confianza para trabajar en su territorio a favor de la conservación del área protegida.

Finalmente, a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, que fue quién me formó como profesional de excelencia.

Christopher

Índice de contenidos

Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria	6
Dedicatoria	7
Agradecimiento	8
Agradecimiento	9
Índice de contenidos	10
Índice de tablas	12
Índice de figuras	14
Resumen	16
Abstract	17
Capítulo I	18
Generalidades	18
Antecedentes	18
Planteamiento del Problema.....	22
Objetivos	24
Objetivo General.....	24
Objetivos específicos	24
Metas del proyecto	24
Capítulo II	26

	11
Marco Teórico	26
Base teórica	26
Base Conceptual	29
Base legal	33
Capítulo III	34
Metodología	34
Descripción del área de estudio	34
Metodología de desarrollo de proyecto.	36
Estimación de biomasa Aérea por alometría	42
Estimación de biomasa Aérea por imagen Radar	46
Estimación de biomasa en suelo	51
Estimación del valor económico.....	60
Diseño de las bases para la propuesta de política pública.....	60
Capítulo IV	61
Resultados	61
Estimación de biomasa aérea	62
Estimación de biomasa en suelo	76
Predicción de carbono orgánico vs plataforma Soil Grids	89
Estimación del valor económico.....	90
Diseño de las bases para la propuesta de política pública.....	90
Capítulo V	93
Conclusiones	93
Recomendaciones	96
Referencias Bibliográficas	99

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Características de los transectos</i>	40
Tabla 2 <i>Densidades de las especies arbóreas</i>	44
Tabla 3 <i>Cálculos de biomasa por parcela</i>	45
Tabla 4 <i>Características del sensor Palsar del satélite Alos</i>	48
Tabla 5 <i>Interpretación del r de correlación lineal (Pearson)</i>	58
Tabla 6 <i>Estimación de biomasa por alometría en el ecosistema bosque siempreverde</i>	63
Tabla 7 <i>Estimación de biomasa por alometría en el ecosistema páramo</i>	64
Tabla 8 <i>Coeficientes obtenidos para el ecosistema bosque siempreverde</i>	66
Tabla 9 <i>Coeficientes obtenidos para el ecosistema páramo</i>	66
Tabla 10 <i>Análisis ANOVA en el ecosistema bosque siempreverde</i>	67
Tabla 11 <i>Análisis ANOVA en el ecosistema páramo</i>	67
Tabla 12 <i>Estimación de biomasa mediante imagen radar en el ecosistema bosque siempreverde</i>	68
Tabla 13 <i>Mapa de estimación de biomasa aérea mediante radar en el ecosistema páramo</i>	69
Tabla 14 <i>Resultados de biomasa aérea mediante los dos métodos de estudio</i>	71
Tabla 15 <i>Prueba t para medias de dos muestras emparejadas del ecosistema bosque siempreverde</i> ..	73
Tabla 16 <i>Tabla de aceptación o rechazo de la prueba de hipótesis t student</i>	74
Tabla 17 <i>Prueba t para medias de dos muestras emparejadas del ecosistema páramo</i>	75
Tabla 18 <i>Tabla de aceptación o rechazo de la prueba de hipótesis t student</i>	76
Tabla 19 <i>Resumen estadístico porcentaje de carbono orgánico (%)</i>	77
Tabla 20 <i>Parámetros de estructura básica- carbono orgánico (%)</i>	80

Tabla 21 Estimación de biomasa en suelo por ecosistema	84
Tabla 22 Estimación de carbono almacenado en suelo por ecosistema	84
Tabla 23 Resumen estadístico error modelo-carbono orgánico (g/kg).....	86
Tabla 24 Error medio (ME) y error cuadrático medio (MSE)	87
Tabla 25 Prueba de hipótesis Chi cuadrado de la predicción de carbono orgánico tomado en campo vs plataforma Soil Grids	89
Tabla 26 Carbono total y CO₂.....	89
Tabla 27 Valoración económica del CO₂ total almacenado.....	90
Tabla 28 Análisis de propuesta de política pública.....	91

Índice de figuras

Figura 1 <i>Área de estudio en el área protegida “Cordillera Oriental del Carchi”</i>	35
Figura 2 <i>Metodología general del proyecto</i>	37
Figura 3 <i>Área de estudio</i>	38
Figura 4 <i>Diseño de muestreo (transectos)</i>	41
Figura 5 <i>Ejemplo de transecto variable</i>	42
Figura 6 <i>Metodología para la estimación de biomasa aérea por alometría</i>	43
Figura 7 <i>Metodología para la estimación de Biomasa aérea por imagen radar</i>	47
Figura 8 <i>Diseño de muestreo (puntos aleatorios)</i>	52
Figura 9 <i>Metodología para la Estimación de Biomasa en suelo mediante herramientas geoestadísticas</i>	53
Figura 10 <i>Semivariograma para un fenómeno estacionario de segundo orden</i>	55
Figura 11 <i>Delimitación de 3,74 km del área natural</i>	62
Figura 12 <i>Proceso de corrección de imagen radar</i>	65
Figura 13 <i>Mapa de estimación de biomasa mediante imagen radar</i>	70
Figura 14 <i>Diagrama de dispersión del ecosistema bosque siempreverde</i>	73
Figura 15 <i>Diagrama de dispersión del ecosistema Páramo</i>	75
Figura 16 <i>Histograma de carbono orgánico (%)</i>	77
Figura 17 <i>Gráfico de dispersión este-carbono orgánico (%)</i>	78
Figura 18 <i>Gráfico de dispersión norte- carbono orgánico (%)</i>	78
Figura 19 <i>Semivariograma experimental omnidireccional- carbono orgánico (%)</i>	80

Figura 20 Semivariograma teórico omnidireccional- carbono orgánico (%)	81
Figura 21 Histograma de validación cruzada- carbono orgánico (%)	82
Figura 22 Estimación de biomasa en suelo	83
Figura 23 Puntos de validación- carbono orgánico (%)	85
Figura 24 Histograma error modelo- carbono orgánico (%)	86
Figura 25 Diagrama de dispersión de la predicción de carbono orgánico tomado en campo vs plataforma Soil Grids	88

Resumen

En un cuadro general de segregación del área urbana y pobreza del área rural, en el que las alternativas de vida son escasas, es comprensible la necesidad de aumentar los recursos de consumo para la población (Boada *et al.*, 2008). El área protegida “Cordillera Oriental del Carchi” se ha visto influenciada por el avance de la frontera agrícola en las periferias, perteneciente a la parroquia rural Fernández Salvador. En consecuencia, puede ocasionar pérdidas de fuentes de agua y carbono orgánico almacenado, afectando al ecosistema Páramo y Bosque Siempreverde Montano Alto. Por lo que el objetivo de este proyecto es estimar el valor económico del servicio de almacenamiento de carbono en la biomasa aérea y biomasa de suelo mediante el uso de imágenes RADAR, validadas a través de datos dasométricos obtenidos en campo y el modelamiento geoestadístico del carbono orgánico del suelo, que sirva como insumo para generación de propuestas de conservación en el Área Protegida “Cordillera Oriental del Carchi”- Provincia del Carchi, en el cuál se estableció un área de estudio de 162,4 ha. Obteniendo 3 transectos con un total de 32 muestreos para la estimación de biomasa aérea por alometría y Radar, además, se extrajo 52 muestras de suelo para estimación de biomasa del suelo, indicando la biomasa total del área protegida. Posteriormente, se determinó que el CO₂ en suelo es mayor al CO₂ aéreo, con valores de 63422,9 (tn/ha) y 10081,8 (tn/ha), respectivamente. Así mismo, se calculó un valor económico de \$25726,65 para toda el área de estudio. Finalmente, se diseñó las bases para una propuesta de política pública para conservación del área protegida. Este proyecto ha permitido emplear distintas metodologías en el análisis de la estimación del carbono total, para el análisis de la estimación de los bienes y servicios de un área protegida, además de evidenciar las problemáticas y posibles soluciones que podemos brindar a las parroquias que contienen un área protegida dentro de sus territorios, y desconocen los beneficios que las mismas les pueden aportar.

Palabras clave: biomasa, carbono, CO₂, Radar, Geoestadística.

Abstract

In an overall picture of segregation of the urban area and poverty in the rural area, in which there are few alternatives for living, the need to increase consumption resources for the population is understandable (Boada et al., 2008). The protected area "Cordillera Oriental del Carchi" has been influenced by the advance of the agricultural frontier in the peripheries, belonging to the rural parish Fernández Salvador. Consequently, it can cause losses of water sources and stored organic carbon, affecting the Páramo and Bosque Siempreverde Montano Alto ecosystems. Therefore, the objective of this project is to estimate the economic value of the carbon storage service in the aerial biomass and soil biomass through the use of RADAR images, validated through dasometric data obtained in the field and geostatistical modeling of soil organic carbon, which serves as input for the generation of conservation proposals in the Protected Area "Cordillera Oriental del Carchi" - Carchi Province, in which a study area of 162.4 ha was established. Three transects were obtained with a total of 32 samples for the estimation of aerial biomass by allometry and radar. In addition, 52 soil samples were extracted for the estimation of soil biomass, indicating the total biomass of the protected area. Subsequently, it was determined that soil CO₂ is greater than aerial CO₂, with values of 63422,9 (tn/ha) and 10081,8 (tn/ha), respectively. Likewise, an economic value of \$25726.65 was calculated for the entire study area. Finally, the basis for a public policy proposal for the conservation of the protected area was designed. This project has allowed the use of different methodologies in the analysis of the estimation of total carbon, for the analysis of the estimation of the goods and services of a protected area, in addition to highlighting the problems and possible solutions that we can provide to the parishes that contain a protected area within their territories, and are unaware of the benefits that these areas can bring them.

Key words: biomass, carbon, CO₂, Radar, Geostatistics.

Capítulo I

Generalidades

Antecedentes

La palabra ecosistema, parte desde una perspectiva antropocéntrica en la cual los ecosistemas son identificados como fuentes de recursos naturales (Martín & Montes, 2010), es decir son aquellos que cuentan integridad ecológica y se adaptan con facilidad al cambio, siendo capaces de proveer bienes y servicios que satisfagan a la sociedad (de Groot *et al.*, 2002).

Si bien es cierto se menciona que la presencia de ecosistemas son fundamentales para mantener el equilibrio ambiental en la tierra, sin embargo en los últimos 50 años el deterioro del medio ambiente ha aumentado considerablemente (Rodríguez *et al.*, 2012), atribuyéndolo a factores de origen natural y principalmente a las actividades humanas (agricultura, ganadería, evolución demográfica, industria, entre otras.) que alteran la estructura de la atmosfera y la corteza terrestre, ocasionando cambios en la capacidad y uso de suelo, desencadenando un aumento en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) entre los que se destacan dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua, metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (NO_x), además de muchos aerosoles (IPCC, 2007) y como consecuencia se produce un desequilibrio de los balances energéticos de todo el sistema climático, manifestando cambios en la temperatura, precipitaciones, elevación del nivel del mar, desertificación, todo ello ha determinado el cambio climático antropogénico, afectando a la soberanía alimentaria, salud, asentamientos humanos y sobre todo a los ecosistemas y su biodiversidad, dentro de los cuales se encuentran ecosistemas que son sensibles al cambio climático (Useros, 2013), como es el caso del páramo, el mismo que ha sido intervenido por el ser humano para realizar actividades agroproductivas, ocasionando vulnerabilidad en sus suelos y por ende en todo el ecosistema (Hansen & Defries, 2007).

Los páramos en el Ecuador se encuentran en 14 áreas naturales dentro del SNAP (Sistema Nacional de Áreas Protegidas) (Mena *et al.*, 2011) cubriendo alrededor de 1 250 000 ha, representando un 6 % de la superficie territorial, donde se puede mencionar una variedad de funciones, pero se destaca dos funciones principales (Mena & Hofstede, 2006): 1) La función ecológica, que despierta un gran interés científico, destacando su flora endémica y el paisaje único. 2) La función hidrológica es probablemente la más importante, ya que se refiere a los páramos como “fábricas de agua” o, “esponjas” para el almacenamiento de agua, son la fuente de agua potable para la mayoría de la población de la parte norte de los Andes, en países como: Ecuador, Perú y Colombia (Estupiñán, 2001). En Ecuador, la población que se beneficia de este ecosistema son principalmente las comunidades rurales, asimismo dependen de los bosques andinos como el Polylepis, esto con lleva un notable incremento en la presión sobre los recursos naturales, estimando que más del 80% de los ecosistemas de alta montaña han desaparecido, destacando el páramo como uno de los ecosistemas con mayor fragilidad (Hofstede *et al.*, 2002; Henderson *et al.*, 1991). En tal necesidad se creó una mancomunidad formada por 11 provincias (Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo, Bolívar, Carchi, Imbabura, Pichincha, Napo, Pastaza, Cañar y Azuay) con el objetivo de cuidar el agua en los páramos a través de la creación de corredores ecológicos que eviten el avance de la frontera agrícola y otras actividades que se realicen dentro de los ecosistemas vulnerables (El Comercio, 2018).

Otro de los ecosistemas afectados son los Bosques Siempreverde Montano Alto, estos bosque se caracterizan por su abundante biodiversidad y sus sumideros de carbono (Ureta, 2015). Los bosques montanos albergan una excelente diversidad florística y biológica (Kvist *et al.*, 2006). Los bosques Siempreverde Montano Alto de los Andes Orientales representan un 3,1 % de los bosques del Ecuador, el mismo que registra una tasa de deforestación alta, con una deforestación bruta de 1 745 hectáreas (Sierra *et al.*, 2021).

Por lo expuesto anteriormente, distintos países en búsqueda de proteger sus ecosistemas y los bienes y servicios ambientales que brindan, empiezan a crear espacios con actividades específicas, así surge la palabra francesa “*parc*” que menciona a un área cerrada para cazar animales silvestres, la misma que fue destinada para la nobleza. En 1842 se fundó el primer parque público de la era moderna fue Victoria Park en Gran Bretaña. En América del norte nace el concepto de parque nacional, cuyos propósitos incluirían la protección de la naturaleza, así como el acceso al público. En 1864 se creó el primer parque nacional del mundo fue Parque Nacional Yosemite en California, sin embargo la terminología de parque nacional fue utilizado oficialmente en 1872 con el establecimiento del Parque Nacional Yellowstone (Botkin & Keller, 2011), si bien es cierto en un inicio estas áreas fueron destinadas para actividades recreativas, más tarde en el Congreso de Durban en 2003 se reconoce el papel de las áreas protegidas en el desarrollo sostenible y la necesidad de conservar estos espacios por la riqueza de especies o por la belleza natural de los paisajes, tomando en cuenta a las comunidades locales y su participación en las decisiones que les afecten (Paredes, 2016; Hansen & Defries, 2007). En las últimas décadas, muchas regiones del mundo intentan evaluar la resiliencia de las áreas protegidas ante los cambios del uso de la tierra (Effantin & Gramajo, 2002), a través de comprender los mecanismos de cambios o mitigación (Ashley *et al.*, 2006).

El Ecuador en su respuesta ante las corrientes mundiales, en 1959, crea el Parque Nacional Galápagos y en 1998 se institucionaliza el SNAP (Sistema Nacional de Áreas Protegidas), con el fin de conservar la biodiversidad y el mantenimiento de los servicios ecológicos (MAE, 2013). Desde 2019 hasta el presente año, el Ecuador cuenta con 18 401 927 ha de áreas protegidas que representa el 13,64 % del territorio, contabilizando 59 áreas protegidas que conforma el SNAP (MAE, 2019b). Esta investigación se basa fundamentalmente en el área protegida “Cordillera Oriental del Carchi”, la cual fue establecida en 2019 mediante el Acuerdo Ministerial N0. 055 a la prefectura del Carchi, incorporando 20 439,79 ha de bosque de ceja de montaña y paramo al SNAP (MAE, 2019).

Asimismo, en los últimos años, se han ejecutado varios compromisos que se refieren al cuidado del medio ambiente, en particular la vinculación de Ecuador al acuerdo de París en el año 2016, reemplazando al Protocolo de Kioto, con esto el Estado Ecuatoriano se suma a los 175 países del mundo que han firmado dicho acuerdo y se han comprometido con la protección ambiental. Para el Ecuador representa un punto de partida para la generación de energía limpia que sirva como estrategia en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (MAE, 2016). Por lo tanto nace la necesidad de cuidar los ecosistemas y sus recursos naturales, es así que surge el término de economía ambiental, la misma que brinda un valor económico a los bienes y servicios ambientales que los ecosistemas ofrecen a los seres humanos a través de diferentes métodos de valoración, que pueden ser sumados, con el objetivo de determinar un valor económico total del área a estudiar (Astudillo, 2019; Lomas, 2015). Por tanto el empleo de nuevas tecnologías geoespaciales para identificar el carbono almacenado en la cobertura forestal y de suelo, son indispensables como el uso de: 1) Teledetección remota, en la actualidad, las estimaciones de biomasa se obtienen mediante relaciones alométricas derivadas de inventarios forestales, cuyos datos a nivel local son precisos, pero su falta de actualización es insuficiente para la estimación de biomasa a nivel regional según los requerimientos de gestión medioambiental (Méndez *et al.*, 1999). Por lo que, ha incrementado el interés en las aplicaciones forestales de los datos RADAR de apertura sintética (SAR-Synthetic Aperture Radar) (Réjou *et al.*, 2014), esta técnica puede proveer información de mayor extensión en relación a la estructura del árbol y así obtener la biomasa aérea (Quijano & Morales, 2016), también se puede aplicar sólo el método tradicional (campo), con la obtención de datos dasométricos, de esta forma se puede validar la información calculada anteriormente (Chou *et al.*, 2013); 2) Análisis geoestadístico, algunos autores mencionan que la distribución espacial del carbono orgánico del suelo (COS) es importante para el desarrollo de modelos del comportamiento del carbono en los ecosistemas (Zhang *et al.*, 2020; Peng *et al.*, 2013). El suelo se considera uno de los elementos que se encuentra en constante cambio, debido a

los impactos generados por actividades antrópicas, por lo que es importante dar prioridad al estudio del almacenamiento de carbono en suelo con el cálculo de su biomasa (Ibrahim et al., 2006), mediante la extracción de muestras de suelo y el posterior análisis en laboratorio del porcentaje de carbono orgánico (Carvajal *et al.*, 2009). También es fundamental realizar el análisis del carbono almacenado en el bosque y así obtener la biomasa total del ecosistema (Macías *et al.*, 2017; Cano *et al.*, 2020), para su correspondiente valoración económica y determinación del porque es importante conservar las áreas protegidas, sus bienes y servicios ambientales (Álvares, 2015).

La presente investigación se enmarca dentro del objetivo 15: Vida de ecosistemas terrestres de la ODS, al tratarse del estudio de dos ecosistemas, mediante la estimación del valor económico del carbono almacenado en la biomasa aérea y biomasa en suelo del Área Protegida “Cordillera Oriental del Carchi” (Secretaría Nacional de Planificación, 2021).

Planteamiento del Problema

En un cuadro general de segregación del área urbana y pobreza del área rural, en el que las alternativas de vida son escasas, es comprensible la necesidad de aumentar los recursos de consumo para la población (Boada *et al.*, 2008). Sin embargo, el gobierno parroquial rural en preocupación para conservar los beneficios que tiene el área natural como: sus fuentes de reservorio de agua y el reservorio natural de carbono invierte parte de su presupuesto, en donde, según (GAD PARROQUIAL, 2019; CONDESAN, 2018) el GAD parroquial debe aportar con un onceavo del 5 % en el financiamiento del área de conservación, correspondiente al aporte de los 11 gobiernos parroquiales de los diferentes cantones que conforman dicha área. Sin embargo, esta iniciativa no es suficiente, siendo necesario dar a conocer que se necesita mayor aporte económico y acuerdos de manejo ambiental sobre el área protegida junto al GAD parroquial, que salvaguarden la integridad ecológica, así también, la creación o modificación de políticas públicas que apoyen al manejo del área protegida.

El área protegida “Cordillera Oriental del Carchi” se ha visto influenciada por el avance de la frontera agrícola en las periferias, perteneciente a la parroquia rural Fernández Salvador, según el (Gobierno Autónomo Descentralizado Montufar, 2019) para inicios del 2019 la aptitud agrícola de la parroquia fueron de 300 hectáreas, y según datos del (GAD Parroquial Fernández Salvador, 2020) para el siguiente año el número de hectáreas aumentó a 301. Esto ha apoyado la fragmentación y deterioro de los ecosistemas andinos produciendo evidentes y alarmantes cambios en el ambiente, como la transformación del funcionamiento y la estructura de los sistemas ecológicos, incitando la pérdida de diversidad de flora o la denominada deforestación, además de verse inmerso el suelo en la misma contrariedad, perdiendo nutrientes naturales, provocando erosión y desertificación, siendo el caso de los tipos de ecosistemas en el páramo como: el de frailejones, el de pajonal, seco, superpáramo y áreas diferentes a páramo y los bosques altoandinos de las estribaciones nororientales que hospedan avifaunas montanas en el Ecuador dentro del área natural (Robbins *et al.*, 1994). Por ende, la pérdida de las fuentes de agua y carbono orgánico almacenada es predecible, ya que los páramos cuentan con el potencial hidrológico y el suelo actúa como reservorio de carbono, siendo la regulación de gases un servicio ambiental que se medirá a través del carbono almacenado en la vegetación y suelo.

La conservación de estos ecosistemas, derivan múltiples beneficios, por lo que, el gobierno mediante el Plan nacional de desarrollo creación de oportunidades 2021-2025, en el objetivo 11, da énfasis, para conservar, restaurar, proteger y hacer un uso sostenible de los recursos naturales, mediante una política, que impulsa el resguardo de los ecosistemas y su biodiversidad; así como, el patrimonio natural y genético nacional. Además, se relaciona con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y Metas de la Agenda 2030, mediante el objetivo 15: Vida de ecosistemas terrestres, el cuál propone en parte, asegurar la conservación, el restablecimiento y el uso sustentable de los ecosistemas terrestres e interiores de agua dulce y sus servicios, en particular los bosques (Secretaría Nacional de Planificación, 2021).

Objetivos

Objetivo General

Estimar el valor económico del servicio de almacenamiento de carbono en la biomasa aérea y biomasa de suelo mediante el uso de imágenes RADAR, validadas a través de datos dasométricos obtenidos en campo y el modelamiento geoestadístico del carbono orgánico del suelo, que sirva como insumo para generación de propuestas de conservación en el Área Protegida “Cordillera Oriental del Carchi”- Provincia del Carchi.

Objetivos específicos

- Analizar la situación actual del área a estudiar mediante la revisión bibliográfica y delimitación en campo.
- Estimar parámetros biométricos de la zona boscosa mediante el análisis de imágenes RADAR para determinar la fijación de carbono orgánico de la biomasa aérea.
- Desarrollar un modelamiento geoestadístico, a partir del análisis físico-químico del carbono orgánico del suelo de las muestras seleccionadas al azar para determinar la fijación del carbono orgánico.
- Evaluar los dos modelos de fijación de carbono generados mediante técnicas estadísticas que permitan asegurar su confiabilidad.
- Estimar el valor económico total del almacenamiento de carbono del bosque y del suelo de la zona de estudio.
- Diseñar las bases para una propuesta de política pública para conservación del área protegida.

Metas del proyecto

- Mapa de 32 puntos de muestreo de las parcelas del área de estudio para la determinación de biomasa aérea, en escala 1:11000.

- Mapa de puntos de muestreo de las parcelas del área de estudio para la determinación de biomasa en suelo, en escala 1:11000.
- Mapa de estimación de biomasa aérea, en escala 1:11000.
- Mapa de estimación de biomasa en suelo, en escala 1:11000.
- Un reporte estadístico del análisis de la comparación entre los datos dasométricos con la imagen RADAR de la estimación de biomasa aérea.
- Un reporte estadístico del análisis de comportamiento de carbono orgánico en el suelo.
- Una Base de datos dasométricos adquiridos en campo.
- Una Base de datos de la información geográfica en formato raster y vector.
- Una base de datos del parámetro físico-químico de las muestras de carbono orgánico tomadas en el área protegida “Cordillera Oriental del Carchi”.
- Valoración de la biomasa total del área protegida.
- Diseño de las bases para la creación de política pública, para la conservación del área protegida “Cordillera Oriental del Carchi”.

