

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/329153698>

Estimación de Biomasa Aérea y Carbono con Teledetección en Bosques Alto-Andinos de Boyacá, Colombia. Estudio de caso: Santuario de Fauna y Flora “Iguaque”

Thesis · November 2018

DOI: 10.13140/RG.2.2.16518.01608

CITATIONS

0

READS

1,095

1 author:



Mauricio Alejandro Perea Ardila

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico

4 PUBLICATIONS 1 CITATION

SEE PROFILE



Master Thesis | Tesis de Maestría

submitted within the UNIGIS MSc programme
Presentada para el Programa UNIGIS MSc

at/en

Interfaculty Department of Geoinformatics- Z_GIS
Departamento de Geomática – Z_GIS
University of Salzburg | Universidad de Salzburg

**Estimación de Biomasa Aérea y Carbono con Teledetección en
Bosques Alto-Andinos de Boyacá, Colombia. Estudio de caso:
Santuario de Fauna y Flora “Iguaque”**

**Biomass and Carbon Estimation in the High-Andean Forests of
Boyacá, Colombia Using Remote Sensing. Case study: Sanctuary of
Fauna and Flora “Iguaque”**

by/por

Ing. Mauricio Alejandro Perea Ardila.

01522643.

A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements of
the degree of
Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc (GIS)

Ibagué - Colombia, Mayo de 2018.

Compromiso de la ciencia

Por medio del presente documento, incluyendo mi firma personal certifico y aseguro que mi tesis es completamente el resultado de mi propio trabajo. He citado todas las fuentes que he usado en mi tesis y en todos los casos he indicado su origen.

Ibagué – Colombia, 25 de Mayo de 2018.

(Lugar y fecha)

MAURICIO A. PEREA.

(Firma)

Dedicatoria

*A mi abuelo, que desde el cielo
guía mis pasos para cada día ser mejor.*

“Las Imágenes Son Inteligencia Visible”
The Arcgis Book.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente, a mi familia, en especial a mi madre que siempre fue motivo de inspiración y apoyo.

Al Grupo de Investigación Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales “**PROECUT**” de la Universidad del Tolima sede central en Ibagué Colombia por la oportunidad de participación en el proyecto denominado “**CARACTERIZACIÓN FLORÍSTICA Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN BOSQUES NATIVOS EN EL SANTUARIO DE FAUNA Y FLORA DE IGUAQUE, BOYACÁ, COLOMBIA**”, a los diferentes integrantes que estuvieron presentes en cada etapa del mismo especialmente a la profesora Ing Forestal MSc, **Milena Andrea Segura Madrigal** y al profesor Ing Agrónomo PhD, **Hernán Jair Andrade Castañeda** coordinadores e investigadores principales del proyecto, por la vinculación, confianza, financiamiento y asesorías a lo largo del desarrollo de las actividades.

Al Laboratorio de Fisiología Vegetal, por el préstamo de equipos y apoyo logístico en el trabajo de campo, a Diana, Pilar, Erika y Miguel, Integrantes del equipo de trabajo.

A la entidad de **Parques Nacionales Naturales de Colombia PNN**, y en especial al equipo administrativo y funcionarios técnicos del **Santuario de Fauna y Flora de Iguaque**, con sede en Villa de Leyva, Boyacá, por la amistad y la colaboración logística para adelantar de manera satisfactoria las actividades de campo.

A la profesora Ingeniera Forestal Jhoanna Magally Garcia, por la amistad y la oportunidad de participar en dinámicas del grupo de investigación; al Ingeniero Forestal, Julián Leal Villamil, por los consejos en el desarrollo del trabajo y a todos que de alguna u otra forma contribuyeron para la culminación de este trabajo.

Resumen.

Los bosques naturales son un importante reservorio de biomasa aérea y carbono, siendo su monitoreo a partir de imágenes de satélite una herramienta fundamental para la gestión sostenible. En este trabajo se estimó los contenidos biomasa aérea y carbono a través de teledetección en bosques alto-andinos del Santuario de Fauna y Flora Iguaque (SFFI) de Boyacá, Colombia. Se establecieron en campo 23 parcelas temporales de muestreo (PTM), cada una con tamaño de 250 m², se midieron todos los árboles con diámetro a la altura del pecho (DAP) ≥ 10 cm; la biomasa aérea se estimó a través de una ecuación alométrica desarrollada para bosques alto-andinos de similares características ambientales y se correlacionó estadísticamente con tres índices de vegetación (NDVI, SAVI y EVI) obtenidos a partir de dos imágenes mejoradas del satélite LANDSAT 8 OLI en época seca y lluviosa del año 2016; se estimó el carbono empleando una fracción de 0,5. Como resultado de esta investigación se encontró que los bosques del SFFI almacenan en promedio 36,56 t C/ha en biomasa aérea, se desarrolló un modelo matemático que definió dicha relación donde se obtuvo una ecuación tipo potencial con afinidad al índice de vegetación NDVI de la imagen de la época seca, el cual obtuvo un $R^2 = 0,82$ y un RMSE de 17 t/ha, se realizó el mapa de distribución del carbono en biomasa aérea donde se señalan tres rangos de acumulación de estos bosques de 50-100, 100-140 y 140-170 t/ha para biomasa y 28-50, 51-70 y 71-85 t C/ha para carbono, estas últimas se localizan principalmente en la zona suroeste y norte del SFFI. Con este estudio se logra establecer una primera aproximación del patrón de distribución de la biomasa aérea y carbono bajo una resolución de 30 m y se ratifica el uso de datos de sensores remotos como insumo primordial en temas de monitoreo de ecosistemas forestales a escala del SFFI.