Capítulo II

Marco Teórico

Base teórica

Para muchos políticos, economistas y población en general. Los ecosistemas son una fuente inagotable de recursos naturales, donde se lleva a cabo actividades productivas (agricultura, pesca y ganadería, etc.), de construcción y extracción (madera, petróleo, etc.), también se consideró como un espacio donde se puede verter contaminantes sólidos, líquidos o gaseosos (Challenger, 2001), contribuyendo al aumento de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO₂). Según Valdés (2010) (citado en Astudillo, 2019), el ecosistema está conformado por tres grupos: 1) Ecosistema acuático: es donde los seres vivos habitan en mares, ríos, lagos, arroyos u océanos; 2) Ecosistema terrestre: en el cual los seres vivos como fauna y flora viven en el suelo en hábitats como: bosque, paramo, selva; 3) Ecosistema mixto: es aquel donde los seres vivos interactúan en zonas con el ecosistema acuático y terrestre (costa o humedales), es decir pueden cohabitar en el mismo espacio. Como se mencionó anteriormente en el ecosistema terrestre se encuentran los páramos y bosques, los mismos que son importantes para el desarrollo de esta investigación.

Los páramos son los paisajes andinos más grandes del planeta y también uno de los más frágiles, debido a los cambios de uso de suelo, cambio climático, provocando aumento de erosión y disminución de la capacidad de almacenamiento de carbono (Chuncho & Chuncho, 2019), son suelos ricos en materia orgánica y generalmente se encuentran suelos andisoles o vitrosoles (Podwojewski, 1999). La FAO (2016) (citado en Astudillo, 2019), el bosque se define como un área que se extiende por más de 0,5 ha dotada de árboles con altura superior a 5 m, en el Ecuador existen varios tipos de bosques como son: bosque seco andino, bosque seco pluvioestacional (Mogrovejo, 2017), bosque siempre verde montano alto, entre otros. Este último bosque se extiende desde 3 000 a 4 000 metros de altitud (Muriel, 2008). Asimismo, estos ecosistemas ofrecen múltiples bienes y servicios como alimentación, purificación del agua y aire (Astudillo *et al.*, 2020), principalmente como sumidero de carbono (Chuncho *et al.*, 2019),

actuando como regulador de gases de efecto invernadero en la tierra (Hernández, 2009), en general se clasifican en tres categorías de servicios: 1) Abastecimiento, son aquellos que se obtienen de los ecosistemas (recursos renovables y no renovables); 2) Regulación, son los beneficios obtenidos de manera indirecta de los ecosistemas, como el carbono orgánico del suelo (COS) que es importante para combatir el calentamiento global y mitigar la degradación del suelo, etc; 3) Culturales, son los servicios no materiales que la comunidad obtiene por ejemplo turismo (Martín *et al.*, 2010). En este sentido para lograr la conservación de estos ecosistemas, se creó el concepto de áreas protegidas, que se define como un área geográfica establecida con medidas legales para la protección de los seres vivos que interactúan en el ecosistema así lo define Dudley (citado en MAE, 2013), también se establecieron varias estrategias, como es la creación de protocolos o acuerdos, cuyo objetivo es comprometer a los países industrializados a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en principio se creó el famoso protocolo de Kioto en 1990, el mismo que entro en vigor en 2005 (Challenger, 2001). Actualmente y sustituyendo al protocolo antes mencionado, se puso en práctica el acuerdo de París en 2016, en el cual, Ecuador se sumó a los 175 países del mundo que firmaron dicho acuerdo, comprometiéndose a reducir a las emisiones de gases y aumentar las reservas forestales de carbono (MAE, 2016).

De esta manera los ecosistemas cumplen un rol fundamental en la lucha contra el cambio climático y una de las formas de conocer su riqueza ambiental, es determinar el valor económico de los bienes y servicios ambientales de estas áreas. Para emplear la valoración económica es necesario conocer una de las ramas de la economía, la economía ambiental, se puede pensar que estos enfoques no tienen ninguna relación, pero nada está más lejos de la realidad, porque es vital conocer que la economía depende directamente de los procesos que se desarrollan en el entorno natural, administrando los elementos que lo componen, de esta manera se puede inferir que su finalidad es analizar el impacto ambiental (Riera, 2005), para ayudar a gestionar sosteniblemente los recursos

naturales (Azqueta, 2007), que pueden ser: fuentes hídricas, sumideros o almacenamiento de carbono, hábitat de fauna y flora, estética y recreación, los mismos que pueden ser valorados económicamente (Orejuela & Espinosa, 2020), para ello se puede obtener una sumatoria del valor económico total, el cual se divide en dos categorías: 1) Los valores de uso, son activos ambientales que tienen un valor fijo en el mercado y se clasifican en: a.- Valor de uso directo (VUD): son los recursos naturales que provienen de actividades agroproductivas (agricultura, pesca, ganadería), este valor se refleja en un precio en el mercado; b.- Valor de uso indirecto (VIU): son los valores que se derivan de las funciones de los ecosistemas y que indirectamente protegen la actividad económica; c.- Valor de opción (VO): es cuando se guarda un activo ambiental para usos futuros y 2) Los valores de no uso (VNU): se refieren a cuando el bien o servicio no tiene un valor real en el mercado y su valor puede estimarse en una simulación de mercado, estos pueden ser: a.- Valor de legado (VL): es un valor que se otorga a las generaciones futuras de los beneficios del recurso; b.- Valor de existencia (VE): es aquel valor asignado a las especies o ecosistemas, diversos y raros. Todos estos valores conforman un valor económico total (VET), se expresa de la siguiente manera (Lomas *et al.*, 2015):

$$VET = VU + VNO = VDU + VIU + VO + VL + VE \quad (1)$$

Asimismo, para determinar el valor económico total, se tiene distintos métodos, estos son: 1) Método de coste de viaje: se usan para valorar servicios recreativos. 2) Método de costes de prevención de daños: cuantifica la valoración de los servicios ecológicos. 3) Método de valoración contingente: consiste en realizar encuestas individuales con el fin de asignar un valor al bien o servicio ambiental (Lomas *et al.*, 2015). 4) Método de almacenamiento de carbono: consiste en obtener un valor económico en toneladas de carbono que capturan los ecosistemas (Astudillo, 2019). Dicho valor ambiental puede ser a partir de los mercados de carbono, los de cumplimiento regulado que son los utilizados por empresas y gobierno que rinden cuentas de sus emisiones de gases de efecto invernadero; y los de mercado voluntario, que son aquellos que el comercio de créditos se produce

sobre una base facultativa (Hamilton, 2009). A través de los esquemas del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), se faculta la compra y venta de los derechos de emisión otorgados a los países (industrializados) que hayan emitido gases de invernadero por debajo de la cuota pactada en el tratado de Kyoto, por tal motivo es posible brindar un valor económico al almacenamiento de carbono (De la Peña et al., 2010).

En tal virtud de lo expuesto anteriormente nuestro estudio se basa en la estimación del valor económico del carbono total almacenado en el Área Protegida “Cordillera Oriental del Carchi”, en la que mediante el uso de herramientas geográficas (sensores remotos) y métodos dasométricos, se obtendrá la biomasa total del área de estudio (Chuvieco, 2008). Además, mediante la geoestadística se podrá calcular el carbono almacenado en suelo de los ecosistemas Bosque Siempre Verde Montano Alto y Páramo, los mismos que conforman el Área Protegida, y así brindar las bases para el desarrollo futuro de políticas públicas.

Base Conceptual

Hoy en día se habla con gran entusiasmo de cuidar, respetar y proteger el planeta tierra del cambio climático, el cual es, un cambio de clima ocasionado por la actividad humana que transforma la composición de la atmósfera del planeta tierra (Díaz, 2012), esta composición está formada por 79 % de Nitrógeno (N_2), 20 % de Oxígeno (O_2) y 1 % de dos gases: 0,9 % de Argón (Ar) y 0,03 % Dióxido de carbono (CO_2). Este último gas juega un papel fundamental en el proceso del calentamiento de la atmosfera, pero gracias al incremento desmedido de las actividades generadas por el hombre (deforestación, quema de combustibles fósiles), el Dióxido de carbono (CO_2), ha aumentado a un 0,04 % en los últimos 50 años ocasionando cambios en la temperatura de la tierra, deshielo de glaciares, desertificación (Caballero et al., 2007). Pero en realidad entendemos ¿Qué es lo que tenemos que cuidar? O ¿A qué o a quienes afecta el cambio climático? Son preguntas sueltas que puede englobar diferentes variables, en esta investigación se tiene como base a la influencia del cambio climático en los

ecosistemas, este término se define como el conjunto de organismos bióticos y abióticos que interactúan en un espacio natural, donde se resalta al ecosistema como unidad básica de la naturaleza, los cuales aportan bienes y servicios ambientales en bienestar del ser humano, sobre todo a las comunidades aledañas (Armenteras *et al.*, 2016; de Groot *et al.*, 2002).

En este sentido, surge el término “Servicios de los ecosistemas o de la naturaleza” (Martín *et al.*, 2010), que hace referencia a los recursos renovables y no renovables que puede producir el ecosistema, siempre y cuando la naturaleza biótica y abiótica cumpla con sus ciclos correspondientes (Daily, 1997). Dentro de los ecosistemas se alberga una variedad de bienes y servicios uno de ellos es el sumidero o almacenamiento de carbono, el cual según la Convención Marco sobre el Cambio Climático (Naciones Unidas, 1992), en su artículo 1, define el “sumidero” como “cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe un gas de efecto invernadero de la atmósfera.” Las plantas capturan el porcentaje del CO₂ de la atmósfera y una parte de carbono penetra el suelo (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2015), el carbono se almacena principalmente en la biomasa (hojas ramas, corteza, raíces), que es la cantidad total de materia orgánica en cualquier ecosistema, se incrementa a través de la producción biológica y se mide como la cantidad por unidad de superficie, por ejemplo en gramos por metro cuadrado (g/m²) o toneladas métricas por hectárea (tn/ha) (Botkin & Keller, 2011), esto depende de las especies que se encuentren en el bosque o suelo, también de la precipitación y temperatura (Lopez *et al.*, 2016). Los flujos de CO₂ en los ecosistemas terrestres están regulados principalmente por el suelo ya que la materia vegetal, animal y orgánica persistente permanece mineralizada en el suelo. Este proceso es dinámico y tiene una influencia decisiva en las condiciones climáticas del planeta (Rojas *et al.*, 2017).

En el estudio se busca determinar la biomasa del bosque en campo, mediante la dasometría, que se encarga de la estimación y medición de las dimensiones, crecimiento y productos de los árboles de un bosque (Salgado, 2012). Cuyo objetivo es medir y estimar variables, para generar información referente al manejo del recurso a estudiar. Estas variables dasométricas, sirven de base para las

ecuaciones alométricas, definidas por (Návar *et al.*, 2013) como el método estándar para la estimación de la biomasa arbórea. A su vez, (Gómez *et al.*, 2011) afirma, que las ecuaciones alométricas es un medio confiable para una buena estimación de la biomasa en una o varias especies.

La dasometría que es expuesto conjuntamente con el trabajo en campo era la única opción a la hora de estimar biomasa forestal en un área determinada, sin embargo, con el avance de las nuevas tecnologías, la biomasa puede ser estimada mediante técnicas de teledetección, o también llamado sensores remotos, que adquiere información de un objeto o varios objetos, a través de datos obtenidos de un dispositivo, sin entrar en contacto con el objeto (Pérez, 2007). Los sensores cuentan con diferentes tipos de resoluciones, que es la habilidad para excluir la información de detalle, entre las más importantes tenemos: la percepción del objeto más pequeño en la imagen, denominada resolución espacial; el número y ancho de las bandas espectrales que puede excluir el sensor, denominado resolución espectral; la detección de la intensidad de la energía que llega el sensor llamado resolución radiométrica; la capacidad del sistema de observar desde distintos ángulos el mismo objeto, denominada resolución angular; y el período de visita de una zona, conocido como resolución temporal (Chuvienco, 2008).

La teledetección, desde la fotografía aérea hasta las imágenes satelitales, constituye una poderosa herramienta para mejorar la exactitud y la precisión de estudios forestales extensos a gran escala, lo que hace posible investigar ideas que antes no se podían probar (Slaymaker, 2001). Dentro de los productos satelitales obtenemos las imágenes RADAR, (Chuvienco, 1990) lo define como un sensor activo, radiómetro activo de micro-ondas, obtenida entre las bandas de 0,1 cm y 1 m. Es capaz de trabajar en cualquier condición atmosférica, especialmente en lugares con presencia de nubes como países ecuatoriales. Las imágenes RADAR al obtenerlas de un satélite, presentan diferentes distorsiones o ruidos, entre las más comunes tenemos: las sombras, que es la superficie del terreno que no se ilumina por el Radar (IGN, 2018); el moteado (efecto speckle), que da a las imágenes una apariencia de

tipo granular (Small *et al.*, 2008); y la inversión por relieve, producida por la energía reflejada por la porción superior de un objeto que llega antes de la porción inferior (IGN, 2018). Las mismas se pueden mejorar mediante la corrección radiométrica, que es la implementación de una normalización radiométrica (Kellendorfer, 1998); y la corrección geométrica, que es la correcta ubicación de un punto sobre la superficie terrestre, mediante el método de Ortorectificación de Corrección Rango Doppler (Small *et al.*, 2008)

Po otro lado, en la obtención de biomasa en suelo, se realizó un análisis geoestadístico, el cual se fundamenta en la estadística espacial que hace referencia al estudio de puntos medidos aleatoriamente dentro de una región (Giraldo, 2007). A su vez existen métodos de validación como es SoilGrids (Global Soil Information) (Hengl *et al.*, 2017), es una plataforma abierta a la colaboración y producción global de información de suelo, que contiene predicciones espaciales para una selección de propiedades del suelo (a seis profundidades estándar) y obteniendo valores de carbono orgánico del suelo (g kg^{-1}). Se basa en modelos de predicción espacial global que se ajustaron, por variable de suelo, utilizando una compilación de las principales bases de datos internacionales de perfiles de suelos (Hengl *et al.*, 2014).

Finalmente, la investigación se fundamenta en realizar la estimación del valor económico donde se identifican los ecosistemas que intervienen, los problemas y actores involucrados y en lo económico incorpora métodos de valoración económica, para determinar el alcance del estudio (Valencia *et al.*, 2017). La valoración puede servir para señalar los cambios en la dotación de recursos ambientales: su escasez relativa o absoluta, cuyo objetivo principal es facilitar a la toma de decisiones, lo antes mencionado es fundamental para diseñar las bases de una propuesta de política pública, donde, las autoridades responsables y población en general sean capaces de analizar las problemáticas y así establecer políticas publicas viables, que se puedan cumplir a corto plazo (Burgos, 2008). Según (Salazar, 1994), las políticas públicas son “las sucesivas respuestas del Estado (del “régimen político” o del

“gobierno de turno”) frente a situaciones socialmente problemáticas, por lo tanto es un conjunto de decisiones que son planificadas por actores políticos y la participación ciudadana (Espinoza, 2009).

Base legal

El estudio, abordándose sustenta en el acuerdo a la conservación y manejo de los ecosistemas frágiles y amenazados; que se encuentra en el Art. 406 de la Constitución de la Republica del 2008, el cual menciona que el estado es el encargado exclusivo del manejo y uso sustentable, la conservación, recuperación, y limitaciones de los ecosistemas (República del Ecuador, 2008). Asimismo, en el Art. 414 de la Constitución de la Republica del 2008, resalta las medidas para la eliminación del cambio climático, por medio de la restricción de la deforestación, de las emisiones de gases de efecto invernadero y de la contaminación de la atmosfera (República del Ecuador, 2008). Seguidamente, dentro del Marco de Cooperación para el Desarrollo Sostenible ONU – Ecuador 2019-2022, el Ecuador confirmó su responsabilidad con los ODS y la Asamblea Nacional, adoptó una resolución en la que se compromete con la implementación de los ODS y los coloca como un referente obligatorio para su trabajo, tomamos como referente el ODS 15 alusivo a vida de ecosistemas terrestres (Organización de las Naciones Unidas Ecuador, 2019). Por otro lado, cuando hablamos de fraccionamiento agrícola, el Art 471, del Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD), menciona que no se puede fraccionar bosques, humedales y otras áreas ecológicas (COOTAD, 2010). Además, el Código Orgánico del Ambiente, en el Art. 49 y 50, mencionan que está prohibido la invasión de cualquier tipo de ocupación o adquirir ningún título tierras en las áreas agregadas en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (Asamblea Nacional del Ecuador, 2017). También, en el Art 54, establece que se inhiben las acciones extractivas de minería no metálica e hidrocarburos dentro del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (Asamblea Nacional del Ecuador, 2017). Finalmente, Cuando nos referimos a la ejecución o diseño de políticas públicas, el Art 85 de la Constitución de la Republica del 2008, dispone los lineamientos para ejecutar y controlar las políticas públicas (República del Ecuador, 2008)

Capítulo III

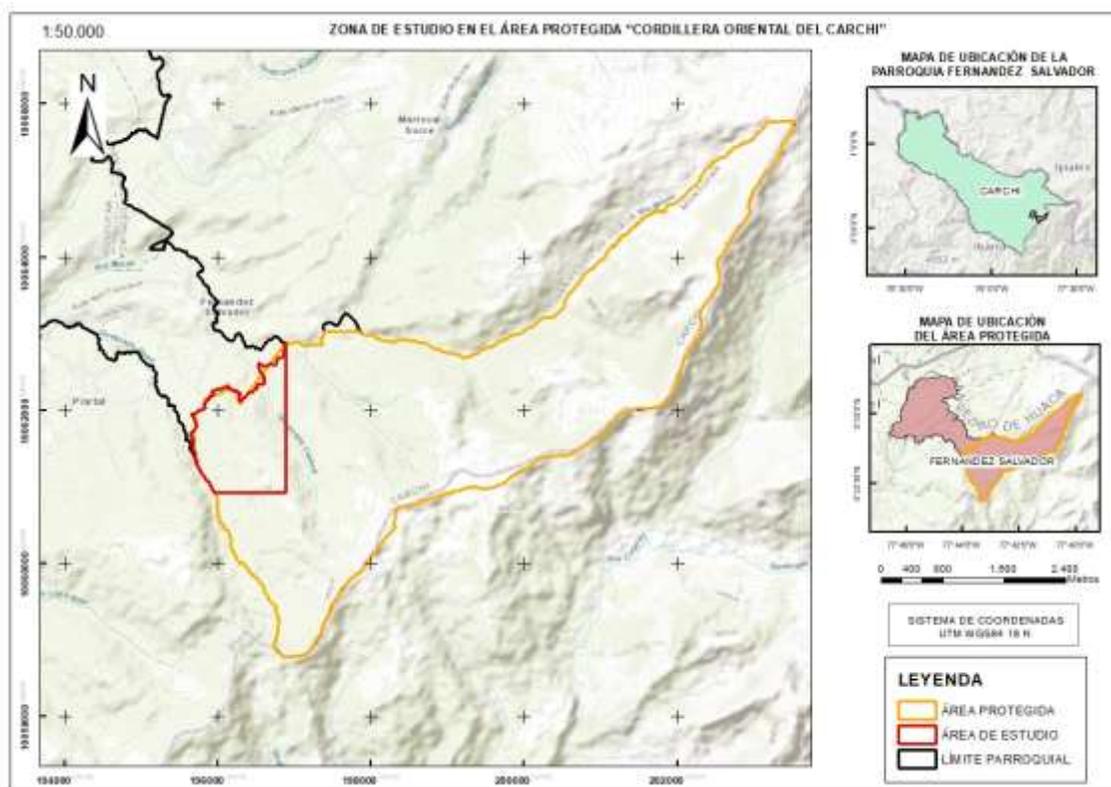
Metodología

Descripción del área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en el Área Protegida “Cordillera Oriental del Carchi”, la cual fue establecida mediante la entrega del Acuerdo Ministerial No. 055 en 2019, esta área está localizada dentro de la parroquia rural Fernández Salvador- Provincia del Carchi, Cantón Montufar. sus coordenadas geográficas abarcan desde los 77° 39' 46" hasta 77° 46' 37" longitud oeste; y, 00° 31' 53" hasta 00° 36' 24" latitud norte (GAD Parroquial Fernández Salvador, 2020), con una superficie 169 200 ha , dentro de la misma se encuentran dos bosques protectores y los Bosques Protectores “El Chamizo-Minas” y “Lomas corazón y Bretaña” ocupando una extensión de 101 900 ha. El Área protegida también está constituida de dos ecosistemas predominantes que son: El Bosque Siempreverde Montano Alto y El Páramo. El área presenta diferentes desafíos de conservación ya que las comunidades locales dependen de las tierras que fueron utilizadas para actividades agrícolas y ganaderas (GAD Parroquial Fernández Salvador, 2020). En esta investigación se tomó 162,47 ha de área protegida para su correspondiente análisis, definidas en la figura 1.

Figura 1

Área de estudio en el área protegida "Cordillera Oriental del Carchi"



Nota. Tomado de (CONALI, 2019)

En cuanto a los datos socioeconómicos de la parroquia, tenemos que la población está conformada por 0,28 % montubio, 0,46 % blanco y 99,26 % mestizo, con un total de 1 076 habitantes. También tenemos las principales actividades económicas, conformadas por un 48,98 % de la población total, la cual da cuenta al número de personas que tienen edad de trabajar, incluyendo a las personas activas, en actividades de: la atención de la salud humana, empleadores de los hogares, servicios administrativos, administración pública y defensa, comercio, construcción, enseñanza, transportistas, agricultura, ganadería, silvicultura y pesca. Además, en la educación a nivel cantonal, la población presenta educación primaria del 47,04 %, educación secundaria del 16,67 %; y el 3,56 % de población sin educación, caso que se observa en personas de la tercera edad. Simultáneamente, tenemos la movilidad

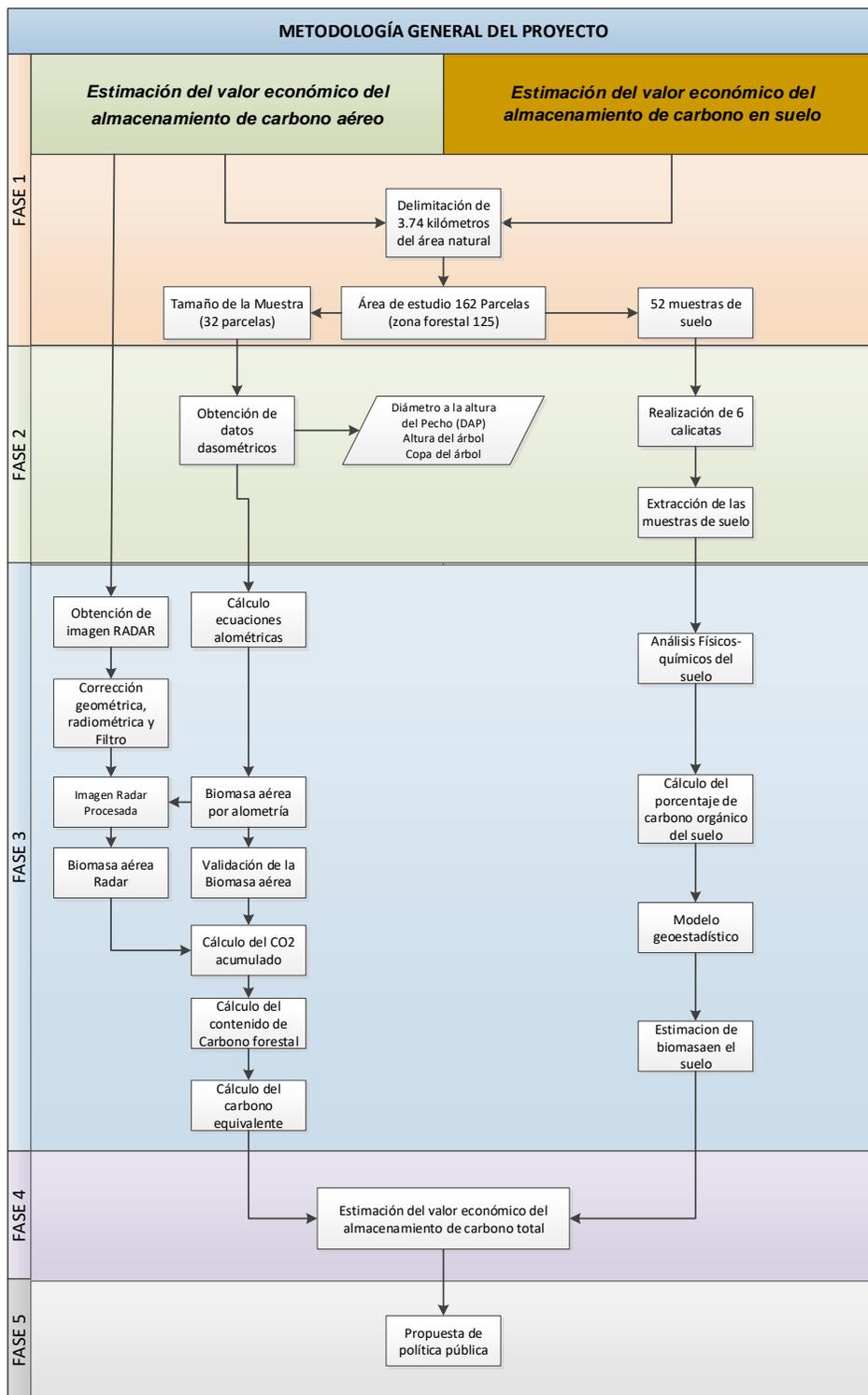
de la población, ya que los habitantes deciden movilizarse para buscar bienestar para sus familias, en varios casos la movilidad es por empleo o educación y emergen a vivir en las provincias más cercanas como son Imbabura o Pichincha (GAD Parroquial Fernández Salvador, 2020).