Palabras clave: Ecosistemas forestales, monitoreo, imágenes de satélite, índices de vegetación, LANDSAT 8.

Abstract.

Natural forests are an important biomass and carbon reservoir, though monitoring them using satellite images is a fundamental approach for their sustainable management. In this investigation, the total biomass and carbon content of the high-Andean forests of the Fauna and Flora Sanctuary of Iguaque (SFFI), Boyacá, Colombia was estimated through remote sensing techniques. 23 temporary sampling plots were established in the field, each with a size of 250 m², and all trees were measured with a breast height diameter (DAP) > 10 cm. Biomass was estimated through an allometric equation developed for high-Andean forests with similar environmental characteristics and statically correlated with vegetation indices (NDVI, SAVI AND EVI) obtained from LANDSAT 8 OLI in the dry and rainy season of 2016. Carbon content was estimated with a fraction of 0.5. As a result of this investigation, it was found that SFFI forests store on average 36,56 t C/ha of biomass. A map was developed that shows carbon distribution with three ranges of accumulation: 50-100, 100-140 y 140-170 t/ha from biomass and 28-50, 51-70 y 71-85 t C/ha from carbon, mainly located at north and southwest of the study area.

Keywords: Forest ecosystem, Monitoring, Satellite images, Vegetation indexes, LANDSAT 8.

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 ANTECEDENTES.....	14
1.2 OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	16
1.2.1 Objetivo general.....	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	16
1.4 HIPÓTESIS.....	17
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	17
1.6 ALCANCE.....	19
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	20
2.1 Los bosques y el cambio climático.....	20
2.2 Métodos para la estimación de la biomasa y carbono forestal.....	23
2.3 Estimación de la biomasa forestal basada en teledetección.....	25
2.4 Índices de vegetación (VI).....	26
2.4.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI:.....	28
2.4.2 Índice de Vegetación Ajustado al Suelo SAVI.....	28
2.4.3 Índice de Vegetación Mejorado EVI:.....	28
2.5 LANDSAT.....	29
2.6 Referencias metodológicas.....	31
3. METODOLOGÍA.....	35
3.1 Área de estudio.....	35
3.2 JUSTIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	37
3.3 DESARROLLO METODOLÓGICO.....	38
3.3.1 Identificación de bosques del SFFI.....	38
3.4 INVENTARIO FORESTAL.....	41
3.4.1 Parcelas Temporales de Muestreo PTM.....	41
3.4.2 Estimación de biomasa aérea y carbono.....	43
3.5 DATOS DE SENSORES REMOTOS.....	43
3.5.1 Adquisición de imágenes de satélite.....	43
3.6 MEJORAMIENTO DE IMÁGENES DE SATÉLITE.....	45
3.6.1 Corrección radiométrica.....	45
3.6.2 Corrección topográfica.....	46

3.7 CÁLCULO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN.....	47
3.8 EXTRACCIÓN DE VALORES DE VI.....	48
3.9 ANÁLISIS DE ESTADÍSTICAS.....	49
3.9.1 Análisis de correlación	49
3.10 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA BIOMASA AÉREA Y CARBONO.....	51
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
4.1 RESULTADOS	52
4.1.1 Estimación de biomasa aérea	52
4.1.2 Mejoramiento de imágenes de satélite.....	53
4.1.3 Calculo de índices de vegetación.....	55
4.1.4 Extracción de valores VI.....	56
4.1.5 Análisis de correlación	58
4.1.6 Distribución espacial de la biomasa aérea y carbono	63
4.2 DISCUSIÓN.....	67
5. CONCLUSIONES.....	71
6. RECOMENDACIONES.	73
7. REFERENCIAS.....	74
8. ANEXOS.	85

Acrónimos.

ASTER	<i>The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
CLCC	<i>CORINE Land Cover Colombia</i>
CORINE	<i>Coordination of Information of the Environment</i>
DAP	<i>Diámetro a la Altura del Pecho</i>
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
DN	<i>Digital Number</i>
EOS	<i>Earth Observing System</i>
EPSG	<i>European Petroleum Survey Group</i>
EVI	<i>Índice de Vegetación Mejorado</i>
FAO	<i>Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura</i>
GDEM	<i>Global Digital Elevation Map</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IDEAM	<i>Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia</i>
IGAC	<i>Instituto Geográfico Agustín Codazzi</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
Kg/par	<i>Kilogramo parcela</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
METI	<i>Ministry of Economy, Trade and Industry</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDVI	<i>Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada</i>
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
PNN	<i>Parques Nacionales Naturales de Colombia</i>
PPM	<i>Parcelas Permanentes de Muestreo</i>
PTM	<i>Parcelas Temporales de Muestreo</i>
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
SAVI	<i>Índice de Vegetación Ajustado al Suelo</i>
SFFI	<i>Santuario de Fauna y Flora Iguaque</i>
SIG	<i>Sistema de Información Geográfica</i>
SINAP	<i>Sistema Nacional de Áreas Protegidas</i>
t C/ha	<i>Toneladas de carbono hectárea</i>
t/ha	<i>Tonelada hectárea</i>
TOA	<i>Techo de la Atmosfera</i>
USGS	<i>U.S Geological Survey</i>

Glosario.

Biomasa aérea forestal: Materia orgánica que conforma la parte superior de un árbol como ramas, tronco copa.

Biomasa: Materia orgánica de un grupo de elementos vivos y muertos en un ecosistema, como árboles, plantas o animales.

Carbono: Elemento químico fundamental que hace parte de la composición de los seres vivos.

Dasimetría: Disciplina que se encarga de las mediciones de árboles y masas forestales para determinar su crecimiento.

Diámetro a la altura del pecho (DAP): Medición de la circunferencia de los árboles desde la base del árbol hasta la altura del pecho del censista.

Ecuación alométrica: Ecuación matemática que determina o explica las relaciones entre los atributos biológicos de un individuo.

Inventario forestal: Medición o registro de árboles en campo para determinar características de los individuos como cantidad, volumen y especies.

Parcela temporal de muestreo: Unidad de estudio de un bosque delimitada para la medición de los atributos de los árboles de manera temporal.

Santuario de fauna y flora: área o espacio de importancia ecológica destinada a la conservación de especies de fauna, flora y recursos genéticos.

Lista de figuras.

Figura 1. Ciclo del carbono (C).....	20
Figura 2. Flujos de carbono en ecosistemas forestales.	21
Figura 3. Componentes de la biomasa en un bosque.	22
Figura 4. Estimación de biomasa aérea método directo.	24
Figura 5. Medición para la estimación de biomasa método indirecto.	25
Figura 6. Comportamiento espectral de la vegetación sana.	27
Figura 7. Evolución del programa satelital LANDSAT.	30
Figura 8. Mapa de localización del SFFI Boyacá Colombia	36
Figura 9. Esquema metodológico.....	37
Figura 10. Mapa de localización de bosques densos en el SFFI	40
Figura 11. Forma y tamaño de las parcelas permanentes de muestreo.	41
Figura 12. Mapa de ubicación de parcelas temporales de muestreo PTM.....	42
Figura 13. Mapa de distribución de la biomasa aérea en el santuario.	65
Figura 14. Mapa de distribución de carbono en el santuario.	66

Lista de tablas.

Tabla 1. Características espectrales del sensor OLI y TIRS	31
Tabla 2. Coberturas y uso de la tierra periodo 2010-2012 SFFI.....	38
Tabla 3. Características de las imágenes del satélite LANDSAT 8.	44
Tabla 4. Métodos utilizados para corrección topográfica en imágenes de satélite....	46
Tabla 5. Índices de vegetación utilizados.	48
Tabla 6. Biomasa aérea y carbono de las parcelas temporales de muestreo.	52
Tabla 7. Ecuaciones matemáticas para la corrección radiométrica.....	53
Tabla 8. Ecuaciones de regresión lineal para determinar el factor C.	54
Tabla 9. Ecuaciones matemáticas para la corrección topográfica.....	54
Tabla 10. Índices de vegetación calculados para el SFFI.	55
Tabla 11. Valores de VI para las 23 parcelas de muestreo.....	57
Tabla 12. Comparación de la biomasa estimada por parcela y los VI.....	58
Tabla 13. Coeficientes de Correlación de Pearson.	60
Tabla 14. Estadígrafo para la determinación del modelo.	61
Tabla 15. Valores de biomasa aérea observada y predicha por el modelo.	62
Tabla 16. Área estimada en la distribución de rangos de biomasa aérea y carbono. 64	

Lista de gráficos.