Metodología de desarrollo de proyecto.

En el Área Protegida “Cordillera Oriental del Carchi” se realizó la estimación del valor económico del almacenamiento de carbono en la biomasa total (aérea y suelo), con la ayuda de técnicas e insumos geoespaciales, trabajo de campo y análisis físico-químico en laboratorio, lo cual servirá como base para la conservación de los bienes y servicios ambientales de esta área natural. La investigación se dividió en cinco fases, los cuales se ilustran en la siguiente figura:

Figura 2

Metodología general del proyecto

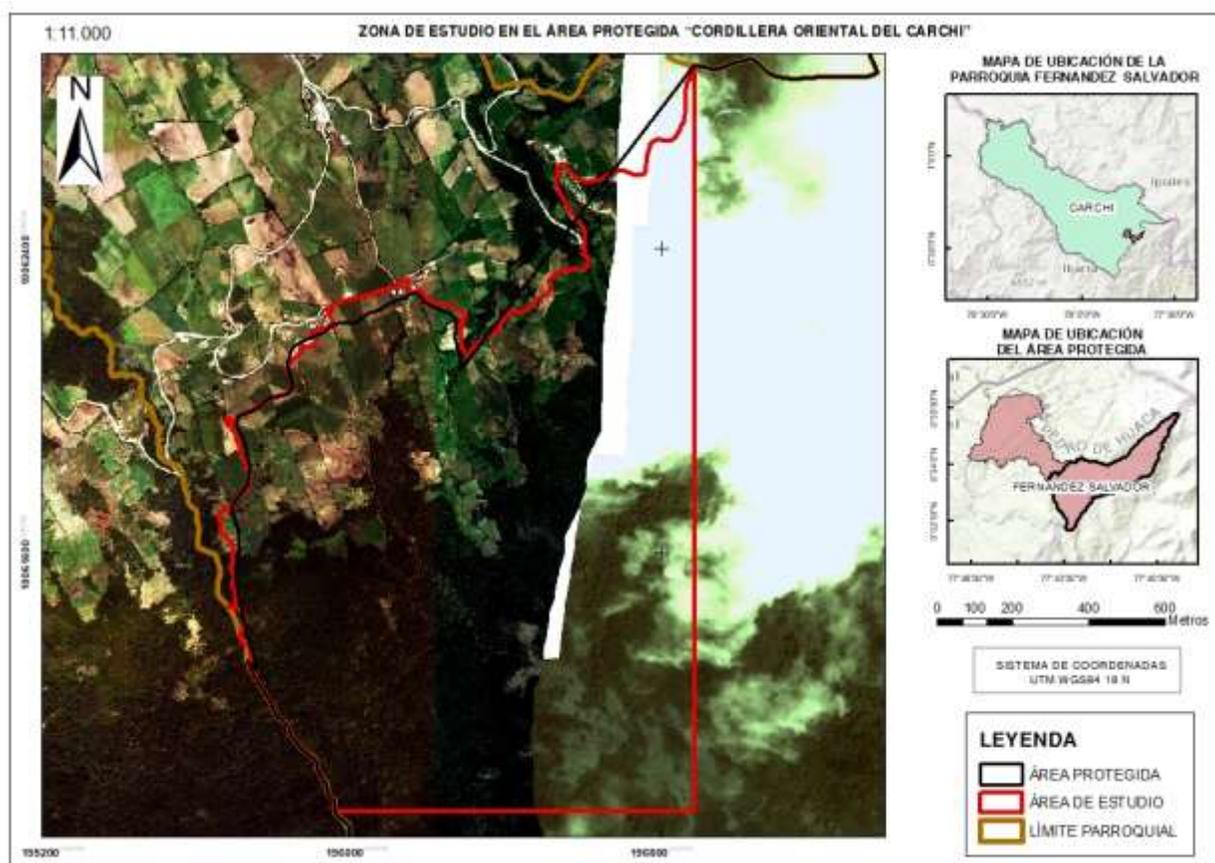


En la primera fase, se delimitó un kilómetro cuadrado del área natural correspondiente a un tramo de nuestra área de estudio, este fue el punto de partida para estimar el tamaño de la muestra.

El levantamiento del recorrido se realizó mediante un GPS navegador, Magellan, modelo Triton 2000. En la figura 3 se visualiza el área de estudio de color rojo, correspondiente a 162,47 ha.

Figura 3

Área de estudio



Nota. Tomado de (CONALI, 2019)

Definido el área de estudio, se procedió a realizar el diseño de muestreo. Se pueden realizar diferentes tipos de muestreo de vegetación entre ellos tenemos las mencionadas por (Mostacedo & Bonifacio, 2000):

- Transectos / variables
- Muestreos fitosociológicos
- Punto centro cuadrado
- Puntos de intercepción
- Líneas de intercepción
- Cuadrantes

El método de los transectos es mayormente utilizado por la heterogeneidad con que se muestrea la vegetación y por la rapidez con que se mide (Melo & Vargas, 2003).

Los transectos también se pueden utilizar para realizar estudios de caracterización forestal a gran escala, para ello, la unidad se puede asumir a la de un camino o vía y no obedecer a un patrón geométrico (Melo & Vargas, 2003). En nuestro estudio se utilizaron 3 transectos, con un total de 2,74 km para un área de estudio de 1,62 km², la cual tuvo sustento en la investigación realizada por (Thouret & Fabre, 1989) en el Parque Nacional Natural Los Nevados, el transecto utilizado tuvo aproximadamente 130 Km, iniciando en el Valle del Cauca, y ascendiendo hasta el río Magdalena para un área de 583 km².

Seguidamente, se realizó un muestreo por los 3 transectos, tal y como lo menciona (Garitacelaya *et al.*, 2006) tomando las muestras cada 100 metros de distancia. En la tabla 1 se resumen los 3 transectos utilizados, con su número de muestras forestal y su respectivo ecosistema.

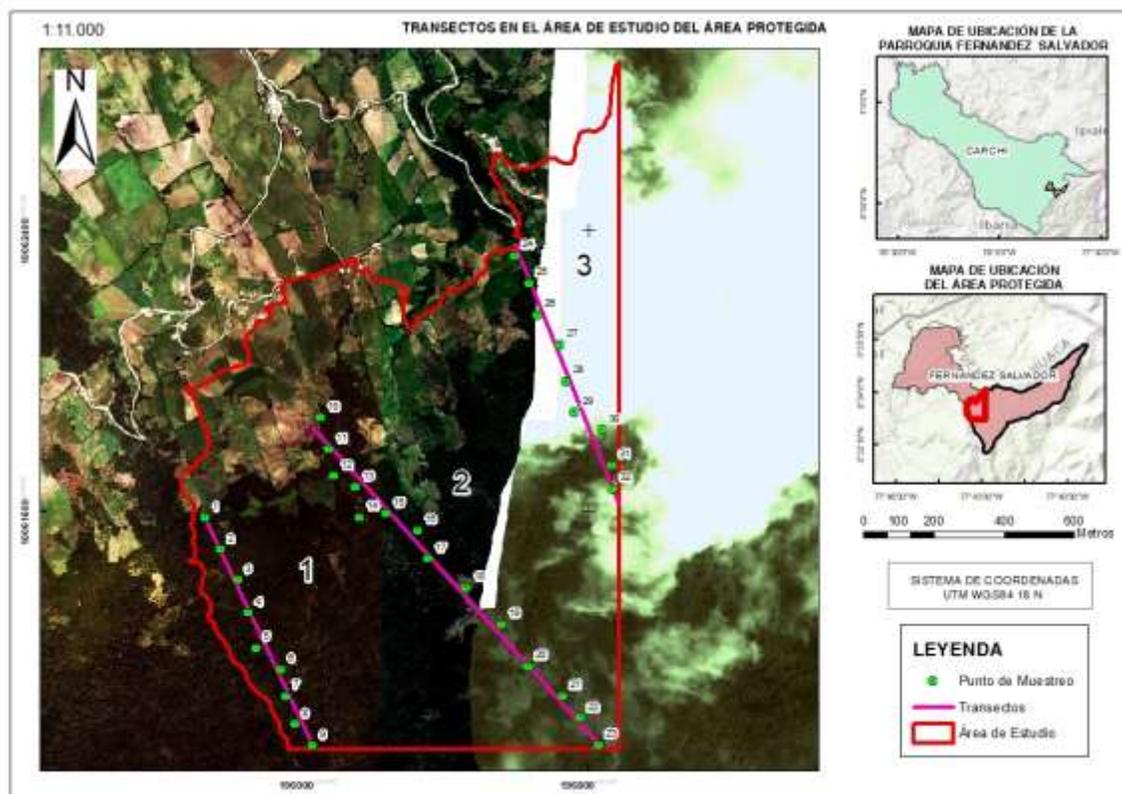
Tabla 1*Características de los transectos*

Número de Transecto	Km	Número de muestreo	Ecosistema
1	0,725	9	Bosque Siempreverde Montano Alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes
2	1,224	6	Bosque Siempreverde Montano Alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes
2	1,224	8	Rosetal Caulescente y herbazal del Páramo (Frailejones)
3	0,796	9	Bosque Siempreverde Montano Alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes

A continuación, tenemos los 3 transectos que fueron utilizados en el diseño de la muestra, cada uno con su ubicación en una parcela de una hectárea y ecosistema. El primer transecto de la parcela 1-9 (0,725 km), el segundo entre las parcelas 10-23 (1,224 km), y el último las parcelas 24-32 (0,796 km) (Ver figura 4).

Figura 4

Diseño de muestreo (transectos)

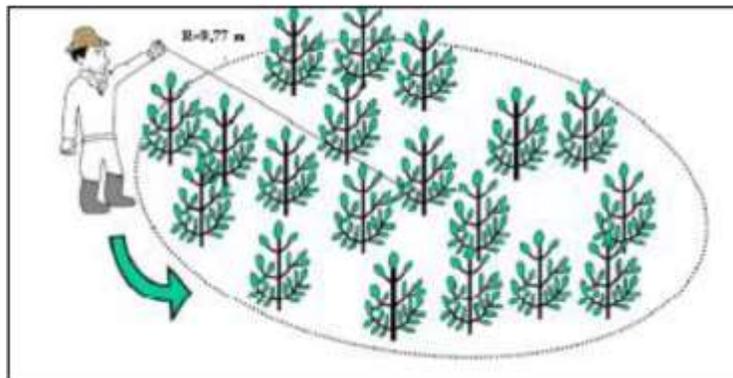


Nota. Tomado de (CONALI, 2019)

En la segunda fase de la investigación, se definió el tipo de muestreo para la vegetación, adaptando la metodología propuesta por (Mostacedo & Bonifacio, 2000) donde se ubicó puntos a través de una línea. En esta línea, se localizó un punto a partir del cual se hizo el muestreo de la vegetación midiendo las características de todos los árboles en un radio de 10 metros (Ver figura 5).

Figura 5

Ejemplo de transecto variable



Nota. Tomado de (Mostacedo & Bonifacio, 2000)

La medida de campo fue el diámetro a la altura del pecho (DAP); las cuales tuvieron como finalidad el cálculo de las estimaciones de biomasa forestal de cada individuo.

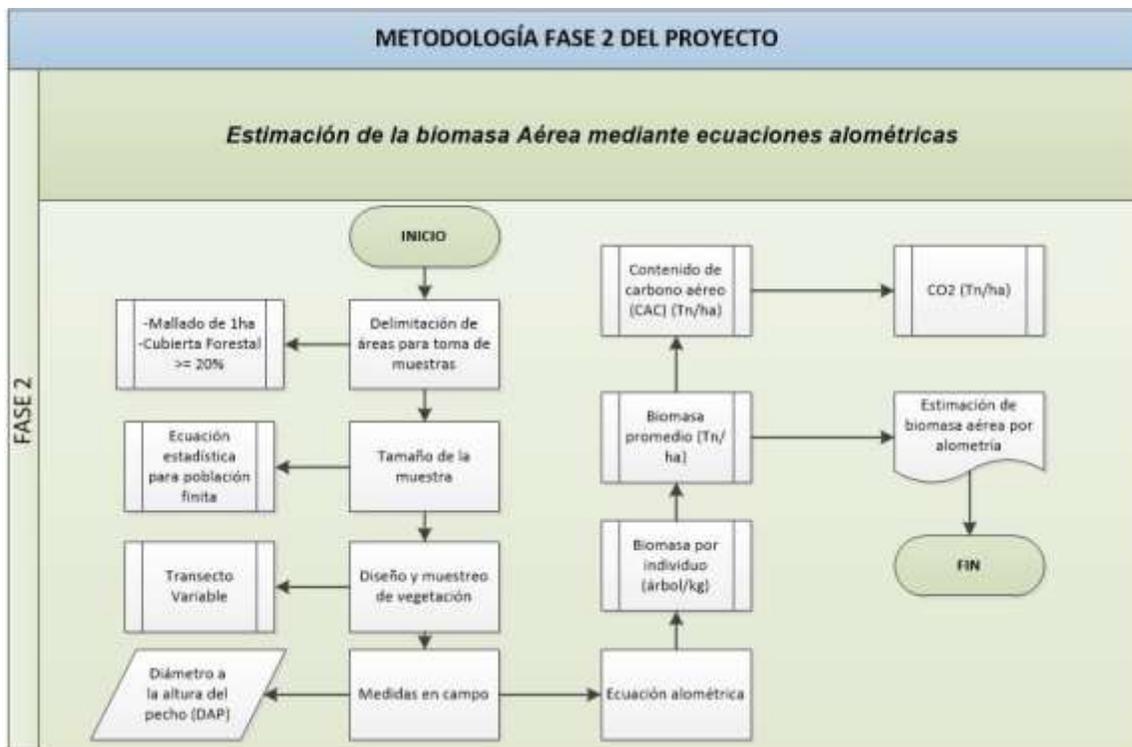
Los DAP considerados en el estudio fueron los que tenían un diámetro mayor a 10 centímetros, especificado por (Brown *et al.*, 1989), ya que, diámetros menores representan menos del 15 % de biomasa. Todos los datos fueron recolectados en hojas de campo, teniendo un registro físico de la información obtenida, todas ellas se encuentran en el anexo 1.

Estimación de biomasa Aérea por alometría

El proceso de estimación de biomasa aérea por alometría consta de etapas en campo y su posterior proceso de datos en gabinete. A continuación, en la figura 6 se explica el proceso metodológico de la estimación de biomasa por alometría.

Figura 6

Metodología para la estimación de biomasa aérea por alometría



La fase tres de la investigación consistió en el procesamiento de información en gabinete, donde se realizó la estimación de biomasa forestal por medio de las ecuaciones alométricas con el siguiente procedimiento:

1. Se calculó la biomasa por cada individuo arbóreo perteneciente al ecosistema Bosque Siempreverde Montano Alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes y Rosetal Caulescente y herbazal del Páramo (Frailejones). El (MAE, 2020) propone la siguiente ecuación para el primer ecosistema:

$$Biomasa = p * e^{(-1.499+(2.148*\ln(dap))+(0.207*(\ln(dap))^2-0.0281*(\ln(dap))^3)} \quad (2)$$

Dónde: *Biomasa* = biomasa arbórea (*kg*), *p* = densidad específica de la madera (*g/cm³*)

dap = DAP (diámetro a la altura del pecho) o diámetro normal (*cm*)

Por otro lado, (Villegas, 2020) menciona la ecuación lineal para la determinación de biomasa en el ecosistema Páramo de la siguiente forma:

$$Biomasa = 0.1546 * dap^{0.76803} * altura^{0.40467} * copa^{1.24046} \quad (3)$$

Dónde: *Biomasa* = biomasa aérea (*kg*), *dap* = DAP (diámetro a la altura del pecho) o diámetro normal (*cm*), *altura* = altura del árbol o arbusto (*cm*), *copa* = copa del árbol o arbusto (*cm*)

La ecuación mencionada por (MAE, 2020) en el ecosistema Bosque Siempre verde Montano Alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes, tiene como variable la densidad de cada especie arbórea, la cual se determinó mediante bibliografía, a continuación se presenta la tabla 2 donde indica la especie y densidad con su respectiva fuente:

Tabla 2

Densidades de las especies arbóreas

# de especie	Nombre	Nombre Científico	Densidad (gr/cm3)	Referencia
1	Amarillo	Berberis pichinchensis Turcz.	0,80	
2	Arrayán	Myrcianthes hallii (O. Berg) McVaugh	1,07	(DFM, 2016)
3	Guandera	Clusia flaviflora	0,63	(Ter et al., 2019)
4	Encino	Weinmannia cochensis Hieron	0,96	(Luis & Moncayo, 2014)
5	Yalte	ocotea infrafoveolata	0,80	
6	pumamaqui	Oreopanax ecuadorense Seem	0,78	(Luis & Moncayo, 2014)
7	pata gallo	Bauhinia ungulata	0,78	(Calvo, 2017)
8	Canelo	Nectandra laurel Nees	0,57	(Luis & Moncayo, 2014)
9	Helecho	Cyathea caracasana (Klotzsch) Domin	0,72	(Hidalgo, 2014)
10	charmuelan	Escallonia sp	0,80	
11	Motilón	Hieronyma asperifolia Pax y K. Hoffm.	0,71	(NTE 2176, 2006)

# de especie	Nombre	Nombre Científico	Densidad (gr/cm3)	Referencia
12	Pandala	Prunus huantensis	0,96	(Luis & Moncayo, 2014)
13	Cascarilla	Cinchona officinalis L.	0,74	(Feijóo <i>et al.</i> , 2019)
14	Lechón	Brosimum utile	1,02	(Luis & Moncayo, 2014)
15	Aliso	Alnus acuminata Kunth	0,71	(Luis & Moncayo, 2014)
16	Moquillo	Saurauia herthae Sleumer	0,80	
17	Mayu	Sophora macrocarpa	0,80	

Nota. Para la densidad de las 4 especies que no se encontró registro, se le asignó la densidad de madera promedio obtenida de las especies de su mismo género, tal y como lo recomienda, tomado de (MAE & FAO, 2014).

Con las ecuaciones mencionadas para cada ecosistema, se procedió a estimar el cálculo de biomasa para cada individuo arbóreo. La tabla 3 muestra un ejemplo del cálculo de biomasa realizado para la parcela 1.

Tabla 3

Cálculos de biomasa por parcela

Árboles	Especie	CAP (cm)	Densidad (gr/cm3)	DAP (cm)	Biomasa (tn/árbol)	Suma biomasa (tn)
1	encino	50,0	1,0	15,9	0,2	
2	pandala	70,0	1,0	22,3	0,5	
3	cascarilla	18,0	0,7	5,7	0,0	
4	encino	54,0	1,0	17,2	0,3	
5	pandala	68,0	1,0	21,7	0,5	
6	encino	45,0	1,0	14,3	0,2	
7	amarillo	49,0	0,8	15,6	0,2	
8	arrayan	47,0	1,1	15,0	0,2	
9	pandala	40,0	1,0	12,7	0,1	7,4
10	pumamaqui	60,0	0,8	19,1	0,3	
11	pata de gallo	81,0	0,8	25,8	0,6	
12	pumamaqui	70,0	0,8	22,3	0,4	
13	pata de gallo	90,0	0,8	28,7	0,8	
14	guandera	105,0	0,6	33,4	1,0	
15	encino	65,0	1,0	20,7	0,4	

Árboles	Especie	CAP (cm)	Densidad (gr/cm ³)	DAP (cm)	Biomasa (tn/árbol)	Suma biomasa (tn)
16	guandera	85,0	0,6	27,1	0,6	
17	encino	50,0	1,0	15,9	0,2	
18	guandera	95,0	0,6	30,2	0,8	

2. Luego se procedió a transformar las unidades de kg/individuo a tn/ha, mediante la siguiente ecuación de (Walker *et al.*, 2011):

$$BSS_{ha} = \left(\frac{A_{ha}}{A_p} \right) * BSS_p \quad (4)$$

Dónde: BSS_{ha} = Estimación de biomasa por unidad de hectárea, A_{ha} = Una hectárea (10 000 m^2), A_p = Área de parcela muestreada, BSS_p = Estimación de biomasa promedio a nivel de parcela

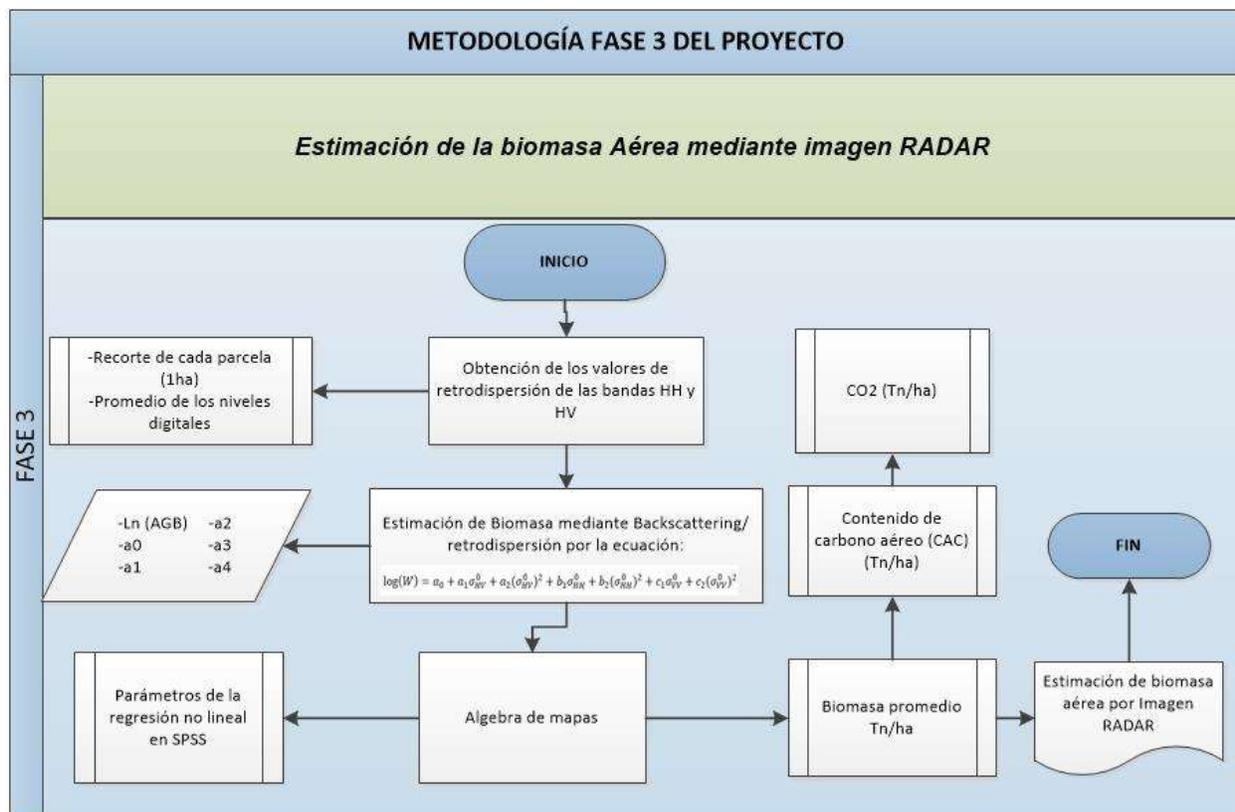
3. Seguidamente, se usó el factor 0,5 para transformar la biomasa forestal en contenido de carbono aéreo (CAC).

Estimación de biomasa Aérea por imagen RADAR

La estimación de biomasa aérea mediante RADAR, requirió de varios procesos en gabinete con ayuda de los datos obtenido en campo. A continuación, se detallan los pasos para la estimación de Biomasa mediante Imagen RADAR (Ver figura 7).