Gráfico 1. Distribución de la biomasa aérea en PTM.	53
Gráfico 2. Valores de índices de vegetación para bosques en temporada seca.	57
Gráfico 3. Valores de índices de vegetación para bosques en temporada lluviosa...	58
Gráfico 4. Índices de temporada seca vs contenidos de biomasa aérea.	59
Gráfico 5. Índices de temporada lluviosa vs contenidos de biomasa aérea.	60
Gráfico 6. Correlación entre la biomasa aérea y el NDVI de temporada seca.	61
Gráfico 7. Relación entre los valores de biomasa aérea observada y predicha.	63

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 ANTECEDENTES.

Los bosques naturales son de gran importancia para comprender las dinámicas ecológicas del planeta; en este sentido se considera que la biomasa forestal es un importante reservorio de carbono (C) y juega un papel fundamental en la regulación del ciclo mundial del mismo y en la mitigación del cambio climático, lo mencionan autores como (Andrade-Castañeda, Arteaga-Céspedes, y Segura-Madrigal, 2017; Hall, Skakun, Arsenault, y Case, 2006; Main-knorn et al., 2013; Timothy, Onisimo, Cletah, y Adelabu, 2016), entre otros.

Para Rodríguez-Veiga, Wheeler, Louis, Tansey, y Balzter, (2017) la mayor cantidad de carbono que se almacena en los árboles se acumula en su biomasa aérea a través del proceso de la fotosíntesis y es de vital importancia el monitoreo de la biomasa aérea de los bosques para comprender el ciclo del carbono y reducir las emisiones de (CO₂); según Brown (1997) la biomasa de los bosques proporciona estimaciones de las reservas de carbono en la vegetación forestal ya que aproximadamente el 50% de la misma es carbono; a ello, Alvarez (2008) asegura que la biomasa forestal proporciona estimaciones de la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) que se puede liberar a la atmósfera por algún disturbio que se presente en un bosque.

Según Houghton, Lawrence, Hackler, y Brown (2001) citado por Galindo et al. (2011) la biomasa forestal puede ser cuantificada en campo con bajas incertidumbres, ya sea por el método de cosecha directa del árbol, o por la instalación de parcelas de muestreo, donde la biomasa del árbol es estimada por medio de la relación de ecuaciones alométricas y mediciones de los atributos del árbol. Sin embargo, autores como, Phua y Saito (2003) señalan que el muestreo en campo de la biomasa puede ser costoso, demandante de tiempo y puede presentar dificultades según las condiciones del terreno, por otro lado autores como Lumbres y Lee (2014) indican que

la combinación de inventarios forestales con datos de sensores remotos proporcionan una mayor confianza en las estimación de la biomasa.

Según Foody et al. (2001) existen diversos métodos para estimar y cartografiar la distribución de la biomasa forestal a partir de datos de sensores remotos, asegura que los índices de vegetación son ampliamente utilizados y pueden ser aplicados a las imágenes de satélite, lo que concuerda con lo dicho por Cortés, Hernández, Valencia, y Corvalán (2014) donde mencionan que la información proporcionada por sensores remotos permite utilizar la reflectancia e índices de vegetación y relacionarla con la biomasa aérea, además de que algunas las imágenes de sensores remotos son distribuidas gratuitamente y/o a bajo costo; a su vez Mohd Zaki y Abd Latif (2017) afirman que existen múltiples imágenes de satélite de sensores remotos pasivos multiespectrales de mediana y baja resolución como el LANDSAT, ASTER y MODIS y de alta resolución como Quickbird, IKONOS, WorldView y GeoEye, sensores activos como el *LIDAR* (LIght Detection And Ranging) y el *RADAR* (Radio Detection And Ranging) que proporcionan varios enfoques y posibilidades para la estimación de biomasa aérea y el monitoreo forestal.

En los últimos tiempos y con el avance de la tecnología, la teledetección ha sido de suma importancia para la estimación de la biomasa aérea forestal para la gestión de los bosques naturales; en este contexto, se pretende en esta investigación estimar la biomasa aérea y carbono en bosques alto andinos del santuario de fauna y flora Iguaque en Boyacá Colombia, con el uso de sensores remotos y datos de campo de inventarios forestales, lo cual permitirá establecer una línea base en la cuantificación de la biomasa aérea en ecosistemas forestales, los resultados servirán para investigaciones futuras en el monitoreo y estimación de biomasa y carbono de bosques a nivel regional.

1.2 OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.

1.2.1 Objetivo general

Estimar la biomasa aérea y carbono con teledetección en bosques alto-andinos del santuario de fauna y flora Iguaque Boyacá – Colombia.

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Realizar un inventario forestal exploratorio para la medición de variables dasométricas en parcelas temporales de muestreo en los bosques del santuario.
- ✓ Estimar el contenido de biomasa aérea y carbono de los bosques del santuario a través de ecuaciones alométricas y datos de parcelas.
- ✓ Procesar imágenes de sensores remotos y determinar índices de vegetación de los bosques naturales del santuario.
- ✓ Analizar correlaciones entre los índices de vegetación y los datos de biomasa aérea estimada para determinar el modelo matemático que mejor se ajusta en la estimación de biomasa aérea con teledetección.
- ✓ Generar cartografía de la distribución espacial de los contenidos de biomasa y carbono aérea con teledetección.

1.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.

¿Cuál es el contenido de biomasa aérea y carbono de los bosques del Santuario de Fauna y Flora Iguaque?

¿Cuál índice de vegetación, se ajusta mejor para la estimación de biomasa por medio de imágenes de sensores remotos?

¿Cuál es la distribución espacial de la biomasa aérea y el carbono de los bosques naturales en el santuario?

1.4 HIPÓTESIS.

Los índices de vegetación relacionados con variables dasométricas obtenidos de inventarios forestales permiten estimar con teledetección los contenidos de biomasa aérea y carbono, además cartografiar la distribución espacial de los mismos en los bosques naturales del Santuario de Fauna y Flora Iguaque.

1.5 JUSTIFICACIÓN.

La falta de información sobre la biomasa aérea y carbono de los ecosistemas forestales trae consigo el desconocimiento de las funciones ecológicas de los bosques en temas de mitigación del cambio climático. En este sentido El santuario de Fauna y Flora Iguaque, siendo una de las 59 áreas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Colombia (SINAP) no posee información técnica que le permita llevar a cabo el monitoreo y la gestión de los bosques naturales relacionado a la toma de decisiones en pro de los procesos ecológicos, evolutivos y de preservación.

La biomasa aérea de los bosques naturales es una de las principales reservas de carbono en ecosistemas terrestres, su estimación es de suma importancia para monitorear los contenidos de carbono y así tener una idea de las emisiones que se generan por la deforestación, además de evaluar el potencial de los bosques en el almacenamiento del carbono que aproximadamente corresponde al 45 o 50 % de la biomasa, como lo aseguran, Vashum y Jayakumar (2012). Además, según lo expuesto por Manrique, Nuñez, y Franco (2012) la gestión de los bosques nativos como sumideros de carbono pueden mitigar los efectos del cambio climático global, generando información sobre la fijación de las reservas de carbono en estos ecosistemas.

Según estudios a nivel mundial se ha encontrado que el cambio del uso de la tierra causada por la deforestación, es la segunda fuente principal de emisiones antropogénicas de CO₂ a la atmósfera, esto se debe a la reducción en la capacidad de almacenamiento del carbono en la superficie terrestre, según lo planteado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2013); en Colombia el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (IDEAM, 2015) ha realizado diferentes investigaciones donde afirma que el país posee un 52% de su territorio cubierto en bosques naturales lo que representa una superficie de (59'558.064 ha) distribuidas en todos sus biomas; Sin embargo reportó una pérdida de 124.035 ha de bosques naturales para el año 2015, este proceso de deforestación está ligado a causas directas e indirectas que son efectos de actividades productivas e ilegales como: la praderización, agroindustria, cultivos ilícitos entre otros; en el mismo reporte se indica que las áreas del Sistema de Parques Nacionales presentaron una cifra de deforestación de 5.694 ha para ese mismo año. A su vez Phillips, Duque, Yepes, et al. (2011) aseguran que la información sobre biomasa aérea y carbono en Colombia es muy escasa y se encuentra repartida entre diferentes organizaciones y utilizando métodos y técnicas variables lo que genera gran incertidumbre en datos sobre biomasa y carbono.

Con base a estos antecedentes y siendo los santuarios de fauna y flora en Colombia, áreas naturales estratégicas consideradas de suma importancia en el contexto regional, es importante estimar y monitorear la cantidad de biomasa aérea y carbono en ecosistemas forestales estratégicos, con el fin de contar con insumos técnicos que permitan desarrollar estrategias y planes en la mitigación de gases de efecto invernadero GEI, en proyectos de Reducción de Emisiones causadas por la Deforestación y la Degradación de los Bosques, REDD y en las políticas nacionales que apuntan a la gestión y conservación de los recursos naturales y permitiendo tener indicadores para la estabilidad ecológica en la generación de bienes y servicios ambientales.

1.6 ALCANCE.

Los bosques naturales son de suma importancia frente al cambio climático, estos ecosistemas terrestres son los principales sumideros de dióxido de carbono (CO₂) el cual es fijado en la biomasa forestal y juegan un papel clave en el equilibrio y procesos ecológicos del planeta.

Se pretende por medio de esta investigación incentivar el uso de la teledetección y el empleo de imágenes de satélite LANDSAT para la estimación de biomasa aérea y carbono en el santuario de fauna y flora Iguaque y otras áreas del SINAP a nivel nacional, dando así la posibilidad que se realicen monitoreos periódicos y determinar la distribución de la biomasa aérea y carbono en bosques naturales.