Figura 7

Metodología para la estimación de Biomasa aérea por imagen radar



Además, en la fase de gabinete, se realizó la estimación de biomasa mediante imágenes Radar.

Como primer paso se recopiló y procesó la imagen Radar.

La recopilación de la imagen Radar fue desde el portal de datos abiertos, ASF (Alaska Satellite Facility). Se pudo obtener una imagen radar ALOS PALSAR, del 13 de agosto del 2010, de banda L, con una dirección de vuelo ascendente, polarizaciones HH+HV y un nivel de procesamiento 1.1. En la tabla 4 se indican las características del sensor PALSAR.

Tabla 4

Características del sensor Palsar del satélite Alos

Modo	Fino		ScanSAR	Polarimetría experimental (modo 1) *
Centro de frecuencia	1270 MHz(L-band)			
Ancho de banda del eco	28MHz	14MHz	14MHz, 28MHz	14MHz
Polarización	HH o VV	HH+HV o VV+VH	HH o VV	HH+HV+VH+VV
Ángulo incidente	8° - 60°	8° - 60°.	18° - 43°	8° - 30°
Alcance	7 – 44 m	14 – 88 m	100 m (multi look)	24 – 89 m
Franja de observación	40 – 70 km	40 – 70 km	250 – 350 km	20 – 65 km
Longitud de Bit	5 bits	5 bits	5 bits	3 o 5 bits
Velocidad de datos	240 Mbps	240 Mbps	120 Mbps, 240Mbps	240 Mbps
NE sigma zero **	< -23dB (ancho de franja 70km) < -25dB (ancho de franja 60km)		< -25 dB	< -29 dB
S/A **, ***	> 16 dB (ancho de franja 70km) > 21dB (ancho de franja 60km)		> 21dB	> 19 dB
Precisión radiométrica	Escena: 1 dB / órbita: 1.5 dB			

Nota. Tomado de (Rojas, 2015)

Se trató la imagen en las correcciones: geométrica y radiométrica, seguida por la aplicación de un filtro. Para el desarrollo de las distorsiones se manejó el software SNAP Desktop (Sentinel Application Platform) que es de descarga y uso gratuito (Casella *et al.*, 2018), mediante la herramienta Range Doppler Terrain Correction que permite crear un interferograma diferencial mediante la sustracción de la topografía de la zona utilizando un modelo digital de elevaciones (Martínez, 2022). Se escogió un tamaño de pixel de 15 metros, que es la resolución del sensor PALSAR, y el DEM que es proporcionado en la misma carpeta de los datos bajados en ASF (Alaska Satellite Facility). Posteriormente, se mejoró la calidad de la imagen mediante la eliminación del ruido de sal y pimienta, conocido como “speckle”,

utilizando la herramienta “speckle filter” en el software, el cual se basa en las propiedades geométricas de la imagen, es decir, en el tamaño y forma de los objetos terrestres (Morales, 2020). (Kellndorfer, 1998) describe la siguiente expresión para las correcciones:

$$\sigma_{NORM}^0 = \sigma_{ELIPSOIDE}^0 \frac{\sin\theta_{DEM}}{\sin\theta_{ELIPSOIDE}} \quad (5)$$

Dónde: θ_{DEM} es el ángulo de incidencia local proyectado en el plano gamma.

Una vez obtenida la imagen Radar corregida, se empleó la ecuación derivada de (Saatchi et al., 2007), para la determinación de la biomasa de la forma general del modelo de regresión, tenemos:

$$\log(W) = a_0 + a_1\sigma_{HV}^0 + a_2(\sigma_{HV}^0)^2 + b_1\sigma_{HH}^0 + b_2(\sigma_{HH}^0)^2 + c_1\sigma_{VV}^0 + c_2(\sigma_{VV}^0)^2 \quad (6)$$

Donde $\log(W)$ es la biomasa aérea total, y σ_{HV}^0 , σ_{HH}^0 y σ_{VV}^0 respectivamente, representan las medidas de difusión radar.

Para ello, en primer lugar se exportó la imagen Radar corregida del programa SNAP Desktop al programa Envi, el cual, cuenta con un agregado de herramientas avanzadas para el análisis espectral, diseñadas específicamente para trabajar con datos hiperespectrales y un conjunto completo de herramientas para trabajar con datos de RADAR (UEGPS, 2018). Posteriormente se obtuvieron los coeficientes de retrodispersión de la imagen Radar, en la polarización HH (σ_{HH}^0) y HV (σ_{HV}^0), de cada una de las parcelas, de la malla de 100 x 100 m, correspondiente a un conjunto de aproximadamente de 36 a 49 píxeles por parcela. Una vez obtenidos todos los niveles digitales de cada parcela, se tiene el promedio de cada una, con el fin de relacionar los datos con la información obtenida en campo.

En segundo lugar, se estiman los coeficientes presentes en la ecuación 6, correspondiente a las variables; a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , y a_4 , a partir de una regresión no lineal, llevada a cabo en el programa informático utilizado en el análisis de datos SPSS (Statistical Product and Service Solutions), el cual permitió el tratamiento de datos y posterior análisis estadístico (Herrerias, 2005); relacionando la biomasa obtenida por medio de las ecuaciones alométricas y los promedios de los niveles digitales de la

imagen Radar, todo ello a nivel de hectárea. Cabe destacar que se obtuvieron dos coeficientes diferentes por cada variable, debido a que en la investigación se tomaron datos de especies de dos ecosistemas.

En tercer lugar, se generó una banda, en el mismo software ENVI, mediante la herramienta band math, la cual nos permite ingresar una fórmula relacionada para cada una de las bandas; aplicamos la ecuación 6, la cual sustituye el valor de la variable b1 por la banda HH, el valor de la variable b2 por la banda HV, los parámetros obtenidos en el paso dos de este mismo apartado, y el factor de escala se extrae de los metadatos disponibles para la imagen, una vez aplicada la fórmula se obtiene para cada una de las bandas en la imagen la conversión de los valores digitales con los que viene por defecto la imagen a valores de radiancia (Aguilar *et al.*, 2014). Con ello se obtuvo el modelo de Estimación de Biomasa Forestal de la imagen Radar para los dos ecosistemas presentes en el área protegida.

Finalmente, se pasaron los datos a una Geodatabase, los cuáles dieron la sumatoria de la biomasa para cada parcela de estudio.

Los dos resultados de estimación de biomasa por los métodos: campo y Radar, se compraron, mediante una correlación; Biomasa obtenida por ecuaciones alométricas (Alometría) vs Biomasa obtenida del mapa de Estimación de Biomasa Forestal mediante Radar.

Para comparar estos dos valores, se extrajeron los valores digitales del mapa de estimación por Radar, mediante el software ArcGis y la herramienta Raster to point, generando puntos con los valores digitales de Biomasa, después, para cada parcela se realizó una selección por localización y obtener la suma de la biomasa acumulada a través de la herramienta Statistics en el mismo ArcGis.

Posteriormente, se compararon los resultados de biomasa obtenidas en campo y los resultados obtenidos mediante Radar.

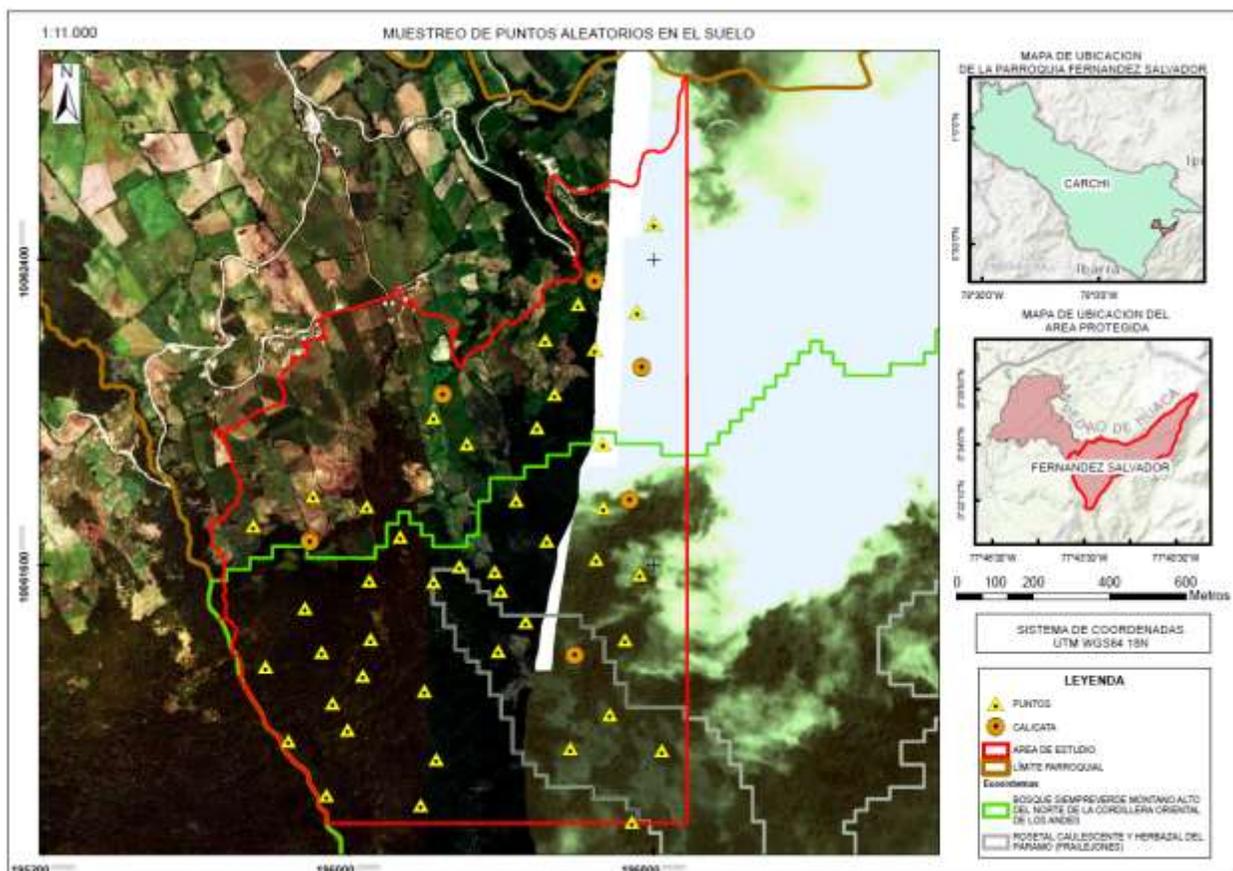
Teniendo los valores de biomasa por cada método, se procedió al análisis de los resultados, y así poder identificar errores o inconsistencias mediante índices y gráficos estadísticos. Se generó una tabla con medidas estadísticas como: media, mediana, coeficiente de asimetría, error estándar de asimetría, máximo valor, mínimo valor, suma y número de datos. Estos estadísticos fueron aplicados en un contraste de hipótesis de medias de datos cuantitativos denominado ANOVA, para sustentar la validación de la investigación. Además, se efectuó un análisis de correlación por el método de Pearson, para los resultados obtenidos de biomasa en las dos variables o métodos utilizados.

Estimación de biomasa en suelo

En la fase cuatro se realizaron 6 calicatas con el objetivo de determinar a qué profundidad se deben extraer las muestras de suelo donde se encontrará la materia orgánica de la planta. Además, se ejecutó un muestreo aleatorio simple para extraer 52 muestras de suelo, con el uso de un barreno de forma cilíndrica de 5 cm de diámetro y 1 m de altura (Peng *et al.*, 2013) (Ver figura 8).

Figura 8

Diseño de muestreo (puntos aleatorios)



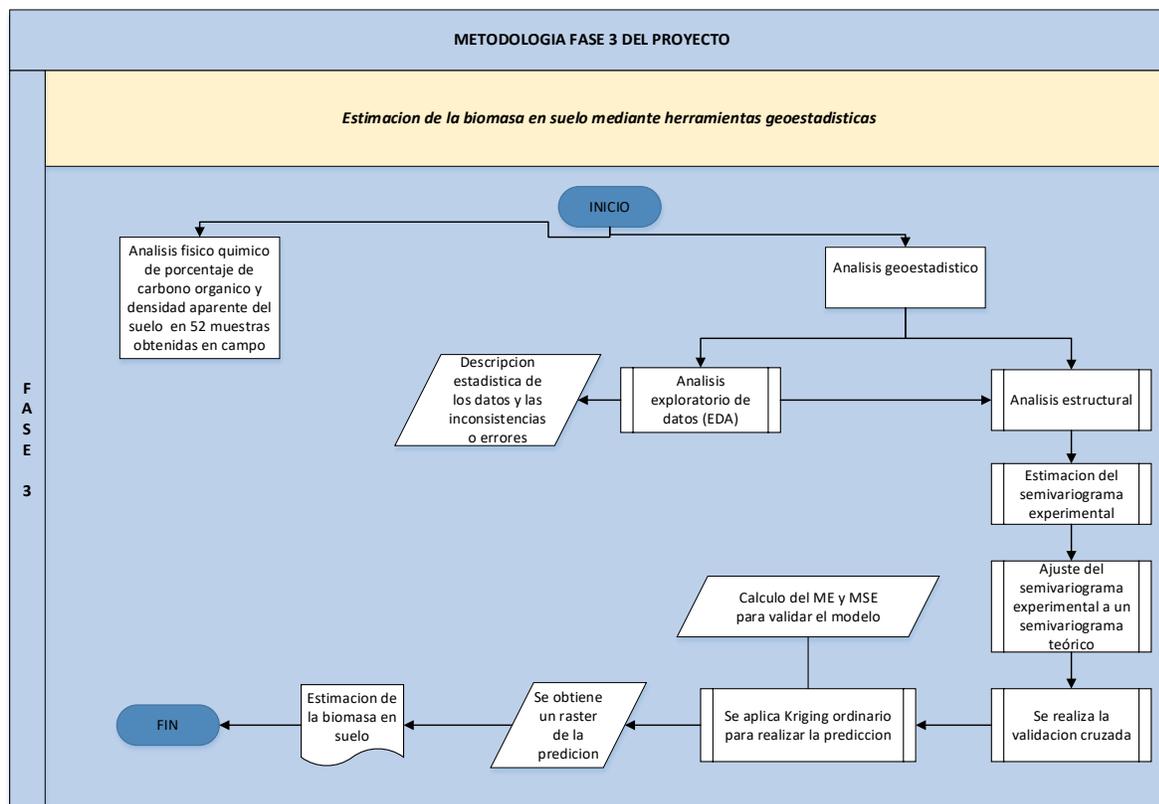
Nota. Tomado de (CONALI, 2019)

Nota: Distribución de 52 puntos de muestreo y 6 calicatas, dentro del área de estudio para la recolección de muestras de suelo.

En la estimación de biomasa en suelo se requirieron de varios procesos y subprocesos realizados en gabinete con ayuda de los datos obtenido en campo y laboratorio. A continuación, se detallan los pasos para la estimación de biomasa (Ver figura 9).

Figura 9

Metodología para la Estimación de Biomasa en suelo mediante herramientas geoestadísticas



Una vez recolectadas las 52 muestras de suelo, se analizó el porcentaje de carbono orgánico y la densidad aparente en el laboratorio de suelos del INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones agropecuarias).

Con los valores de carbono orgánico obtenidos se procedió a realizar el modelo de predicción geoestadístico, con el fin de identificar la fijación de carbono en el suelo dentro del área de estudio. Para el análisis geoestadístico, se utilizó el software R. En este caso, se utilizarán diversos paquetes geoestadísticos como se verán en el transcurso del proyecto. En el análisis geoestadístico se siguieron las siguientes etapas:

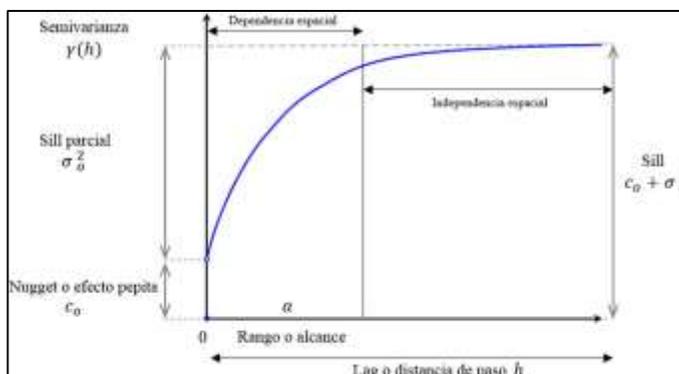
1. Análisis exploratorio de datos (EDA), es cuando se utilizan herramientas estadísticas (ecuaciones u gráficos) (Alfaro, 2007). Se dispone de información georreferenciada, es indispensable emplear gráficos exploratorios. En esta investigación se utilizaron histogramas, diagramas de caja y bigote y gráficos de dispersión, el cual es muy útil para la detección de relaciones entre las variables.
2. Análisis estructural, básicamente se estima y modela a través de una función que mejor represente correlación espacial de una variable aleatoria regionalizada a través de supuestos de estacionariedad en base a funciones de semivarianza o covarianza (Giraldo, 2007).
3. Estimación de semivariograma, es un método propuesto por Matheron, es el más usado para la obtención del semivariograma empírico (también existe el método de máxima verosimilitud), llamado así porque representa el comportamiento real de los datos de una variable medida (Oliver & Webster, 2010). cuya ecuación se expresa como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (7)$$

Donde: $z(x_i), z(x_i + h)$ = representan los valores de la variable aleatoria Z, medida en los puntos $x_i, x_i + h$; $m(h)$ se refiere al número de pares comparados a una distancia h , cuya variación permite la construcción del semivariograma experimental (Oliver & Webster, 2010), como se ve en la figura 10.

Figura 10

Semivariograma para un fenómeno estacionario de segundo orden



Nota. Tomado de (Luna, 2007)

Cabe mencionar que la finalidad del semivariograma experimental es observar las características espaciales de la variable de estudio, cuyos elementos son: Rango (σ^2), representado por la distancia h , la cual corresponde a las observaciones que son dependientes espacialmente, más allá de este valor, se dice que la correlación espacial no existe (Wagner, 2003); el sill o meseta (C_1), representa el valor máximo de la semivarianza; y el efecto pepita (C_0), corresponde al error o ruido aleatorio al interior de la distancia mínima entre puntos de muestreo, este valor no debe ser mayor al 50 % (Luna, 2007), posteriormente se realiza el ajuste a un modelo teórico, ya que el empírico se construye a partir del conjunto de datos discretos medidos a intervalos de lag (distancia de paso h). Los parámetros mencionados anteriormente son ajustados a los siguientes modelos más comunes: esférico, gaussiano, lineal y exponencial, siendo este último el utilizado en esta investigación, el mismo que tiene la siguiente fórmula (Luna, 2007; Giraldo, 2007):

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(\frac{-3h}{a}\right) \right] \quad (8)$$

Donde: C_0 =efecto pepita, C_1 =meseta, h =distancia, a =rango

Por consiguiente los resultados que arroje el semivariograma teórico son fundamentales para realizar la predicción y así mismo establecer los errores de la misma, estos resultados no son comparables con parámetros previamente establecidos, debido a que el comportamiento es distinto en cada fenómeno o variable ambiental (Giraldo, 2007).

- 3.1. Para evaluar la bondad de ajuste, se utilizó el método de validación cruzada, consiste en suprimir una parte de los datos y con esos datos predecir los datos eliminados, por lo tanto es el valor que se predijo menos el observado, resultando el error de predicción (Giraldo, 2007).
4. Se realizó la predicción mediante kriging. En la literatura de geoestadística, se considera a la técnica Kriging como el mejor predictor lineal insesgado, es decir que es un predictor espacial óptimo debido a que es insesgado y posee varianza mínima (Oliver & Webster, 2010). En esta investigación, se utilizó el kriging ordinario para la realización de la predicción espacial. Esta técnica es una de las más usadas para la predicción de variables espaciales, el supuesto que se maneja es que la media es desconocida. Se hacen mediciones de la variable de interés Z en los puntos x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ de la región de estudio, con esto se puede estimar el valor de Z en un punto x_0 donde no existen mediciones y con los valores muestreados se puede calcular la predicción mediante la siguiente ecuación (Leiva, 2014):

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (9)$$

Donde: n = puntos de datos dentro de la vecindad local, λ_i = pesos de los valores originales (Leiva, 2014).

- 4.1. La predicción se estimó en una malla o grilla (grid) (Oliver & Webster, 2010). La grilla escogida es de 10 x 10 m de resolución espacial.

Finalmente la predicción kriging se compone de los pesos obtenidos del semivariograma, la técnica de muestreo, la anisotropía presente, el modelo teórico y la relación efecto pepita-meseta (Oliver & Webster, 2014). Los pesos son sensibles a la varianza pepita y a la anisotropía.

Para distribuir los pesos a cada punto, es necesario un radio de búsqueda óptimo (vecindario o vecindad) cumple con el propósito de asignar mayor peso al punto más cercano a predecir, lo que indica que kriging predice localmente (Oliver & Webster, 2010). Cuando un modelo de semivariograma está influenciado por un efecto pepita, los pesos son iguales y la estimación corresponde a la media de los valores de la vecindad de búsqueda (Giraldo, 2007). La influencia del rango, depende del tipo de modelo de variograma, indicando si el rango aumenta, los pesos aumentan cerca del valor objetivo. En el caso de tener una distribución irregular de los datos, se obtiene que el peso individual es mayor en los aislados y menos en los agrupados (Oliver & Webster, 2010).

5. Se obtiene un raster de la predicción del cual se calcula la biomasa de carbono orgánico en toneladas por hectáreas. Mediante las siguientes ecuaciones:

$$SOCD = SOC \times BD \times D \times (1 - \theta) \times 0.01 \quad (10)$$

Dónde: $SOCD$ = densidad de carbono orgánico ($\frac{kg}{m^2}$), SOC = concentración de carbono orgánico (%), BD = densidad aparente ($\frac{g}{cm^3}$), D = profundidad del suelo (cm), θ = porcentaje de grava gruesa, 0.01 es el factor de conversión de la unidad.

$$SOCS = \sum_{i=1}^n \frac{SOCD \times S}{1000} \quad (11)$$

Dónde: $SOCS$ = carbono orgánico almacenado (tn), S = área de píxeles en la interpolación en el mapa (km^2).

6. Finalmente se obtiene la validación del modelo geoestadístico y a su vez se determinó el error medio (ME) y error cuadrático medio (MSE), mediante el cálculo de las siguientes ecuaciones (Oliver & Webster, 2010):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \{z(x_i) - \hat{Z}(x_i)\} \quad (12)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \{(z(x_i) - \hat{Z}(x_i))^2\} \quad (13)$$

Dónde: N = es el número de datos, $z(x_i)$ = valor verdadero observado y $\hat{Z}(x_i)$ = valor estimado.

7. Se realizará una comparación entre la predicción obtenida con la plataforma Soil Grids (Global Soil Information).

Métodos de validación de datos

En primera instancia, para la validación de los datos analizados en las metodologías de la estimación de biomasa mediante alometría e imagen Radar y a su vez al modelo de predicción en suelo con la plataforma Soil Grids, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson, para determinar la fuerza y la dirección de la relación lineal entre las variables (Hernández *et al.*, 2018). La tabla 5 nos da la interpretación de la magnitud del coeficiente de correlación de Pearson.

Tabla 5

Interpretación del r de correlación lineal (Pearson)

Rango de valores de r_{XY}	Interpretación
$0.00 \leq r_{XY} < 0.10$	Correlación nula
$0.10 \leq r_{XY} < 0.30$	Correlación débil
$0.30 \leq r_{XY} < 0.50$	Correlación moderada
$0.50 \leq r_{XY} < 1.00$	Correlación fuerte

Nota. Tomado de (Hernández *et al.*, 2018)

Además, tiene el coeficiente de determinación r^2 , es un estadístico que sirve para medir la bondad del ajuste del modelo de regresión, su unidad varía de cero a uno (Díaz, 2015). Es de interpretación cualitativa y se lo obtiene elevando al cuadrado el coeficiente de correlación de Pearson.

Asimismo, se tiene la prueba de hipótesis t con la cual determinamos si dos valores numéricos obtenidos de un diseño estadísticamente válido son diferentes a un nivel de significancia dado, es decir calcula las discrepancias entre los valores de las dos variables de cada caso y difiere si la media rezaga de 0. Donde se acepta H_0 o se rechaza H_1 , dependiendo del t calculado y t crítico observado en tabla estadística t, verificamos en que zona se encuentra el estadístico t y podemos aprobar o rechazar la investigación, o si el tamaño de la muestra es el ideal y se acerca al valor de la zona total de estudio (Fallas, 2014).

$$H_0 = \text{media biomasa Alometría} = \text{media biomasa Radar (Independientes)}$$

$$H_1 = \text{media biomasa Alometría} \neq \text{media biomasa Radar (Dependientes)}$$

Finalmente, la prueba de hipótesis Chi Cuadrado, sirve para comparar si existen dependencia o independencia del valor observado y el valor estimado (Universidad Complutense de Madrid, 2012).

$$H_0 = X^2 \text{ calculado} < X^2 \text{ crítico (Independientes)}$$

$$H_1 = X^2 \text{ calculado} > X^2 \text{ crítico (Dependientes)}$$

Donde se acepta H_0 o se rechaza H_1 , dependiendo del X^2 calculado y X^2 crítico observado en tabla estadística Chi Cuadrado.

Estimación de carbono total y CO₂

Para concluir con la fase 3 se procedió a estimar el carbono total aéreo y del suelo mediante la ecuación según (Ordoñez *et al.*, 2001), expresado de la siguiente forma:

$$C_t = C_a + C_s \quad (14)$$

Dónde: C_t = Carbono Total, C_a = Carbono aéreo, C_s = Carbono del suelo

Además, se obtuvo el CO_2 equivalente mediante la ecuación según (Walker *et al.*, 2011):

$$CO_2equivalente = CAC * 3,67 \quad (15)$$

Dónde: $CO_2equivalente$ = Carbono equivalente, CAC = Carbono aéreo forestal

Estimación del valor económico

En la fase 4 de la investigación, se realizó la estimación del valor económico del almacenamiento de carbono total, para ello, se utilizó la ecuación mencionada por (Pelinco, 2019):

$$VE = tCO_2 * P \quad (16)$$

Dónde: VE = Valoración económica, tCO_2 = Toneladas dióxido de carbono fijadas en el bosque, P = Precio por cada tonelada de CO_2 , en este estudio será el valor de los CER (\$ 0,35 ctvs)

Los Certificados de Emisiones Reducidas (CER), también llamados bonos de carbono, fijan el precio en dólares americanos (US\$) por tonelada de CO_2 , en este caso se utilizó el valor de los CER para el año 2020, el cual es 0,30 euros transformado a dólares 0,35 ctvs en base al valor de la moneda (SENDECO2, 2020).

Diseño de las bases para la propuesta de política pública

Finalmente, la fase 5 de la investigación, constó en la identificación de problemas presentes en el área protegida que limita con la parroquia, así como el análisis de soluciones y finalmente con la ayuda de los resultados obtenidos en el proyecto, se deja sentado las bases de propuesta de política pública que se pueda implementar en la parroquia Fernández Salvador a favor de la conservación del área protegida.

Capítulo IV

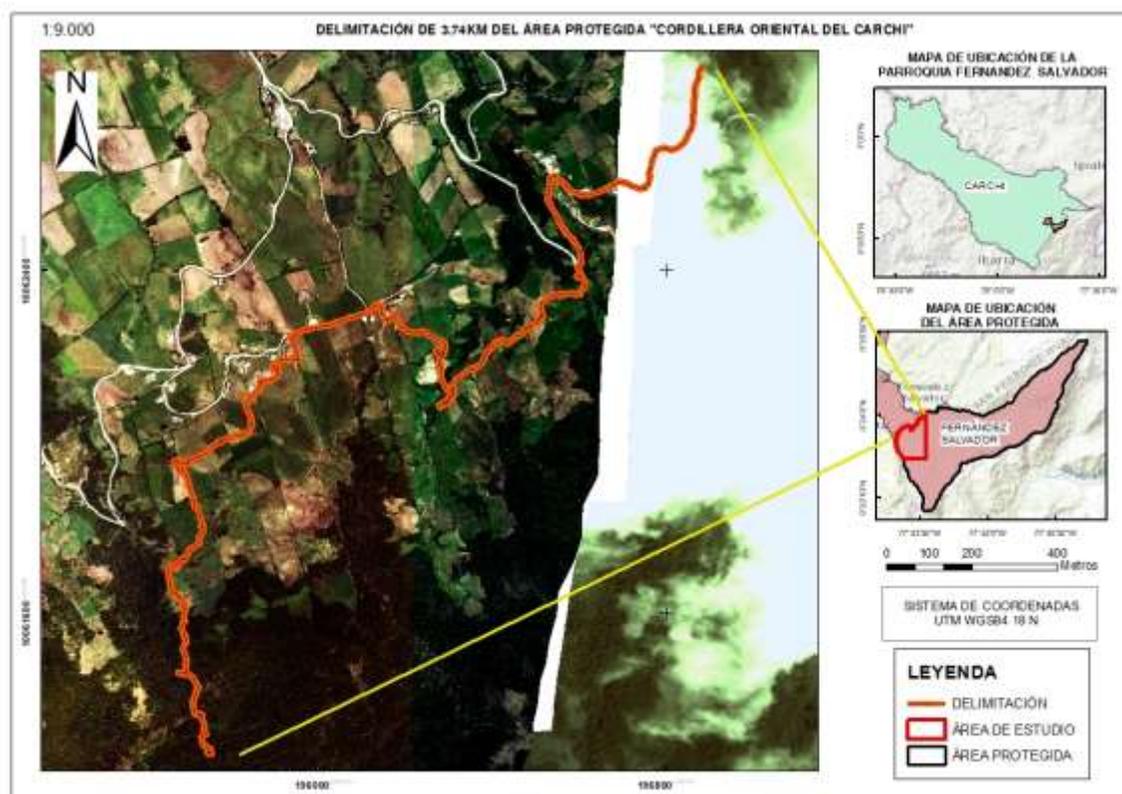
Resultados

El capítulo presenta los resultados del proyecto, que se encuentra completamente asociado al objetivo principal del mismo, el cual se basó en la estimación del valor económico de carbono en la biomasa aérea y biomasa de suelo, mediante salida a campo, ecuaciones alométricas e imágenes RADAR, además del modelamiento geoestadístico del carbono orgánico en el suelo, en el Área Protegida “Cordillera Oriental del Carchi”- Provincia del Carchi. Todo ello con el fin de que sirva como insumo para generación de propuestas de conservación, ya que los resultados evidencian la gran cantidad de carbono que almacena, tanto aéreo, como en suelo. Justificando la importancia de conservarla, por sus beneficios ambientales como reservorio de carbono.

En primera instancia tenemos la delimitación de 3,74 km del área protegida, mediante equipo GPS navegador (Ver figura 11). Se recorrió todo el camino mostrado en el mapa de color naranja, el cual demarca la zona entre la parroquia y el inicio del área protegida.

Figura 11

Delimitación de 3,74 km del área natural



Nota. Tomado de (CONALI, 2019)

Estimación de biomasa aérea

Se generaron los resultados del análisis de estimación de biomasa por alometría, mediante la salida a campo, obteniendo los datos dasométricos como DAP, altura y copa, seguidamente de las ecuaciones alométricas se estimó la biomasa para cada individuo, la biomasa por hectárea, el contenido de carbono aéreo y el CO_2 por hectárea, finalmente se generó un resumen para cada ecosistema.

Como observamos en las tablas 6 y 7, la estimación de biomasa aérea forestal mediante ecuaciones alométricas, en el ecosistema Bosque Siempre Verde tienen un valor máximo de 325,0 (tn/ha) y un valor mínimo de 115,5 (tn/ha) pertenecientes a las parcelas 9 y 24, respectivamente, con un promedio de 245,0 (tn/ha). Mientras que en el ecosistema Páramo tenemos un valor máximo de 205,7

(tn/ha) y un mínimo de 21,2 (tn/ha) de las parcelas 16 y 22, respectivamente, con un promedio de 68,1 (tn/ha). Lo cual nos muestra que en los dos ecosistemas hay presencia de biomasa forestal, siendo bueno para el almacenamiento de carbono, además se evidencia que existe mayor biomasa forestal en el ecosistema Bosque Siempre Verde con una diferencia en sus promedios de aproximadamente 177 (tn/ha).

Tabla 6

Estimación de biomasa por alometría en el ecosistema bosque siempreverde

Bosque Siempre verde Montano Alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes					
No. Parcela	DAP Promedio (cm)	Biomasa aérea forestal promedio (tn/árbol)	AGB (tn/ha) Ecuaciones Alométricas	Contenido de carbono aéreo	CO2 / ha
1	20,2	0,4	236,1	118,1	433,3
2	20,8	0,4	260,6	130,3	478,2
3	17,1	0,3	299,9	150,0	550,3
4	19,7	0,4	321,0	160,5	589,0
5	21,6	0,4	266,2	133,1	488,6
6	19,7	0,4	316,2	158,1	580,2
7	19,1	0,4	316,3	158,2	580,5
8	22,5	0,5	280,5	140,3	514,8
9	20,0	0,4	325,0	162,5	596,4
10	16,2	0,2	118,1	59,0	216,7
11	15,9	0,2	123,9	62,0	227,4
12	18,4	0,3	158,2	79,1	290,3
13	18,2	0,3	220,3	110,2	404,3
14	16,9	0,2	244,2	122,1	448,0
15	18,8	0,3	212,7	106,4	390,4
24	17,3	0,3	115,5	57,7	211,9
25	19,6	0,3	176,4	88,2	323,7
26	17,7	0,3	185,0	92,5	339,5
27	19,9	0,4	241,3	120,6	442,8
28	20,9	0,5	287,6	143,8	527,8
29	19,4	0,4	271,1	135,6	497,5
30	20,8	0,4	303,8	151,9	557,5
31	21,9	0,5	297,5	148,7	545,9
32	21,4	0,5	303,2	151,6	556,4

Tabla 7

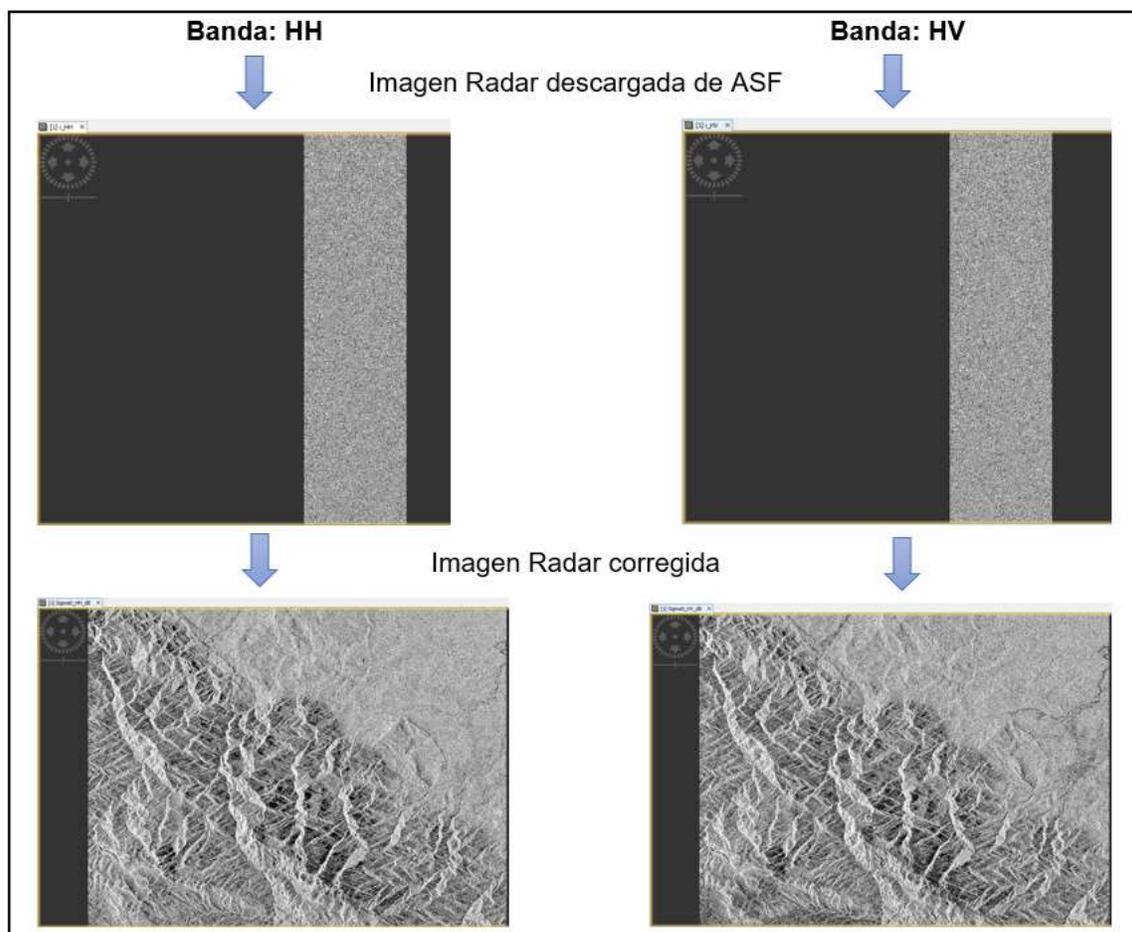
Estimación de biomasa por alometría en el ecosistema páramo

Rosetal Caulescente y herbazal del Páramo (Frailejones)					
No. Parcela	DAP Promedio (cm)	Biomasa aérea forestal promedio (tn/árbol)	AGB (tn/ha) Ecuaciones Alométricas	Contenido de carbono aéreo	CO2 / ha
16	19,0	0,32	205,7	102,9	377,5
17	28,5	0,11	83,6	41,8	153,4
18	23,7	0,04	80,0	40,0	146,8
19	29,7	0,03	53,9	26,9	98,8
20	35,1	0,02	43,0	21,5	78,9
21	30,3	0,02	30,1	15,1	55,3
22	26,3	0,01	21,2	10,6	39,0
23	30,1	0,02	27,7	13,9	50,8

En cuanto al resultado de la imagen Radar tratado y estandarizado en el capítulo de la metodología. En la figura 12 se muestra el proceso de la imagen Radar corregida radiométricamente, geométricamente y aplicada el filtro Speckler, dándonos las dos bandas de interés, para el posterior proceso en gabinete.

Figura 12

Proceso de corrección de imagen radar



Nota. El gráfico muestra las correcciones hechas a la imagen RADAR tomado de (ASF, 2011).

Seguidamente, obtuvimos los resultados de estimación de biomasa con imagen Radar, mediante el análisis de resultados previos como:

Los coeficientes obtenidos de la regresión no lineal en el programa SPSS, tanto en el Bosque Siempreverde Montano Alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes y el Rosetal Caulescente y herbazal del Páramo (Frailejones). A continuación, en las tablas 8 y 9 se presentan los coeficientes a_0 , a_1 , a_2 , a_3 y a_4 obtenidos:

Tabla 8

Coefficientes obtenidos para el ecosistema bosque siempreverde

Expresión Logarítmica para estimación de biomasa		
AGB	a0	3,777
	a1	0,409
	a2	0,023
	a3	-0,299
	a4	-0,008

Tabla 9

Coefficientes obtenidos para el ecosistema páramo

Expresión Logarítmica para estimación de biomasa		
AGB	a0	-0,064
	a1	-0,065
	a2	-0,026
	a3	-0,293
	a4	-0,004

Las regresiones no lineales aplicada en los dos ecosistemas, proporcionaron la relación entre la variable dependiente (Biomasa por ecuaciones alométricas) e independiente (niveles digitales de la imagen Radar), dándonos un modelo no lineal que, en contraste con el modelo lineal, la regresión propuesta puede estimar modelos con relaciones arbitrarias entre la variable dependiente e independiente. Con ello se obtuvieron los resultados de los parámetros (a0, a1, a2, a3, a4) de la ecuación 6, usando algoritmo de estimación iterativos a un intervalo de confianza del 95 %.

Además, el programa SPSS nos proporciona los resultados del análisis de la varianza (ANOVA), obteniendo un coeficiente de correlación ($r^2 = 0.069$) en el ecosistema Bosque Siempre Verde y ($r^2 = 0.694$) en el ecosistema Páramo. Las tablas 10 y 11 detallan las características del análisis ANOVA, para cada ecosistema:

Tabla 10

Análisis ANOVA en el ecosistema bosque siempreverde

ANOVA			
Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	831,5	5	166,3
Residuo	21,3	27	0,8
Total sin corrección	852,8	32	
Total corregido	22,9	31	
R²=0,1			

Tabla 11

Análisis ANOVA en el ecosistema páramo

ANOVA			
Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	128	5	25,6
Residuo	1,2	3	0,4
Total sin corrección	129,2	8	
Total corregido	3,8	7	
R²=0,7			

Se observa en las tablas anteriores, que desde una perspectiva estadística el ANOVA demuestra la aceptabilidad del modelo de regresión no lineal. La fila de regresión detalla información sobre la variación contabilizada por el modelo y la fila residual muestra información sobre la variación que su modelo no tiene en cuenta; observando que la suma de cuadrados de regresión en las dos tablas, es mayor que la suma de cuadrados residuales; demostrando que el modelo declara correctamente cualquier diferenciación existente en la variable dependiente (Biomasa por ecuaciones alométricas).

Los resultados de Estimación de Biomasa Arbórea mediante imagen Radar, se obtuvo mediante la ecuación 6, a través de los datos de campo y a su vez por ecuaciones alométricas de las 32 parcelas muestreadas, dentro de los 16 metros de resolución de la ALOS PALSAR. Las siguientes tablas 12 y 13

nos muestran: el promedio de los valores digitales correspondiente a cada banda, el logaritmo natural de la biomasa obtenida por alometría, la biomasa aérea obtenida mediante Imagen RADAR por parcela, con su respectivo contenido de carbono y CO_2 .

Tabla 12

Estimación de biomasa mediante imagen radar en el ecosistema bosque siempreverde

Bosque Siempre verde Montano Alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes						
No. Parcela	σ^0_{HH}	σ^0_{HV}	LN (AGB) tn/ha	Biomasa aérea forestal promedio (tn/árbol)	Contenido de carbono aéreo	CO₂ / ha
1	-15,4	-10,7	5,5	218,6	109,3	401,1
2	-10,5	-5,9	5,6	184,5	92,3	338,6
3	-10,9	-2,4	5,7	207,2	103,6	380,3
4	-17,9	-10,0	6,4	228,1	114,1	418,6
5	-17,5	-12,1	5,6	169,3	84,6	310,6
6	-13,5	-5,7	5,8	234,5	117,3	430,4
7	-16,8	-11,3	5,8	221,9	111,0	407,3
8	-16,5	-10,8	5,6	171,1	85,5	313,9
9	-10,4	-1,8	5,8	241,9	120,9	443,8
10	-17,0	-8,9	4,8	181,3	90,7	332,7
11	-18,6	-11,5	4,8	178,2	89,1	327,1
12	-17,7	-9,8	5,1	196,4	98,2	360,3
13	-15,2	-7,4	5,4	195,4	97,7	358,5
14	-16,5	-5,0	5,5	240,8	120,4	441,8
15	-18,4	-8,2	5,4	213,6	106,8	392,0
24	-14,4	-9,7	4,7	158,7	79,3	291,1
25	-13,8	-8,5	5,2	209,4	104,7	384,3
26	-15,6	-10,1	5,2	188,1	94,0	345,1
27	-17,1	-10,3	5,5	193,3	96,6	354,7
28	-13,4	-6,6	5,7	196,8	98,4	361,1
29	-17,6	-12,3	5,6	238,4	119,2	437,5
30	-17,6	-12,8	5,7	245,7	122,9	450,9
31	-18,2	-13,0	5,7	215,1	107,6	394,7
32	-17,9	-12,9	5,7	210,4	105,2	386,0

Como observamos en la tabla 12, la estimación de biomasa aérea cuenta con un valor máximo de 245,7 (tn/ha) y un valor mínimo de 158,7 (tn/ha), correspondiendo a las parcelas 24 y 30 respectivamente para el ecosistema Bosque Siempreverde, dándonos un promedio de 205,8 (tn/ha). Mientras que, la fijación de CO₂ tiene un rango desde 450,9 (tn/ha) y 291,1 (tn/ha), perteneciente a las parcelas mencionadas. Revelando que la fijación de carbono en este ecosistema es muy alta, en cuanto al almacenamiento de carbono en el reservorio natural.

Tabla 13

Mapa de estimación de biomasa aérea mediante radar en el ecosistema páramo

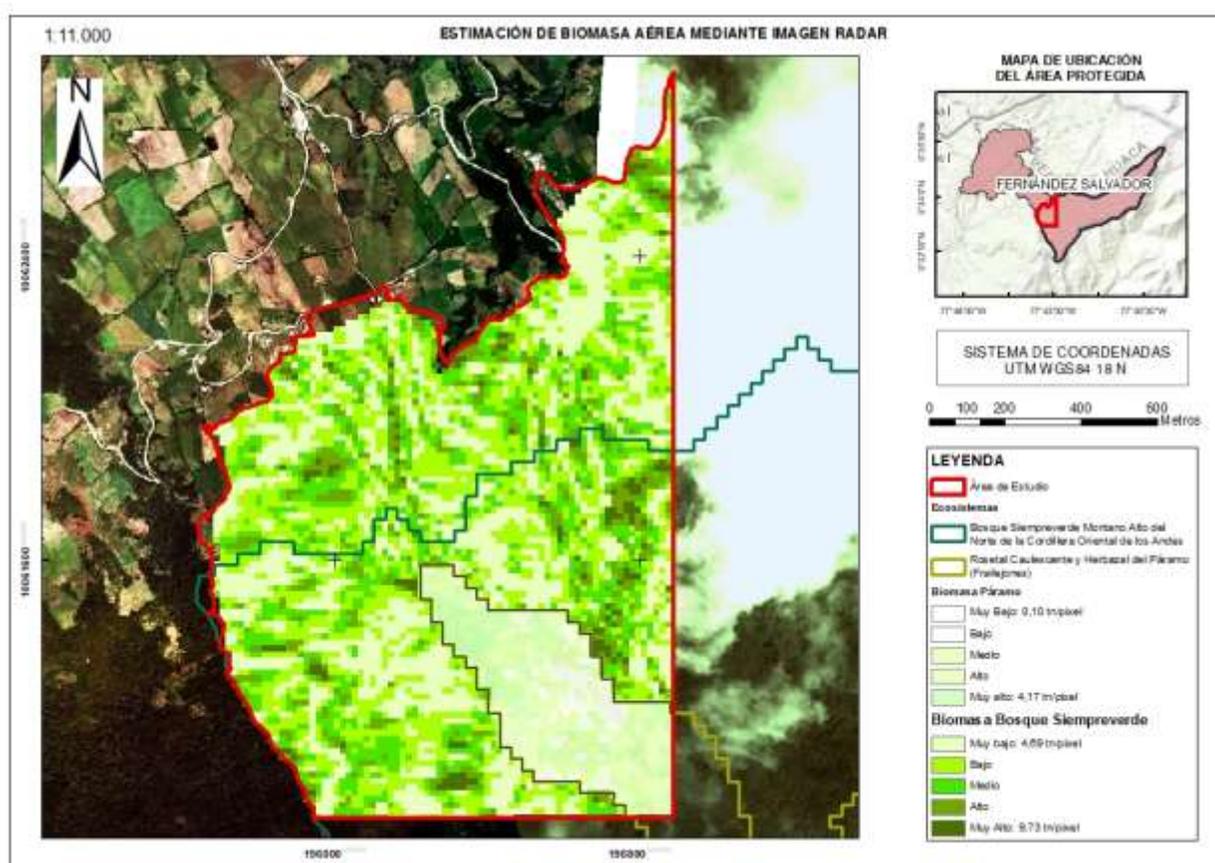
Rosetal Caulescente y herbazal del Páramo (Frailejones)						
No. Parcela	σ^0_{HH}	σ^0_{HV}	LN (AGB) tn/ha	Biomasa aérea forestal promedio (tn/árbol)	Contenido de carbono aéreo	CO ₂ / ha
16	-16,1	-7,1	5,3	109,6	54,8	201,1
17	-13,9	-4,7	4,4	92,5	46,2	169,7
18	-16,3	-8,7	4,4	69,4	34,7	127,4
19	-15,2	-10,0	4,0	68,7	34,4	126,1
20	-18,0	-12,0	3,8	35,6	17,8	65,4
21	-16,2	-9,3	3,4	58,0	29,0	106,4
22	-16,1	-11,0	3,1	41,7	20,8	76,4
23	-10,6	-4,0	3,3	79,9	40,0	146,7

En la tabla 13, la estimación de biomasa aérea cuenta con un valor máximo de 109,6 (tn/ha) y un valor mínimo de 35,6 (tn/ha), correspondiendo a las parcelas 16 y 20 respectivamente, con un promedio de 69,4 (tn/ha), con su fijación de CO₂ de 201,1 (tn/ha) y 65,4 (tn/ha), para el ecosistema Páramo de las mismas parcelas. Observamos en los datos, que de igual manera existe una relevancia en la biomasa y fijación de carbono, sin embargo, son valores mucho más bajos a comparación del ecosistema Bosque Siempreverde.