Por otro lado es un insumo técnico que servirá a los administradores del área como línea base para la toma de decisiones que involucren temas relacionados en la gestión y recuperación de ecosistemas forestales, planes de manejo, monitoreo forestal, proyectos de mitigación al cambio climático y otros instrumentos de planificación que aportan políticas de gestión integral para la protección y conservación de recursos naturales.

2. REVISIÓN DE LITERATURA.

2.1 Los bosques y el cambio climático.

Según la “Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015”, La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2016), estima que los bosques del planeta cubren un área aproximada de 3.999 millones de hectáreas lo que corresponde al 30,6% de la superficie terrestre; los bosques suministran bienes y servicios, aportan a la seguridad alimentaria de millones de personas, además de contribuir en funciones ecológicas de sistemas naturales que sustentan la conservación del agua, los suelos y la biodiversidad, juegan un rol importante en la mitigación del cambio climático global (FAO, 2014); según Gibbs, Brown, Niles, y Foley (2007) los ecosistemas terrestres que secuestran y almacenan la mayor cantidad de carbono (C) son los bosques; sumado a esto autores como Tan, Lee, Mohamed, y Bhatia (2009), citados por Seo, Phua, Ong, Choi, y Lee (2014) aseguran que el 85% del carbono global se encuentra contenido en estos ecosistemas; el ciclo del carbono puede detallarse en la figura 1.

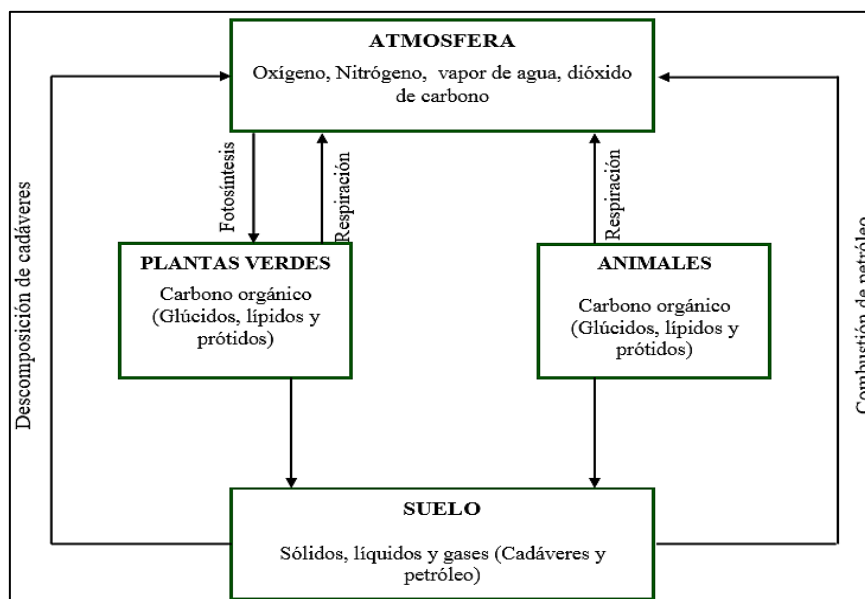


Figura 1. Ciclo del carbono (C).
Fuente: Alvarez (2008).

Según Lapeyre, Alegre, y Arévalo (2004), el carbono es de vital importancia para los seres vivos, y está presente en su mayor parte como dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera, también presente en los océanos, combustibles fósiles como el carbón y los hidrocarburos; las especies que realizan el proceso de la fotosíntesis se convierten en fijadoras de carbono, ya que utilizan el CO_2 presente en la atmósfera para realizar procesos metabólicos a nivel celular responsables del crecimiento vegetal, a ello entre el 45 y 50% del carbono se encuentra contenido en los tejidos vegetales en forma de biomasa (Figuroa, 2007); en este sentido autores como (Gayoso y Guerra, 2005; Ordóñez y Masera, 2001; Rojo-Martínez, Jasso-Mata, y Velásquez-Martínez, 2003); entre otros, afirman que el CO_2 metabolizado por medio de la fotosíntesis en ecosistemas forestales proporciona elementos esenciales como la glucosa, que le brindan al árbol toda las estructuras vitales para el desarrollo de ramas, follaje, raíces y tronco; sin embargo los autores mencionan que los suelos y el mantillo (materia orgánica) también actúan como almacenes de carbono dentro del ecosistema forestal donde se presentan flujos e intercambios de carbono. Los flujos del carbono en estos ecosistemas se detallan en la figura 2.