Finalmente, se realizó un mapa, que muestra una reclasificación de 5 clases, para el ecosistema Bosque Siempreverde y ecosistema Páramo, donde se visualiza las escalas de biomasa presentes en el área de estudio, además de la diferencia notoria en el cambio de biomasa en los dos ecosistemas (Ver figura 13).

Figura 13

Mapa de estimación de biomasa mediante imagen radar



Nota. Tomado de (CONALI, 2019; ASF, 2011)

La zona de estudio se caracteriza por tener en mayor parte de su área tonalidades verde oscuro y verde claro, demostrando que el bosque cuenta con materia orgánica aérea uniforme, cuyo valor más alto es de 9,7 (tn/ha) en cada pixel de resolución. Mientras que, en la zona perteneciente al ecosistema

Páramo se evidencia un color verde mucho más claro, debido a los pocos valores de biomasa obtenidos, donde el valor más alto es de 4,17 (tn/ha).

Resultados estadísticos de la comparación y validación de los métodos de cálculo de biomasa en el estudio.

A continuación, se detallan los valores de biomasa mediante el método por alometría e imagen RADAR, a los que posteriormente se hizo un análisis comparativo.

Tabla 14

Resultados de biomasa aérea mediante los dos métodos de estudio

Ecosistema	No. Parcela	Biomasa aérea forestal promedio (tn/árbol) - Ecuaciones Alométricas	Biomasa aérea forestal promedio (tn/árbol) - RADAR
	1	236,1	218,6
	2	260,6	184,5
	3	299,9	207,2
Bosque Siempre verde Montano	4	321,0	228,1
	5	266,2	169,3
	6	316,2	234,5
	7	316,3	221,9
Alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes	8	280,5	171,1
	9	325,0	241,9
	10	118,1	181,3
	11	123,9	178,2
	12	158,2	196,4
	13	220,3	195,4
	14	244,2	240,8
	15	212,7	213,6
	16	205,7	109,6
Rosetal Caulescente y herbazal del Páramo (Frailejones)	17	83,6	92,5
	18	80,0	69,4
	19	53,9	68,7
	20	43,0	35,6
	21	30,1	58,0
	22	21,2	41,7
	23	27,7	79,9

Ecosistema	No. Parcela	Biomasa aérea forestal promedio (tn/árbol) - Ecuaciones Alométricas	Biomasa aérea forestal promedio (tn/árbol) - RADAR
	24	115,5	158,7
Bosque Siempre verde	25	176,4	209,4
	26	185,0	188,1
	27	241,3	193,3
Montano Alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes	28	287,6	196,8
	29	271,1	238,4
	30	303,8	245,7
	31	297,5	215,1
	32	303,2	210,4

Se calcularon los estadísticos para cada método de estimación, los cuáles ayudaron a realizar una prueba de hipótesis t de dos medias y una correlación de Pearson.

Como se observa en la tabla 15, donde la variable uno presenta la estimación de biomasa mediante alometría, mientras que la variable dos mediante Radar, las medidas de tendencia central (media), toman valores cercanos en la estimación de biomasa de las dos metodologías (variable 1 y variable 2), demostrando que los datos tienen una distribución normal. El procedimiento de la prueba de hipótesis realizada calcula las diferencias entre los valores de las dos variables de cada caso y contrasta si la media difiere de 0, como muestra la tabla el estadístico t se encuentra dentro del valor crítico, indicando que los datos de biomasa del RADAR son dependientes de la biomasa de las ecuaciones alométricas, por lo tanto, están relacionados. En cuanto, al coeficiente de correlación de Pearson con un valor de 0,6 , comprueba según (Hernández *et al.*, 2018) una correlación fuerte entre los dos resultados de biomasa. Mientras que, la figura 14, nos muestra el modelo lineal con su respectivo coeficiente de determinación, el cual nos indica que el 35,6 % del carbono obtenido mediante imagen Radar se debe al carbono obtenido en campo.

Tabla 15

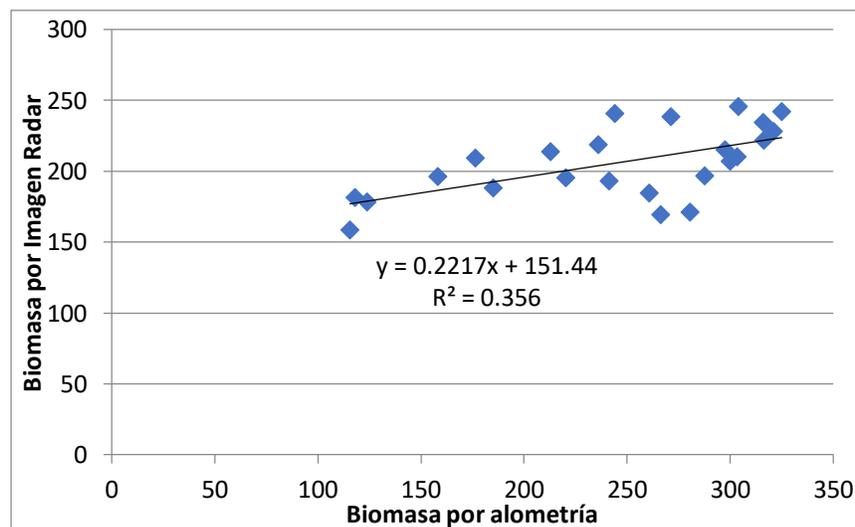
Prueba t para medias de dos muestras emparejadas del ecosistema bosque siempreverde

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	245,0	205,8
Varianza	4544,6	627,6
Observaciones	24	24
Coefficiente de correlación Pearson	0,6	
Diferencia hipotética de medias	23	
Grados de libertad	23	
Estadístico t	1,4	
P(T<=t) una cola	0,1	
Valor crítico de t (una cola)	1,7	
P(T<=t) dos colas	0,2	
Valor crítico de t (dos colas)	2,1	

Posteriormente se obtiene el diagrama de dispersión de datos para el ecosistema Bosque Siempreverde, que no permite observar la desviación de cada dato con respecto a la media (Ver figura 14).

Figura 14

Diagrama de dispersión del ecosistema bosque siempreverde



En la tabla 16, observamos la hipótesis nula que se acepta, referida a que la media de biomasa por alometría es semejante a la media de biomasa por Radar, es decir, los modelos son dependientes uno del otro, en el ecosistema Bosque Siempreverde.

Tabla 16

Tabla de aceptación o rechazo de la prueba de hipótesis t student

Ecosistema Páramo	
Hipótesis	$H_0 = \text{media biomasa Alometría} = \text{media biomasa Radar}$ (Independientes) $H_1 = \text{media biomasa Alometría} \neq \text{media biomasa Radar}$ (Dependientes)
Grados de libertad	23
Estadístico t	1,4
Valor crítico de t (dos colas)	2,1
Por lo tanto	$\text{media biomasa Alometría} = \text{media biomasa Radar}$
Se acepta	H_0
Se rechaza	H_1

Como se observa en la tabla 17, las medidas de tendencia central (media), toman valores aún más cercanos que en el ecosistema Bosque Siempre Verde de la estimación de biomasa de las dos metodologías (variable 1 y variable 2), demostrando de igual manera que los datos tienen una distribución normal. Como muestra la tabla el estadístico t también se encuentra dentro del valor crítico, indicando que los datos de biomasa del RADAR son dependientes de la biomasa de las ecuaciones alométricas, por lo tanto, están relacionados. En cuanto, al coeficiente de correlación de Pearson con un valor de 0,8 , que según (Hernández *et al.*, 2018) manifiesta una correlación fuerte entre los dos resultados de biomasa. Mientras que, la figura 15, nos muestra el modelo lineal con su respectivo coeficiente de determinación, el cual nos indica que el 59,3 % del carbono obtenido mediante imagen Radar se debe al carbono obtenido en campo.

Tabla 17

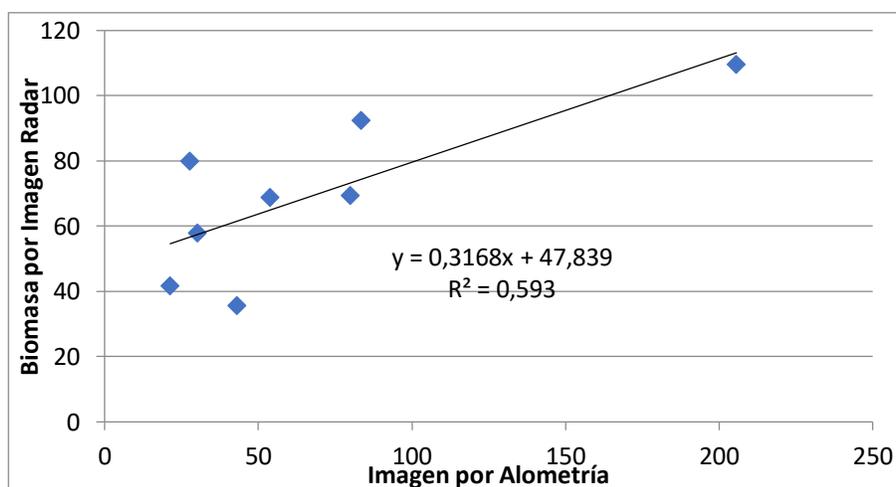
Prueba t para medias de dos muestras emparejadas del ecosistema páramo

	Variable 1	Variable 2
Media	68,2	69,4
Varianza	3631,6	614,3
Observaciones	8	8
Coefficiente de correlación de Pearson	0,8	
Diferencia hipotética de las medias	7	
Grados de libertad	7	
Estadístico t	-0,5	
P(T<=t) una cola	0,3	
Valor crítico de t (una cola)	1,9	
P(T<=t) dos colas	0,6	
Valor crítico de t (dos colas)	2,4	

La figura 15 muestra el Diagrama de dispersión para el ecosistema Páramo:

Figura 15

Diagrama de dispersión del ecosistema Páramo



En la tabla 18, observamos la hipótesis nula que se refiere a la media de biomasa por alometría es semejante a la media de biomasa por Radar, es decir, los modelos son dependientes uno del otro, en el ecosistema Páramo.

Tabla 18

Tabla de aceptación o rechazo de la prueba de hipótesis t student

Ecosistema Páramo	
Hipótesis	$H_0 = \text{media biomasa Alometría} = \text{media biomasa Radar}$ (Independientes) $H_1 = \text{media biomasa Alometría} \neq \text{media biomasa Radar}$ (Dependientes)
Grados de libertad	7
Estadístico t	-0,5
Valor crítico de t (dos colas)	2,4
Por lo tanto	$\text{media biomasa Alometría} = \text{media biomasa Radar}$
Se acepta	H_0
Se rechaza	H_1

Estimación de biomasa en suelo

Análisis exploratorio de datos

En la tabla 19 se indica, el resumen estadístico de los valores de las muestras de suelo de porcentaje de carbono orgánico. El rango de valores de las muestras es de 6,9. La media de localización es de 14,2. El coeficiente de variación es de 33 %, el cual indica gran dispersión de los datos, sin embargo, cuando el coeficiente de variación es mayor al 30 %, se dice que la media es poco representativa y esto se debe a que no se pudo obtener mayor cantidad de muestras en el área de estudio. El coeficiente de asimetría negativo es de -0,15, es un indicativo que la cola de la distribución se alarga para valores inferiores a la media.

Tabla 19

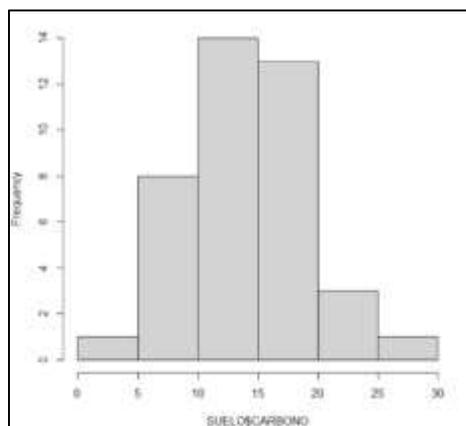
Resumen estadístico porcentaje de carbono orgánico (%)

Media	Des. Est	Rango	Coef. De Var.	Asimetría	Kurtosis	n
14,2	4,7	6,9	0,33	-0,15	-0,18	40

El histograma (Ver figura 16), presenta una distribución ligeramente normal, con inclinación a los valores inferiores a la media y con la ayuda del diagrama de caja se confirma que no existen valores atípicos. La base final fue constituida por 41 puntos.

Figura 16

Histograma de carbono orgánico (%)



En el análisis de los gráficos de dispersión (figura 17 y figura 18), de la variable con respecto a sus coordenadas Este y Norte dan una idea de la existencia de algún tipo de tendencia o deriva, especialmente, a lo largo de la dirección Norte, lo que hace suponer que la media no es constante en toda la región. Con respecto a la dirección Este no presenta tendencia.

Figura 17

Gráfico de dispersión este-carbono orgánico (%)

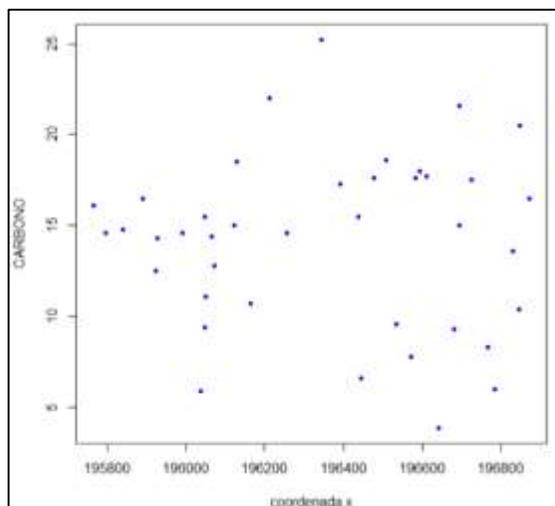
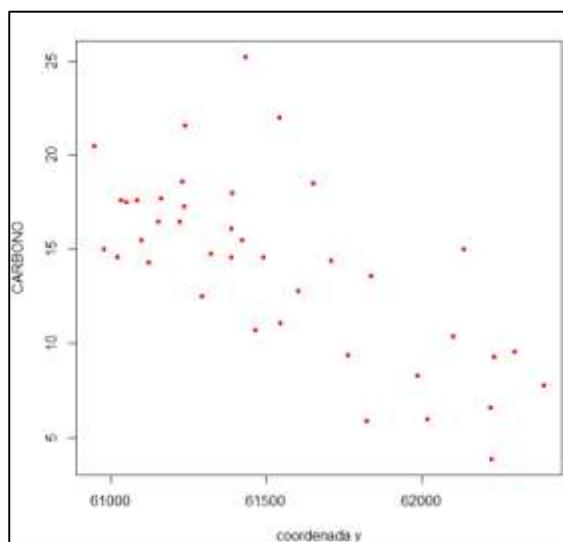
**Figura 18**

Gráfico de dispersión norte- carbono orgánico (%)



Análisis estructural

Semivariograma experimental

Para la construcción del variograma experimental omnidireccional, se utilizan 41 muestras de suelo y se considera como distancia de paso aproximada de 175 m, número de lag, 10, y tolerancia en distancia 50 m, la distancia máxima de la zona de estudio es de aproximadamente 3 km. Esto se determinó según la distribución de los puntos de muestreo.

El cálculo del variograma experimental omnidireccional se realiza en el programa R, paquete RGeostats.

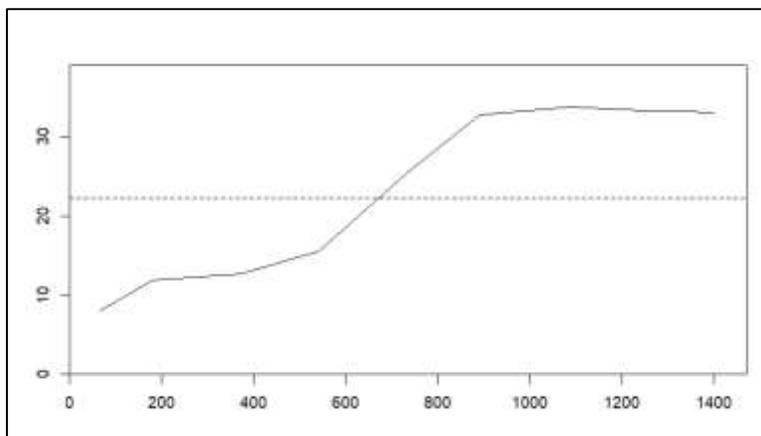
La función utilizada fue vario.calc.

En un primer análisis visual de la figura 19 se puede observar las siguientes características del variograma experimental que se generó:

- No presenta efecto pepita (nugget effect)
- El valor de alcance (rango) aproximado es de 1 400m
- El valor de la meseta (sill) aproximado es de 32,2 %
- La forma en el origen es parabólica (similar al modelo teórico Exponencial)
- Para la forma del variograma experimental, los modelos teóricos que podrían ajustar a esta estructura son: gaussiano, esférico, exponencial, cubico o estable.

Figura 19

Semivariograma experimental omnidireccional- carbono orgánico (%)



Ajuste del semivariograma experimental a un modelo teórico

Para ajustar el semivariograma experimental a un modelo teórico de las muestras de suelo, se ingresó los siguientes modelos en el software R Studio: gaussiana, esférica, exponencial, cubica y estable; así como el efecto pepita. Como resultado se obtiene, que el modelo teórico que mejor se ajusto es el modelo exponencial, con meseta de 32,2 % y rango de 1 448,8 m (Ver tabla 20 y figura 20). Es fundamental realizar este ajuste para que nuestra predicción sea óptima.

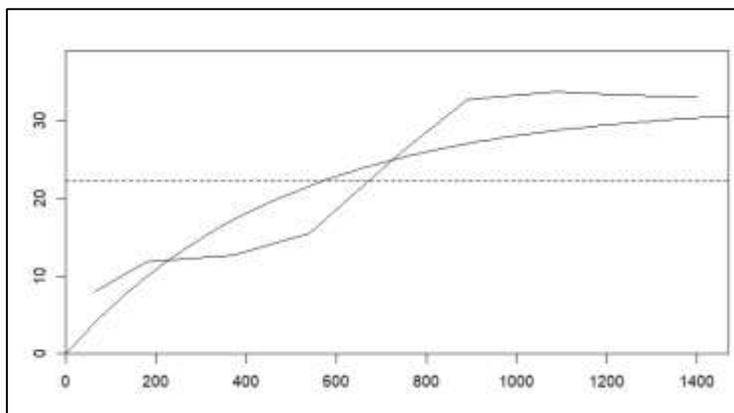
Tabla 20

Parámetros de estructura básica- carbono orgánico (%)

Estructura básica	Parámetros	
	Sill (meseta)	Rango
exponencial	32,2	1448,8

Figura 20

Semivariograma teórico omnidireccional- carbono orgánico (%)

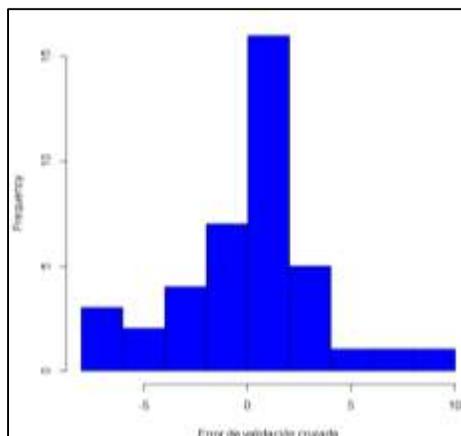


Validación cruzada

Se realizó la validación cruzada, a través de la función `xvalid`, del paquete `RGeostats`. como resultado se obtiene un histograma que indica los errores de validación cruzada en la predicción de carbono orgánico. La figura 21 indica que la mayor cantidad de cantidad de datos tiene un error de validación cruzada en el intervalo de $[-5, 5]$ (%), agrupándose entorno a cero, siguiendo aproximadamente una distribución simétrica.

Figura 21

Histograma de validación cruzada- carbono orgánico (%)



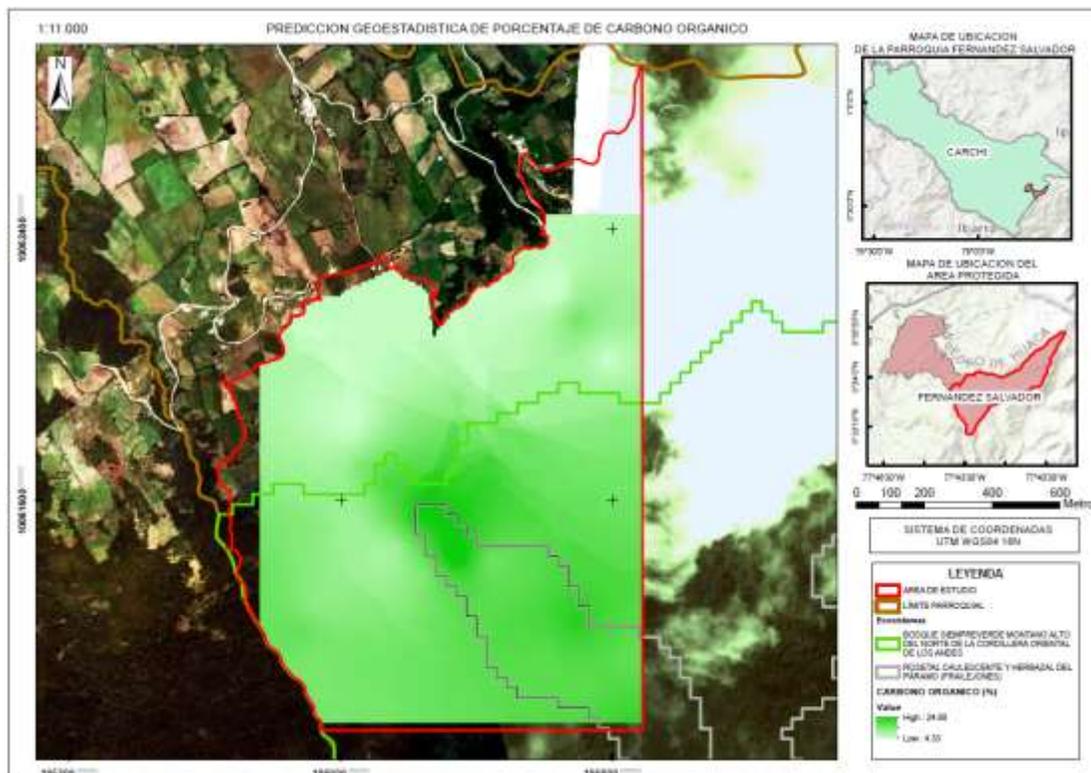
Predicción

La figura 22 muestra el mapa del modelo geoestadístico para la predicción del porcentaje de carbono orgánico para el área de estudio con una resolución espacial (grilla) de 10 x 10 m.

Las predicciones muestran que existe una variación entre 4,33 a 24,801 (%) de carbono orgánico, dentro del área de estudio.

Figura 22

Estimación de biomasa en suelo



Nota. Tomado de (CONALI, 2019)

Se obtiene como biomasa total del suelo 106 362,4 (tn) en 162,47 (ha) de área de estudio, asimismo podemos evidenciar la biomasa por ecosistema: En el ecosistema Paramo se obtuvo un total de 20 232,2 (tn) en 20,9 ha de área de estudio; En el ecosistema Bosque Siempreverde se obtuvo un total de 56 530,5 (tn) en 71,48 ha de área de estudio y en las zonas antrópicas un total de 29 599,6 (tn) en 59,13 ha de área de estudio (Ver tabla 21), mediante la ecuación 10.

Tabla 21*Estimación de biomasa en suelo por ecosistema*

Ecosistema	Área (ha)	Total de Biomasa (tn)
Páramo	20,9	20 232,2
Bosque Siempreverde	71,48	56 530,5
Zonas antrópicas	59,13	29 599,6
Total		106 362,4

En la tabla 22 muestra la estimación de carbono almacenado en suelo por ecosistema dentro del área de estudio, la cual indica que el Ecosistema Paramo almacena 156,61 (tn/ha); el Ecosistema Bosque Siempreverde almacena 128,49 (tn/ha) y las Zonas antrópicas almacena 81,33 (tn/ha). Obteniendo como resultado un total de 17 281,44 (tn) de carbono orgánico almacenado en el área de estudio, mediante la ecuación 11, aplicada a cada tipo de ecosistema con su área respectiva.