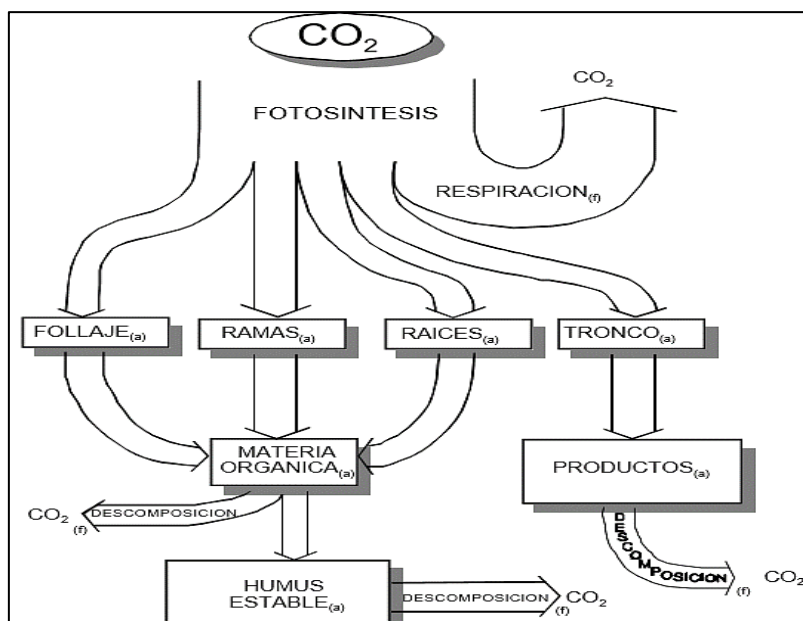


Figura 2. Flujos de carbono en ecosistemas forestales.
Fuente: Ordóñez y Masera (2001).

En el contexto forestal, la biomasa puede definirse según lo presenta la FAO, (2006) como “toda materia orgánica aérea o subterránea viva o muerta”; de igual manera la FAO, (2007), menciona que la biomasa aérea corresponde a todos los elementos vivos del árbol sobre el suelo que incluyen el tronco, ramas, corteza, follaje etc. Por otro lado la biomasa subterránea corresponde a los elementos vivos de las raíces correspondientes a la parte baja del tocón; según Brown, Schreder, y Kern (1999), la biomasa es considerada como un indicador para evaluar los cambios en la estructura forestal y atributos funcionales en ecosistemas boscosos que se encuentran en diferentes condiciones ambientales; se observa los componentes de la biomasa en un ecosistema forestal en la figura 3.

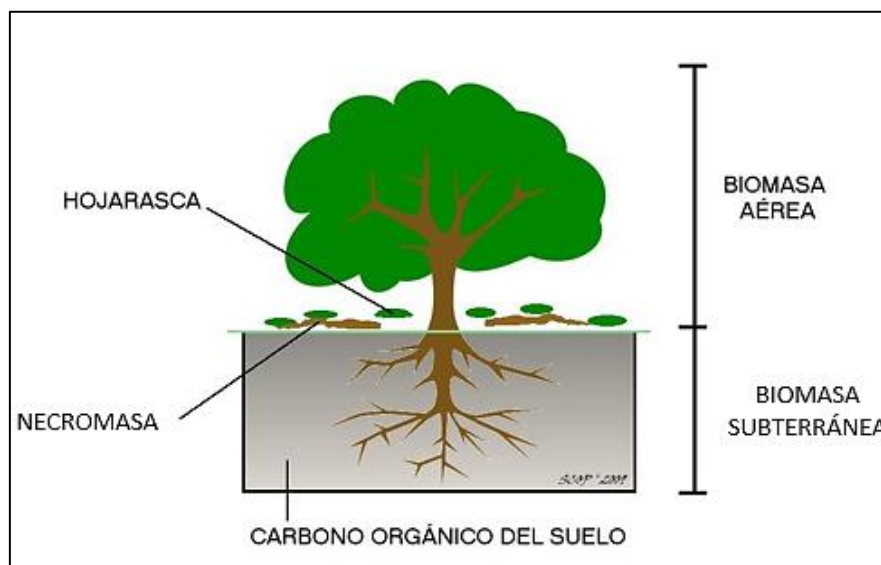


Figura 3. Componentes de la biomasa en un bosque.