Tabla 22*Estimación de carbono almacenado en suelo por ecosistema*

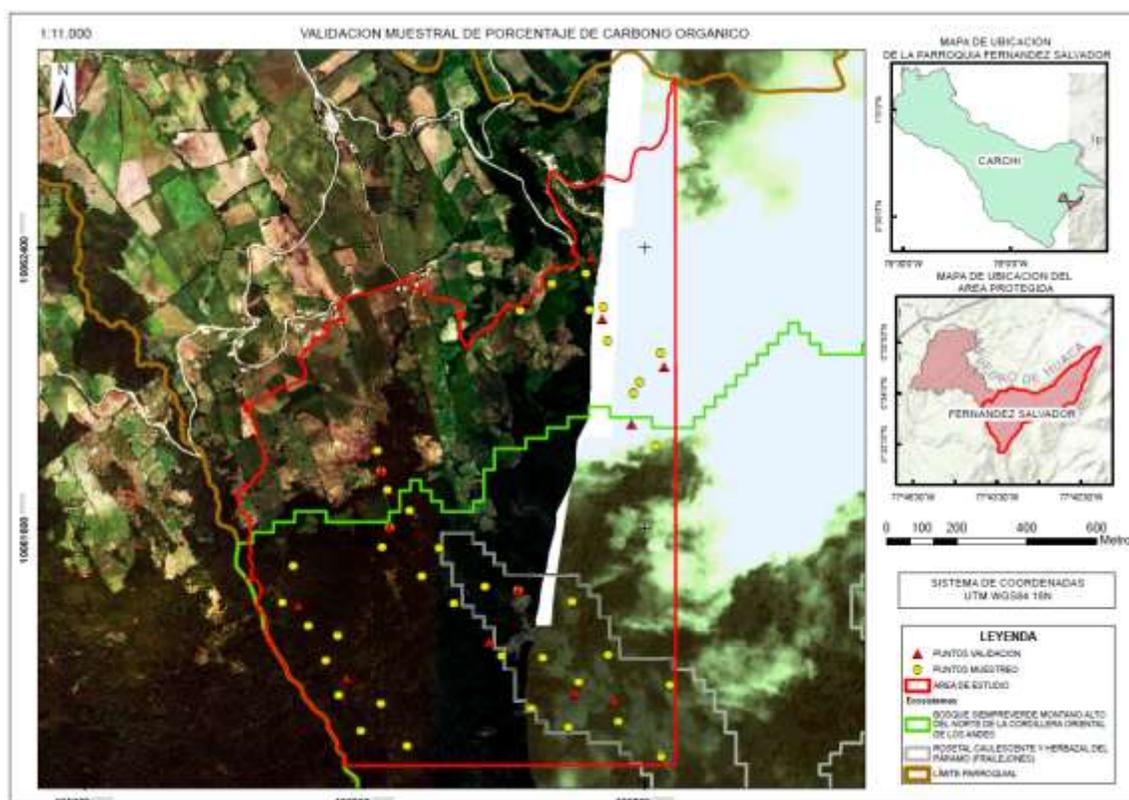
Ecosistema	Área (ha)	Carbono almacenado (tn/ha)	Total de carbono almacenado (tn)
Páramo	20,9	156,6	3 287,2
Biomasa en Bosque siempreverde	71,48	128,4	9 184,9
Zonas antrópicas	59,13	81,3	4 809,2
Total			17 281,4

Validación de modelo

Se consideró 12 muestras obtenidas aleatoriamente de la base de datos inicial, compuesta de 52 muestras, para realizar la validación. En la figura 23, se indica el mapa de los puntos de validación muestral.

Figura 23

Puntos de validación- carbono orgánico (%)



Nota. Tomado de (CONALI, 2019)

En la tabla 23 se muestra un resumen estadístico de la variable Error modelo. El rango de valores de las muestras es de 0,12. La media de localización es de -0,04. El coeficiente de asimetría negativo es de -0,50, es un indicativo que la cola de la distribución se alarga para valores inferiores a

la media. La kurtosis es de 5,2, mostrando que los datos presentan valores atípicos menos extremos que una distribución normal.

Tabla 23

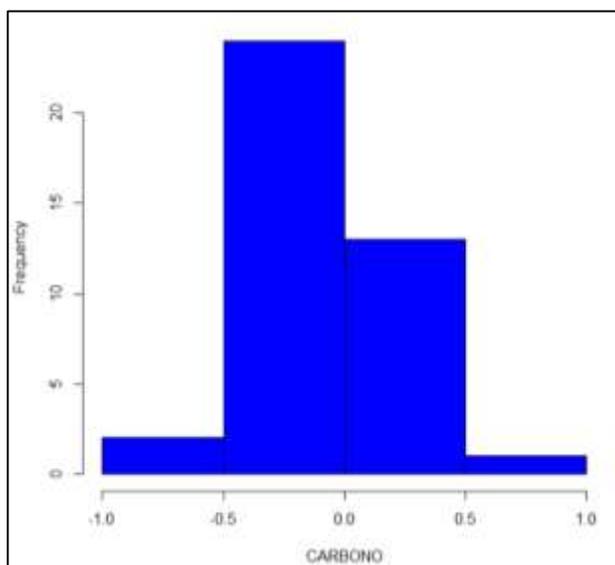
Resumen estadístico error modelo-carbono orgánico (g/kg)

Media	Des. Est	Rango	Asimetría	Kurtosis	n
-0,04	0,2	0,12	-0,50	5,1	40

La figura 24 indica el histograma de error del modelo, el mismo que representa que la mayor cantidad de errores se encuentra en el intervalo de [-0,5; 0,5].

Figura 24

Histograma error modelo- carbono orgánico (%)



En la tabla 24 se indica los errores de la predicción, indicando en el error cuadrático medio (MSE) una media de 0,05 y una desviación estándar de 0,1 y el Error Medio (ME) una media de -0,036 y

una desviación estándar de 0,2, resultando errores favorecedores para los valores obtenidos en campos comparándolos con los valores obtenidos de la predicción, ya que el error es menor a 1.

Tabla 24

Error medio (ME) y error cuadrático medio (MSE)

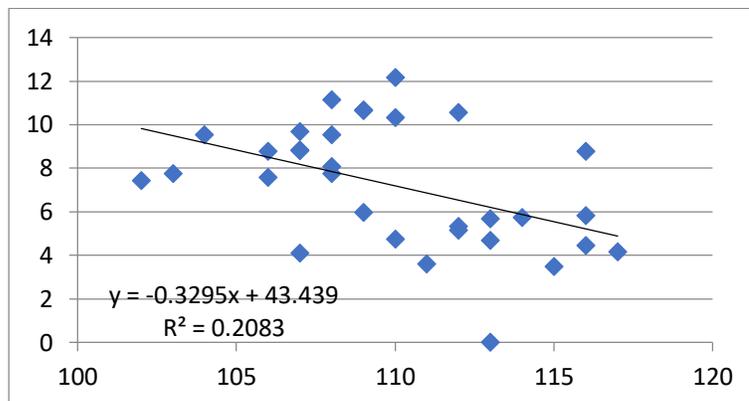
Modelo	Desv. Estándar	Media	Máximo	Mínimo
Error Medio (ME)	0,2	-0,03	0,7	-0,8
Geoestadístico				
Error Medio	0,1	0,05	0,7	0,000004
Cuadrático (MSE)				

Resultados estadísticos de la comparación y validación de los métodos de cálculo de biomasa en el estudio.

Se realizó una correlación de los valores obtenidos de la predicción de modelo de carbono orgánico junto con los valores de la plataforma Soil Grids en la que se obtuvo los siguientes resultados. Se obtuvo como coeficiente de correlación un valor de $r = 0,46$, el cual indica una baja correlación en los datos (Ver figura 25).

Figura 25

Diagrama de dispersión de la predicción de carbono orgánico tomado en campo vs plataforma Soil Grids



Se realizó una prueba de hipótesis Chi Cuadrado para comparar la distribución observada de los datos con una distribución esperada de los datos, obteniendo como resultado que los datos de la plataforma Soil Grids son independientes del carbono calculado en campo, por lo tanto, no están correlacionados.

Prueba de hipótesis Chi cuadrado

La prueba de hipótesis que utilizamos para correlacionar el modelo geoestadístico de los datos de carbono orgánico en el suelo obtenido en campo con los datos obtenidos de la plataforma Soil Grids es la prueba Chi cuadrado. Donde se acepta la hipótesis nula que se refiera que los modelos son independientes uno del otro (Ver tabla 25).

Tabla 25

Prueba de hipótesis Chi cuadrado de la predicción de carbono orgánico tomado en campo vs plataforma

Soil Grids

Predicción de carbono orgánico VS plataforma Soil Grids	
Hipótesis	$H_0 = X^2 \text{ calculado} < X^2 \text{ crítico}$ (Independientes) $H_1 = X^2 \text{ calculado} > X^2 \text{ crítico}$ (Dependientes)
Grados de libertad	34
X^2 calculado	35,0078
X^2 de valor crítico	48,602
Por lo tanto	$X^2 \text{ calculado} < X^2 \text{ crítico}$
Se acepta	H_0
Se rechaza	H_1

Estimación de carbono total y CO₂

La tabla 26, muestra los resultados de carbono y CO₂ aéreo que corresponde a 2 747,1 y a 10 081,8 (tn) respectivamente; carbono y CO₂ en suelo que corresponden a 17 281,4 y a 63 422,9 (tn) respectivamente. Obteniendo un CO₂ total de 73 504,7 (tn).

Tabla 26

Carbono total y CO₂

Aéreo	Suelo	Total (tn)
Carbono	Carbono	Carbono
2 747,1	17 281,4	20 028,5
CO₂	CO₂	CO₂
10 081,8	63 422,9	73 504,7

Estimación del valor económico

En la tabla 27 se identifica un valor económico de CO₂ total almacenado de \$ 25 726,64 para toda el área de estudio.

Tabla 27

Valoración económica del CO₂ total almacenado

CO ₂ TOTAL	Precio	Valoración económica
73 504,711	0,35	\$ 25 726,65

Diseño de las bases para la propuesta de política pública

Es necesario establecer un diseño de las bases para generar una propuesta de política pública, en bases a sus problemas y potencialidades, en la cual se plantean recomendaciones para que las autoridades del GAD Parroquial tomen en consideración la investigación realizada. En primer lugar se busca brindar diferentes técnicas agroproductivas para la recuperación de suelos agrícolas y ganaderos, en el cual se ven involucrados métodos de remediación del suelo como el empleo de humus de lombriz, también se recomienda el estudio de la calidad de uso de suelo en los distintos ecosistemas, tal que la comunidad adquiera el conocimiento para identificar la actividad que se puede realizar de acuerdo a cada uso del suelo, asimismo es importante que el GAD Parroquial declare a los bosques protectores como área de conservación para evitar el avance de asentamientos humanos y formar grupos de seguridad ambiental también llamados guardaparques que vivan cerca del área protegida y sean habitantes de la parroquia. Finalmente, se busca el resguardo del reservorio natural de carbono, el cual tiene como problema la extracción ilegal de carbón, por ende, el estudio realizado da por evaluado la importancia del carbono total almacenado en el área protegida, por lo que se propone generar un programa de conservación y protección del área protegida con la cooperación de ONG'S ambientales públicas o privadas.

Se espera que estas recomendaciones sirvan como propuestas de política pública ambiental, en bienestar de la conservación del área protegida y también a favor del desarrollo de la parroquia.

En tabla 28 se identifican un breve resumen de los problemas, análisis de soluciones y la recomendación de política pública que pueden ser implementadas en la parroquia y el área protegida.

Tabla 28

Análisis de propuesta de política pública

Identificación de los problemas	Análisis de soluciones	Recomendación de política pública
Avance de la frontera agrícola	Debido al desconocimiento de la población se delimitó 3,74 km del área protegida, siendo el límite del área de conservación y la parroquia.	Brindar diferentes técnicas agroproductivas para la recuperación de suelos agrícolas y ganaderos. Estudio de la calidad de uso de suelo en los distintos ecosistemas.
Avance de asentamientos humanos	Deforestación	Declaratoria de la parroquia a los bosques protectores como área de conservación.
Extracción ilegal de carbón	Guardaparques	Formación y contratación de guardaparques constituidos por

Identificación de los problemas	Análisis de soluciones	Recomendación de política pública
	<p data-bbox="521 898 992 995">Conservar y cuidar el reservorio natural de carbono.</p>	<p data-bbox="1040 365 1398 470">la comunidad aledaña al área protegida.</p> <p data-bbox="1040 541 1398 716">Actualizar y desarrollar el plan de manejo ambiental del área protegida.</p> <p data-bbox="1029 787 1409 1031">Investigación sobre la determinación del carbono almacenado en el suelo de toda el área protegida</p> <p data-bbox="1024 1102 1414 1346">Programa de conservación y protección del área protegida con la cooperación de ONG'S ambientales públicas o privadas.</p>

Capítulo V

Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones del proyecto, que se encuentran directamente asociadas a los objetivos y metas planteadas.

Según (Tipper *et al.*, 1999), mencionan que los bosques en general poseen altas tasas de desarrollo y los procesos fotosintéticos son más efectivos, por ejemplo en la captura de CO₂ y la fijación de carbono, la misma que se fija en sus ramas, hojas, corteza, raíces. Por lo que en este estudio se evidenció un alto contenido de CO₂ total almacenado de 73 504,7 (tn) en 162,4 ha de superficie de área de estudio, resultando un valor económico de \$ 25 726,65.

La determinación de CO₂ total almacenado en el área protegida se realizó mediante: obtención de carbono orgánico en la parte aérea y carbono orgánico en el suelo.

Se logró cumplir con todos los objetivos y metas planteadas en el inicio del proyecto, las cuáles fueron: la recopilación y levantamiento de la información satelital y arbórea de la zona de estudio, cuyos resultados fueron: una imagen ALOS PALSAR procesada con sus respectivas polarizaciones HH y HV (Ver figura 12), y una base de datos con los respectivos valores (Anexo 1). Toda la información obtenida fue necesaria para crear los modelos y mapas de estimación de biomasa aérea. Los cuáles fueron almacenados en una geodatabase (Anexo1).

Se evidenció lo importante que es el tamaño de la parcela en el proceso del modelo de biomasa mediante Radar, debido a que las parcelas deben ser lo suficientemente grandes para que tengan la variabilidad local y minimizar los errores por el tipo y densidad de los árboles. Siendo el primer ecosistema el que más variabilidad de especies arbóreas presentó.

En el primer método de estimación de biomasa aérea mediante ecuaciones alométricas, se generó como resultado: 32 registros de campo para la estimación por alometría (Ver anexo 1), 3 mapas temáticos, correspondiente a los puntos de muestreo arbóreo de las parcelas y la estimación de

biomasa, y finalmente 2 tablas de resultados, de los resultados en campo y comparación con la Imagen Radar (Ver anexo 1). Además, se encontraron 17 especies en el Bosque y 8 en Páramo.

En el segundo método de estimación de biomasa aérea mediante Radar, se necesitó de la estimación de biomasa alométrica como variable independiente, posteriormente se ajustó a un modelo de regresión no lineal, la misma que es usada por (Quijano *et al.*, 2016), en el cual se obtiene un coeficiente de determinación r^2 semejante al obtenido en el proyecto con un valor de $r^2 = 0,069$ en el ecosistema Bosque Siempre Verde y $r^2 = 0,694$ en el ecosistema Páramo (Ver tabla 10 y 11).

Una vez examinado los resultados de biomasa aérea por alometría y Radar, mediante el análisis del coeficiente de correlación de Pearson, se concluye que: en el primer ecosistema perteneciente a Bosque Siempre verde Montano Alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes existe menor correlación a diferencia que en el ecosistema Rosetal Caulescente y herbazal del Páramo (Frailejones), debido a la dispersión de datos por la gran cantidad de biomasa generada en toneladas de hectárea en el primer ecosistema, a diferencia de la poca biomasa medida en el Páramo. Asimismo, cabe señalar que el modelo puede diferir de la realidad, por la variabilidad en el tiempo.

Existe una diferencia a la hora de comparar los resultados de biomasa aérea por ecosistema, debido a que (Torres *et al.*, 2020), menciona que en un Bosque Siempreverde Montano el rango de biomasa se encuentra entre 246,8 – 320,9 (tn/ha). Mientras que en el Páramo, (Castañeda *et al.*, 2017) estima su biomasa entre 13,21–183 (tn/ha). Concordando los resultados bibliográficos con los obtenidos en nuestro estudio, ya que, en la estimación de biomasa aérea forestal, en el ecosistema Bosque Siempre Verde se obtuvo un promedio de 245,0 (tn/ha) y 205,8 (tn/ha), mientras que en el ecosistema Páramo obtuvimos un promedio de 68,1 (tn/ha) y 69,4 (tn/ha), mediante ecuaciones alométricas e imagen RADAR, respectivamente.

Se obtuvo el modelo de predicción de la variable de carbono orgánico en el suelo, para el área protegida “Cordillera Oriental del Carchi”, mediante herramientas geoestadísticas con el uso del

paquete RGeostat de R. La validación cruzada, los errores de predicción y la validación del modelo con puntos externos, muestran que el modelo de predicción tiene un buen nivel de precisión a pesar de no contar con una base de datos de suelo más robusta.

Se obtuvo el modelo de predicción de la variable de carbono orgánico en el suelo, para el área protegida “Cordillera Oriental del Carchi”, mediante el empleo de técnicas geoestadísticas, junto con el software R Studio.

Los errores de predicción obtenidos por la validación cruzada, el error medio y error cuadrático medio, indican que los valores de predicción son fiables para lograr un buen modelamiento, a pesar de que es necesario mayor número de muestras.

Se generaron mapas del carbono orgánico en suelo, a través del raster obtenido de esta variable, en nodos de una malla de 10 x 10 m.

Los resultados de porcentaje de carbono orgánico obtenidos de la predicción realizada varían en un intervalo de 4 a 24 %, las mismas se reportan como altos, debido a que se clasifican en: > 3 % altos, de 1,5 % a 3 % medios y < 1 % (Núñez, 2000).

Los valores de carbono orgánico almacenado obtenido oscila entre 81,3 (tn/ha) a 156,6 (tn/ha), valores que se encuentran dentro del rango reportado en (Terán et al., 2019) para suelos del Carchi donde el contenido de carbono orgánico varía entre 51,7 a 129,5 (tn/ha).

En cuanto al carbono orgánico almacenado, se observa que el carbono orgánico aumenta hacia el centro y disminuye en los límites superiores (Ver figura 22). Dando una interpretación física a esta característica del modelo y con la ayuda de un mapa ecosistémico, se puede afirmar que el de carbono orgánico es modelado por el tipo de ecosistema, así lo menciona (Haro, 2012) en su estudio, el cual hace referencia a que conforme aumenta la altitud, de la misma manera aumenta el carbono orgánico en el suelo, esto se debe a la gran cantidad de materia orgánica viva en descomposición.

Con respecto a la correlación entre los datos obtenidos en la predicción geoestadística de carbono orgánico con la plataforma Soil Grids, se puede inferir que los valores de la plataforma no son representativos para la estimación de carbono orgánico y esto se debe a distintos factores, por ejemplo la resolución espacial de Soil Grids es de 250 m a comparación a la resolución utilizada de 10 m, siendo de mayor precisión, otro factor es la poca información de los modelos matemáticos que utiliza Soil Grids para estimar el carbono orgánico. Así lo menciona el estudio realizado por (Hengl *et al.*, 2017), el cual hace alusión que se están desarrollando investigaciones en métodos para la fusión multiescala de las predicciones de Soil Grids con productos de suelo locales y/o nacionales por ejemplo a resoluciones espaciales de 50 m, de tal manera que se pueda predecir información global sobre suelos cada vez más precisa y consistente.

Como se evidencia en los resultados (Ver tabla 26), los valores de biomasa son mayores en suelo, a comparación de la biomasa aérea. (Castañeda *et al.*, 2017) en su investigación, ratifican que el componente que almacena mayor cantidad de carbono es el suelo (FAO, 2017).

Recomendaciones

La investigación verifica que la plataforma Radar se puede utilizar para extender la estimación de biomasa de un área local a una regional, con la ayuda de inventario forestales, y el apoyo de otras bandas u otras plataformas Radar con el fin de mejorar los datos. Sin embargo, es recomendable estimar biomasa mediante imagen Radar, por ecosistemas, ya que la variabilidad de las especies es muy notable, por lo tanto, varía la biomasa en gran cantidad por su fuste y ramas, lo que puede generar valores atípicos demasiados grandes, que distorsionen la realidad.

Se debe elegir adecuadamente el diseño de muestreo en campo, tomando en cuenta el tipo de ecosistema que a su vez generan diversos factores como; la densidad del bosque, las barreras geográficas, barreras antrópicas, etc. Las cuales crean dificultades al momento de la toma de los datos. Asimismo, es importante el tamaño de la parcela, que nos provee la calibración o construcción de los

modelos de estimación, ya que las más grandes minimizan los efectos de borde de parcela, relacionadas con la incertidumbre en la inclusión o exclusión del fuste de un árbol.

Se recomienda el uso de modelos geoestadísticos para identificar valores en sitios donde sea inaccesible el muestreo, de esta manera el costo de la investigación disminuye sustancialmente.

El desarrollo de este proyecto ha permitido emplear distintas metodologías en el análisis de la estimación del carbono total, sin embargo, se puede considerar más variables para el análisis de la estimación de los bienes y servicios de un área protegida.

Dado los resultados de carbono total almacenado obtenidos en la presente investigación, podemos concluir y recomendar que el área protegida “Cordillera Oriental del Carchi” es un reservorio natural rico en carbono orgánico por lo tanto, es fundamental la conservación del área, ya que, gracias a este recurso, sus ecosistemas son fuentes de biodiversidad y la población se ve beneficiada directamente por el recurso hídrico y suelos ricos en nutrientes, ayudando directamente a los cultivos, por tal motivo, se recomienda hacer un análisis de soluciones con las autoridades pertinentes.

Esta la investigación es de gran utilidad para evidenciar las problemáticas y posibles soluciones que podemos brindar a las parroquias que contienen un área protegida dentro de sus territorios, y desconocen los beneficios que las mismas les pueden aportar. Por consiguiente, tanto la comunidad como las autoridades pertinentes, deben trabajar conjuntamente en el cuidado y manejo de las áreas de conservación.

Las recomendaciones de política pública no se encaminan en pedir ni ofrecer dinero a la parroquia, ya que se han ido acostumbrando a solo recibir un rubro económico por conservar, pero que al final no han sabido cómo administrarlo. Nuestra recomendación va encaminada en transmitirles el conocimiento de porque es importante conservar el área protegida y los ecosistemas que lo integran. Por lo tanto es fundamental el acercamiento y exposición de esta investigación a ONG’S ambientales públicas y privadas, para que conozcan acerca de las riquezas que esta área protegida ofrece al medio

ambiente y a la lucha contra el cambio climático, de tal forma que se realice un trabajo conjunto con las comunidades a favor del desarrollo de la parroquia, brindando la posibilidad de crear proyectos de cooperación por ejemplo en la adquisición de terrenos para realizar actividades agroproductivas entre otros.

Referencias Bibliográficas

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2015). *El suelo y el cambio climático*. 1–6.
- Aguilar, H., Mora, R., & Vargas, C. (2014). Atmospheric Correction Methodology for Aster, Rapideye, Spot 2 and Landsat 8 Images With Envi Flaash Module Software. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53), 1–22.
- Álvares, A. C. (2015). Promoción de la Conservación de Bosque Natural de Roble mediante el pago por el Servicio Ambiental de Almacenamiento de Carbono: Un Ejercicio de Optimización Dinámica Aplicado en el Corredor Ecológico Guantiva-La Rusia- Iguaque (Colombia. *Serie Documentos Cede*, 34(April), 76.
- Armenteras, D., González, T. M., Vergara, L. K., Luque, F. J., Rodríguez, N., & Bonilla, M. A. (2016). Revisión del concepto de ecosistema como “unidad de la naturaleza” 80 años después de su formulación. *Ecosistemas*, 25(1), 83–89. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-1.12>
- ASF. (2011). *Imagen RADAR*. [https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=ALOS&polygon=POLYGON\(\(-77.748 0.5864,-77.7163 0.5864,-77.7163 0.6124,-77.748 0.6124,-77.748 0.5864\)\)&zoom=10.370¢er=-77.538,0.392&resultsLoaded=true&granule=ALPSRP242447190-KMZ](https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=ALOS&polygon=POLYGON((-77.748 0.5864,-77.7163 0.5864,-77.7163 0.6124,-77.748 0.6124,-77.748 0.5864))&zoom=10.370¢er=-77.538,0.392&resultsLoaded=true&granule=ALPSRP242447190-KMZ)
- Ashley, R., Russel, D., & Swallow, B. (2006). The policy terrain in protected area landscapes: challenges for agroforestry in integrated landscape conservation. *Biodiversity and Conservation*, 15, 663–689.
- Astudillo, K. (2019). *Valoración Económica Del Parque Perla Ubicado En La Ciudad De Lago Agrio*.
- Astudillo, K., & Rodríguez, F. (2020). Valoración económica de los servicios ambientales del parque ecológico recreacional La Perla. *Revista Geoespacial*, 17(1), 39–58.
- Azqueta, D. (2007). Introducción a la economía ambiental. In *British Journal of Cancer* (Vol. 25, Issue 3).
- Boada, C., & Campaña, J. (2008). Composición y diversidad de la flora y la fauna en cuatro localidades de la provincia del Carchi. *Poder Gráfico*, 109. http://www.paramo.org/dvd/Paramo Andino Ecuador/COMPONENTE 4/4C/libro Estudio Rapido Carchi/Carchi Final_2.pdf#page=9
- Botkin, D. B., & Keller, E. A. (2011). *ENVIRONMENTAL SCIENCE Earth as a Living Planet*.
- Brown, S., Gillespie, A. J. R., & Lugo, A. E. (1989). Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science*, 35(4), 881–902.
- Burgos, G. (2008). Políticas públicas y el medio ambiente. *Ecological Culture*, 21, 141–151.
- Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista Digital Universitaria* 10, 8(10), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.04.002>
- Calvo, A. J. (2017). *Biomasa , carbono y CO 2 equivalente acumulado en una cronosecuencia de bosque seco tropical en el Parque Nacional Santa Rosa , Costa Rica y el Parque Estadual de Mata Seca , Brasil* . 107. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9224/biomasa-carbono-co-equivalente-acumulado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cano, O., Vela, G., Acevedo, O. A., & Valera, M. Á. (2020). Organic carbon concentrations in the woodland and soils of the protected natural area “El Faro” in Tlalmanalco, Estado de Mexico. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 895–905. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.757>

- Carvajal, A. F., Feijoo, A., Quintero, H., & Rondón, M. A. (2009). Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *Revista de La Ciencia Del Suelo y Nutricion Vegetal*, 9(3), 222–235. <https://doi.org/10.4067/s0718-27912009000300005>
- Casella, A., Barrionuevo, N., Pezzola, A., & Winschel, C. (2018). *Pre-procesamiento de imágenes satelitales del sensor sentinel 2A y 2B con el software SNAO 6.0*. 1–31. https://inta.gob.ar/sites/default/files/tutorial_snap_preproc_acasella_et_al_2018_inta.pdf
- Castañeda, A. E., & Montes, C. R. (2017). Carbono almacenado en páramo andino. *Entramado*, 13(1), 210–221. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25112>
- Challenger, A. (2001). Estrategias para la conservación de ecosistemas. *Gaceta Ecológica*, 61, 22–29.
- Chou, S. W., & Gutiérrez, E. E. (2013). Ecuación para estimar la biomasa arbórea en los bosques tropicales de Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 26(2), 41. <https://doi.org/10.18845/tm.v26i2.1402>
- Chuncho, C., & Chuncho, G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), 71–83.
- Chuvienco, E. (2008). *Teledeteccion ambiental.pdf* (p. 576).
- Chuvienco, Emilio. (1990). *FUNDAMENTOS DE TELEDETECCION ESPACIAL* (p. 449). <http://cursosihlla.bdh.org.ar/Sist. Cart. y Teledet./Bibliografia/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>
- CONALI. (2019). *Limite Conali Parroquias*.
- CONDESAN. (2018). Carchi Protege su agua y sus bosques. *Un Área Protegida Para Asegurar Nuestra Agua En El Futuro*, 1–5.
- COOTAD. (2010). Código Orgánico Organización Territorial Autonomía Descentralización COOTAD. *Registro Oficial Suplemento 303 de 19-Oct-2010*, 2, 174.
- Daily, G. . (1997). *Nature's services: Societal dependence on ecosystem services*. (Island Pre).
- de Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. . (2002). Una tipología para la clasificación, descripción y valoración de las funciones, bienes y servicios del ecosistema. *Ecological Economics*, 41, 393–408.
- De la Peña, A., Rojas, C. A., & De la Peña, M. (2010). Valoración económica del manglar_Colombia. *Clío America*, 4(7), 133–150.
- DFM. (2016). *Tabla de Densidad de Madera*. Directorio Forestal Maredero. <https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/tabla-de-densidad-de-maderas.html>
- Díaz, G. (2012). El cambio climatico. *Ciencia y Sociedad*, 37, 227–240.
- Díaz, J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. *Universidad Complutense De Madrid, Junio*, 25. https://eprints.ucm.es/id/eprint/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- Effantin, R., & Gramajo, E., S. (2002). Del avance de la frontera agrícola al manejo forestal comunitario: Petén, Guatemala. *Caravelle*, 79, 43–68.
- El Comercio. (2018). *11 provincias del Ecuador se integran a favor del páramo*.

- Espinoza, O. (2009). Reflexiones sobre los conceptos de “política”, políticas públicas y política educacional. *Revista Académica Evaluada Por Pares*, 17, 1–14.
- Estupiñán B., L. H. (2001). Los páramos, ecosistemas para conservar. *UDCA*.
- Fallas, J. (2014). Pruebas de Hipotesis. *Creative Commons*, 161–167.
http://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-2/complementarias/prueba_hipotesis_2012.pdf
- FAO. (2017). *Carbono orgánico del suelo, el potencial oculto*.
- Feijoó, C., Francis, E., Milena, C., Fanny, H., Danny, R., Jorge, J., Moreno, J., Magaly, Y., Víctor, E., & Darwin, P. (2019). Propiedades físicas y características anatómicas de la madera de *Cinchona officinalis* (L.) Ruiz y *Cinchona macrocalyx* Pav. ex DC en relictos boscosos al sur de Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 9(1), 94–109.
<https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/590/528>
- GAD PARROQUIAL. (2019). *Actualización del PD y OT, Gestión 2014-2019*.
- GAD Parroquial Fernández Salvador. (2020). *ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO DE LA PARROQUIA FERNÁNDEZ SALVADOR*. 1–275.
- Garitacelaya, S., Gómez, N., López, M., & Avilés, R. (2006). TEORÍA Y PRÁCTICA DEL TRANSECTO COMO MÉTODO DE INVENTARIO PARA EL SABINAR (*Juniperus thurifera*). *III Coloquio Internacional Sobre Sabinares y Enebrales (Género Juniperus): Ecología y Gestión Forestal Sostenible*, 17.
http://www.nemoris.net/uploads/Transectos_sabinares.pdf
- Giraldo, R. (2007). *Introducción a la Geoestadística. Teoría y aplicaciones*. 1–95.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Montufar, G. (2019). *Actualización Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Gobierno Autónomo Descentralizado Canton Montúfar*. 1–58.
<http://www.gadmoutufar.gob.ec/archivos/PDOT2020-2035.pdf>
- Gómez, J. D., Etchevers Barra, J. D., Monterrosos Rivas, A. I., Campo Alvez, J., & Tinoco Rueda, J. A. (2011). ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMAR BIOMASA Y CARBONO EN *Quercus magnoliaefolia*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, XVII(2), 261–272.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.11.117>
- Hamilton. (2009). *Mercados De Carbono : Qué Tipos Existen Y Cómo funciona*. 5–11.
<http://www.fao.org/docrep/012/i1632s/i1632s02.pdf>
- Hansen, A., & Defries, R. S. (2007). Land Use Change around Nature Reserves: Implications for Sustaining Biodiversity 1. *Ecological Applications*, 17, 972–973.
- Haro, F. (2012). *DETERMINACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO EN LA BIOMASA Y SUELO DEL PÁRAMO DE LA COMUNIDAD PICHÁN CENTRAL - SAN ISIDRO* (Issue 10).
- Henderson, A., Churchill, S. P., & Luteyn, J. L. (1991). Neotropical plant diversity: Are the northern Andes richer than the Amazon Basin? *Nature*, 351, 21–22.
- Hengl, T., De Jesus, J. M., Heuvelink, G. B. M., Gonzalez, M. R., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., & Kempen, B. (2017).

- SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. In *PLoS ONE* (Vol. 12, Issue 2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- Hengl, T., De Jesus, J. M., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Ribeiro, E., Samuel-Rosa, A., Kempen, B., Leenaars, J. G. B., Walsh, M. G., & Gonzalez, M. R. (2014). SoilGrids1km - Global soil information based on automated mapping. *PLoS ONE*, *9*(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105992>
- Hernández, J., Espinoza, C. F., Rodríguez, J. E., Chacón, R. J. G., Toloza, S. C. A., Arenas, T. M. K., Carrillo, S. S. M., & Bermúdez, P. V. J. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson. *Definición, Propiedades y Suposiciones. Venezuela.*, *37*(5), 586–601. <https://www.redalyc.org/journal/559/55963207025/55963207025.pdf>
- Hernández, M. E. (2009). SUELOS DE HUMEDALES COMO SUMIDEROS DE CARBONO Y FUENTES DE METANO Wetland Soils as Carbon Sinks and Sources of Methane. *Terra Latinoamericana*, *28*, 139–147.
- Herreras, E. B. (2005). Spss: Un Instrumento De Análisis De Datos Cuantitativos. *Revista de Informática Educativa y Medios Audiovisuales*, *2*(4), 62–69.
- Hidalgo, R. (2014). *Almacenamiento De Carbono En La Biomasa Aérea Y Del Suelo Del Bosque Yungueño Montano Pluviestacional De La Concesión Para Conservacion, Alto Huayabamba- San Martin*. 1–105. <http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/610/T.FRS-214.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hofstede, R., Coppus, R., Mena Vasconez, P., Pool Segarra, J. W., & Sevink, J. (2002). The conservation status of tussock grass paramo in Ecuador. *Ecotropicos*, *15*(1), 3–18.
- Ibrahim, M., Chacón, M., Cuartas, C., Naranjo, J., Ponce, G., Vega, P., Casasola, F., & Rojas, J. (2006). Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforesteria En Las Américas*, *45*(3), 27–35.
- IGN. (2018). Fundamentos de teledetección RADAR. *Comisión Europea*, 1–15. https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa_Marco_Copernicus_User_Uptake/5_Fundamentos_de_teledeteccion_radar.pdf
- IPCC. (2007). Climate Change: The Physical Science Basis. In S. S. D. Q. M. M. Z. C. M. M. K. B. A. M. T. y H. L. Miller. (Ed.), *Cambridge University Press*. <https://doi.org/10.1256/wea.58.04>
- Valencia, E., Rodríguez, J. M. P., Mendoza, J. J., & Castañó, J. M. R. (2017). Valoración de los servicios ecosistémicos de investigación y educación como insumo para la toma de decisiones desde la perspectiva de la gestión del riesgo y el cambio climático. *Revista Luna Azul*, *45*(45), 11–41. <https://doi.org/10.17151/luaz.2017.45.3>
- Kellndorfer, J. M. (1998). Toward consistent regional-to-global-scale vegetation characterization using orbital sar systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *36*(5 PART 1), 1396–1411. <https://doi.org/10.1109/36.718844>
- Kvist, L. P., Aguirre, Z., & Sánchez, O. (2006). Bosques montanos bajos occidentales en Ecuador y sus plantas útiles. *Botánica Económica de Los Andes Centrales*, 205–223.
- Lomas, P., Martín, B., Luit, M., & Montes, C. (2015). *GUÍA PRÁCTICA PARA LA VALORACIÓN*

ECONÓMICA DE LOS BIENES Y SERVICIOS AMBIENTALES DE LOS ECOSISTEMAS (p. 76).

- Lopez, L. Y., Marivel, D. D., Martinez, P., Zavala, J., Gomez, A., & Posada, S. (2016). Carbono almacenado en la biomasa aerea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) de diferentes edades. *Madera Bosques*, 22(1), 191–202. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.221486>
- Luis, F., & Moncayo, G. (2014). *Propiedades anatómicas, Físicas y mecánicas de 93 especies forestales*. 171. https://condesan.org/wp-content/uploads/2020/05/CONDESAN_2019_Monitoreo_CARCHI.pdf
- Luna, M. (2007). *Universidad politécnica de madrid*.
- Macías, C. A., Orihuela, J. C., & Abad, S. (2017). *Estimation of above- - ground live biomass and carbon stocks in different plant formations and in the soil of dry forests of the Ecuadorian coast*. 2007, 1–7. <https://doi.org/10.1002/fes3.115>
- MAE. (2013). *Manual para la Gestión Operativa de las Áreas Protegidas de Ecuador*.
- MAE. (2016). *Ecuador suscribe Acuerdo de París sobre cambio climático*.
- MAE. (2019a). *20.439,79 hectáreas de bosque y páramos son declarados como área protegida en Carchi*. Ministerio de Ambiente.
- MAE. (2019b). Sistema nacional de áreas protegidas. *Ministerio Del Ambiente, Agua y Transición Ecológica*, 1–6.
- MAE. (2020). Nivel de Referencia de Emisiones Forestales por Deforestación del Ecuador. Quito. *Ministerio Del Ambiente*. https://redd.unfccc.int/files/06.01.2020_nivel_de_referencia_de_emisiones_forestales_de_ecuador_2001-2014.pdf
- MAE, & FAO. (2014). *Resultados de la Evaluación Nacional Forestal–Ecuador*. Quito. 316p.
- Martín, B., & Montes, C. (2010). Funciones y servicios de los ecosistemas: una herramienta para la gestión de los espacios naturales. Berta Martín-López* y Carlos Montes. *Guía Científica de Urdaibai, UNESCO*, 1–21.
- Martínez, R. (2022). *Estimación de la deformación superficial de las laderas del volcán Turrialba (Costa Rica) después de una erupción mediante interferometría diferencial de imágenes radar de apertura sintética (SAR) Sentinel-1A*. 68(1), 79–102.
- Melo, O., & Vargas, R. (2003). EVALUACION ECOLOGICA Y SILVICULTURAL DE ECOSISTEMAS BOSCOSOS. *UNIVERSIDAD DEL TOLIMA*, 222.
- Mena, P., & Hofstede, R. (2006). Los páramos ecuatorianos. *Botánica Económica de Los Andes Centrales*, 91–109.
- Mena, P., Castillo, A., Flores, S., Hofstede, R., Josse, C., Sergio, L., Medina, G., Ochoa, N., & Ortiz, D. (2011). Páramo. Paisaje estudiado, habitado, manejado e institucionalizado. In *EcoCiencia/Abya-Yala/ECOBONA*. Quito.
- Méndez, E., Vales, J., Pino, I., Granado, L., Montoya, G., Prieto, R., Carpintero, I., Giménez de Azcárate, F., Cáceres, F., Moreira, J., de la Fuente, D., López, S., & Suárez, J. (1999). *DETERMINACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN CON IMÁGENES*

- RADAR. ESTUDIO PILOTO EN ÁMBITO DE LA PROVINCIA DE HUELVA. 2, 3–6.
https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal_web/rediam/productos/Publicaciones/congresos/xv_aeteledeteccion/XV_AET_BIOMASA_v4.pdf
- Mogrovejo, P. R. (2017). Bosques y cambio climático en Ecuador: el regente forestal como actor clave en la mitigación del cambio climático. In *Universidad Simón Bolívar*.
- Morales, A. D. (2020). *Soil Moisture Content Estimation By Using Remote Sensing Techniques*. 54.
- Mostacedo, Bonifacio, T. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en Ecología Vegetal*.
<http://www.bio-nica.info/biblioteca/mostacedo2000ecologiavegetal.pdf>
- Muriel, Priscilla. (2008). *La diversidad de ecosistemas en el Ecuador*. 28–38.
- Naciones Unidas, N. (1992). *Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. 62301.
<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- Návar, J., Rodríguez, F., & Domínguez, P. (2013). *Ecuaciones Alométricas Para Árboles*. 24(2), 347–356.
<https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v24n2/a11v24n2.pdf>
- NTE 2176. (2006). SISTEMA DE CLASIFICACIÓN Y CALIFICACIÓN DE MADERA ASERRADA PROVENIENTE DE BOSQUES HÚMEDOS TROPICALES. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 21.
- Núñez, J. (2000). *Fundamentos de edafología*.
- Oliver, M. A., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*, 113, 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>
- Oliver, Margaret A., & Webster, R. (2010). *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging*.
- Ordoñez, J., De Jong, B., & Masera, O. (2001). Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques*, 7(2), 27–47.
- Orejuela, I. F. P., & Espinosa, F. R. (2020). Economic valuation of environmental goods and services of the protector forest kutukÚ – shaimi, se Ecuador. *International Journal of Energy, Environment and Economics*, 27(2), 117–132.
- Organización de las Naciones Unidas Ecuador. (2019). *Marco de Cooperación para el Desarrollo Sostenible ONU-Ecuador*. 116.
- Paredes, T. E. (2016). Análisis de la gobernanza del Patrimonio de Áreas Naturales del Estado (PANE) del Ecuador continental. In *PUCE*.
- Pelincó, E. (2019). VALORACIÓN ECONÓMICA DE SERVICIOS AMBIENTALES POR CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO EN TOTORALES DE LA RESERVA NACIONAL DEL TITICACA AÑO 2018. *Revista Científica Investigación Andina*, 20–21.
- Peng, G., Bing, W., Guangpo, G., & Guangcan, Z. (2013). Spatial distribution of soil organic carbon and total nitrogen based on GIS and geostatistics in a small watershed in a hilly area of northern China. *PLoS ONE*, 8(12), 1–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083592>
- Pérez, D. (2007). *Introducción a los Sensores Remotos - Aplicaciones en Geología*. 09.
http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/Guia_Curso_sr_2007.pdf
- Podwojewski, P. (1999). Los suelos de las altas tierras andinas: los páramos del Ecuador. *Sociedad*

Ecuatoriana de La Ciencia Del Suelo, 14.

- Quijano, A. C., & Morales, Y. L. (2016). Modelo regresivo para la estimación de biomasa aérea forestal a partir de datos de parcelas permanentes y datos Radar SAR ALOS PALSAR en el Parque Natural Bataclán, Cali. *Revista UD y La Geomática*, 11, 66–72.
- Réjou, M., Muller, H. C., Detto, M., Thomas, S. C., Le Toan, T., Saatchi, S. S., Barreto-Silva, J. S., Bourg, N. A., Bunyavejchewin, S., Butt, N., Brockelman, W. Y., Cao, M., Cárdenas, D., Chiang, J. M., Chuyong, G. B., Clay, K., Condit, R., Dattaraja, H. S., Davies, S. J., ... Chave, J. (2014). Local spatial structure of forest biomass and its consequences for remote sensing of carbon stocks. *Biogeosciences*, 11(23), 6827–6840. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6827-2014>
- República del Ecuador. (2008). Constitución del Ecuador. *Constitución Del Ecuador*, 132. <https://educacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/08/Constitucion.pdf>
- Riera, P. (2005). *Manual de economía ambiental y de los recursos naturales*. Parainfo.
- Robbins, M. B., Krabbe, N., Rosenberg, G. H., & Molina, F. S. (1994). The tree line avifauna at Cerro Mongus, Prov.Carchi, northeastern Ecuador. *Proc.Acad.Nat.Sci.Phila.*, 145(July), 209–216.
- Rodríguez, J. P., Rodríguez-Clark, K., Baillie, J., Ash, N., Benson, J., Boucher, T., Brown, C., Burgess, N., Collen, B., Jennings, M., Keith, D., Nicholson, E., Revenga, C., Reyes, B., Rouget, M., Smith, T., Spalding, M., Taber, a, M, W., ... Zamin, T. (2012). Definición de Categorías de UICN para Ecosistemas Amenazados. *Conservation Biology*, 25(2011), 21–29.
- Rojas, F., Santoyo, G. H., González, E., Velázquez, A., & Pulido, J. I. (2017). La Ciencia Del Suelo En El Ciclo Del Carbono De México. *Elementos Para Políticas Públicas*, 1, número(C), 69–96.
- Saatchi, S., Halligan, K., Despain, D. G., & Crabtree, R. L. (2007). Estimation of Forest Fuel Load From Radar Remote Sensing.pdf. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(6), 1726–1740. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.887002>
- Salazar, C. (1994). La definición de Política Pública. *Dossier*, 47–52.
- Salgado, J. (2012). *Producción de madera en sistemas agroforestales con café*. <http://www.sidalc.net/repdoc/A9562e/A9562e.pdf#page=28>
- Rojas, S. (2015). *ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR*. 191.
- Secretaría Nacional de Planificación. (2021). Matriz de alineación: Plan Nacional de Desarrollo 2021-2025 - Agenda 2030. *Gobierno Del Encuentro*, 0(0), 1–2.
- SENDECO2. (2020). *Precios CO2*. 1.
- Sierra, R., Calva, O., & Guevara, A. (2021). La Deforestación en el Ecuador, 1990 – 2018: Factores, Promotores y Tendencias Recientes. In *Ministerio de Ambiente y Agua del Ecuador, Ministerio de Agricultura del Ecuador, en el marco de la implementación del Programa Integral Amazónico de Conservación de Bosques y Producción Sostenible*. (p. 216).
- Slaymaker, O. (2001). The role of remote sensing in geomorphology and terrain analysis in the Canadian Cordillera. *ITC Journal*, 3(1), 11–17. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(01\)85016-9](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(01)85016-9)
- Small, D., & Schubert, A. (2008). *Guide to ASAR Geocoding*. 36.
- Ter, A., Pinto, E., & Cuesta, F. (2019). *Carchi y sus bosques montanos: investigación y conservación*.

https://condesan.org/wp-content/uploads/2020/05/CONDESAN_2019_Monitoreo_CARCHI.pdf

- Thouret, J. C., & Fabre, D. (1989). *Procesos morfodinámicos sobre las vertientes de la cordillera central*. En: VAN DER HAMMEN, T.; DIAZ-PIEDRAHITA, S. y ALVAREZ, V. J. (eds.). *Estudios de ecosistemas tropoandinos. Volumen 3. La cordillera Central Colombiana, Transecto Parque los Nevados*. Ec. 279–292.
- Tipper, R., & Jong, B. . (1999). Quantification and regulation of carbon offsets from forestry: comparison of alternative methodologies, with special reference to Chiapas, Mexico [1998]. *Commonwealth Forestry Review (United Kingdom)*, 77(3), 219–242.
- Torres, B., Vasseur, L., López, R., Lozano, P., García, Y., Arteaga, Y., Bravo, C., Barba, C., & García, A. (2020). Structure and above ground biomass along an elevation small-scale gradient: case study in an Evergreen Andean Amazon forest, Ecuador. *Agroforestry Systems*, 94(4), 1235–1245. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-00342-8>
- UEGPS. (2018). Metodología para clasificación de coberturas a partir del procesamiento de imágenes satelitales. *Mejoramiento Del Sistema de Información Estadística Agraria y Del Servicio de Información Agraria Para El Desarrollo Rural Del Perú*, 5, 110. <https://uegps.gob.pe>
- Universidad complutense de Madrid. (2012a). La muestra aleatoria Parámetros y estadísticos. *Población Y Muestra*. <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-54183/APUNTES ESTADÍSTICA 3.pdf>
- Universidad complutense de Madrid. (2012b). La muestra aleatoria Parámetros y estadísticos. *Población Y Muestra*.
- Ureta, M. (2015). Aboveground biomass input of myristicaceae tree species in the amazonian forest in Perú. *Revista de Biología Tropical*, 63(1), 263–274. <https://doi.org/10.15517/rbt.v63i1.14254>
- Useros, J. (2013). El Cambio Climático: sus causas y efectos medioambientales. *Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid*, 50, 71–98.
- Villegas, B. (2020). *ESTIMACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO DE LA ESPECIE Polylepsis reticulata, MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES, EN EL BOSQUE DE POLYLEPIS DE LA RESERVA DE PRODUCCIÓN DE FAUNA CHIMBORAZO*. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/14144/1/23T00770.pdf>
- Wagner, H. (2003). Spatial Covariance in Plant Communities: Integrating Ordination, Geostatistics, and Variance Testing. *Ecology*, 84(4), 1045–1057.
- Walker, W., Baccini, A., Nepstad, M., Horning, N., Knight, D., Braun, E., & Bausch, A. (2011). *Guía de campo para la Estimación de Biomasa y Carbono Forestal*. 72.
- Zhang, Y., Zhen, Q., Li, P., Cui, Y., Xin, J., Yuan, Y., Wu, Z., & Zhang, X. (2020). Storage of soil organic carbon and its spatial variability in an agro-pastoral ecotone of northern China. *Sustainability (Switzerland)*, 12(6), 1–13. <https://doi.org/10.3390/su12062259>