Fuente: tomado de: <http://finanzascarbono.org/wp-content/uploads/2013/04/imagen-texto-redd.png>

El cambio climático es un fenómeno mundial que tiene como consecuencia cambios en los regímenes de lluvias y aumento de las temperaturas, según lo expone Andrade-Castañeda et al., (2017) este fenómeno está influenciado por el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI); según Gross, Woodley, Welling, y Watson (2016), la alta concentración de estos gases en la atmósfera provoca el aumento de las temperaturas por el calor del sol, como consecuencia directa acrecientan la temperatura del aire y de los océanos, disminuyen la cantidad

de nieve y hielo del planeta que aumentan los niveles del mar; el IPCC (2007) indica el dióxido de carbono (CO₂) es el principal gas de efecto invernadero presente en la atmosfera global, autores como (Houghton, 2005; Lu, Chen, Wang, Liu, y Moran, 2014; Pearson, Brown, Murray, y Sidman, 2017); entre otros coinciden en que la deforestación y degradación de los bosques tienen como efecto la emisión de CO₂ y otros GEI a la atmosfera; a ello el IPCC (2013), afirma que las emisiones de CO₂ derivadas por la deforestación y cambios de uso del suelo entre los años 2002 y 2011 a nivel mundial se estiman en 0.9 PgC yr⁻¹¹; a su vez el IDEAM, (2015) reporta emisiones para Colombia hasta el año 2012 el orden de 178 mil Gg² CO₂ que corresponden al 0,24% de las emisiones mundiales donde las actividades de Agricultura, Silvicultura y otros usos de la Tierra (AFOLU) aportan el 43% del total de las emisiones además se reconoce que se debe especialmente por el cambio de bosques a pastizales.

2.2 Métodos para la estimación de la biomasa y carbono forestal.

Según Liu, Gao, Gao, y Wang (2006), la información obtenida sobre la productividad y la biomasa de un ecosistema es esencial para evaluar el estado del mismo; en este sentido, Shi y Liu (2017), aseguran que es necesario obtener estimaciones precisas sobre la biomasa forestal ya que esto aclara el papel que juegan los bosques en el cambio climático. La biomasa aérea forestal puede ser estimada mediante métodos directos e indirectos; según lo plantea González (2008), el método directo o destructivo consiste en realizar una medición de las características básicas de los árboles como el diámetro del árbol a la altura del pecho (DAP), la altura total (Ht), diámetro y longitud de la copa, entre otras, para estimar la biomasa se derriba el árbol pesando cada uno de los componentes en secciones (ramas, tronco y follaje); se presenta el proceso del método directo en la figura 4.

¹ PgC yr⁻¹= Pentagramo de carbono al año

² Gg = Gigagramo

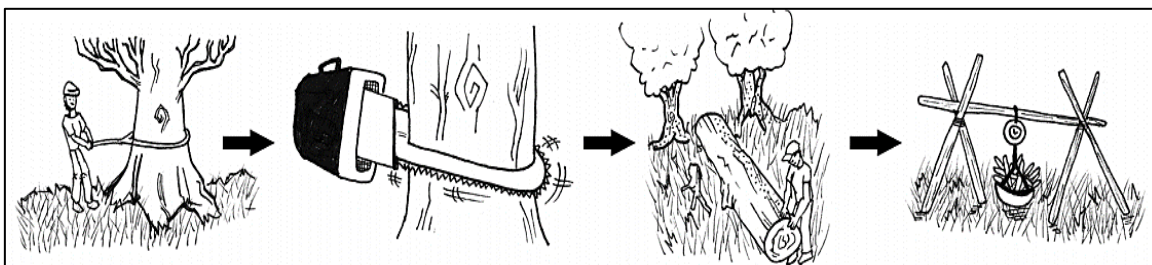


Figura 4. Estimación de biomasa aérea método directo.
Fuente: Yepes et al. (2011).

Por otro lado, en el método indirecto se calcula el volumen del árbol con fórmulas dasométricas y la biomasa es estimada con la suma de los volúmenes parciales del fuste y las ramas gruesas medidas en campo, aquí se hace necesario tomar muestras de la madera para posteriormente realizar procedimientos en el laboratorio donde se determina su peso en húmedo y en seco, calculando las densidad básica y factores de expansión de la madera; en este procedimiento no es necesario derribar el árbol, para la estimación de la biomasa se calcula según Brown 1997 con la siguiente ecuación general:

$$BA = VC * D * FEB$$

Donde:

BA = Biomasa aérea (t/ha).

VC = Volumen comercial (m³).

D = Densidad básica de la madera.

FEB = Factor de expansión de la biomasa.

De igual manera se presenta otro método indirecto para estimar biomasa, se refiere al uso de ecuaciones alométricas, según lo plantea Brown 1997 estas ecuaciones son producto de funciones matemáticas donde se utilizan regresiones estadísticas que relacionan las mediciones de las variables del árbol en campo a través de inventarios forestales; a ello Mohd Zaki y Abd Latif (2017) señalan que a través de algunas mediciones de los parámetros del árbol como el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura pueden desarrollarse ecuaciones alométricas para el árbol, en este sentido

Sharma y Chaudhry (2015), exponen que este tipo de ecuaciones para la estimación de la biomasa pueden ser acertadas para una o varias especies dentro de un ecosistema; se observa la medición de variables forestales para su posterior utilización en ecuaciones alométricas en la figura 5.

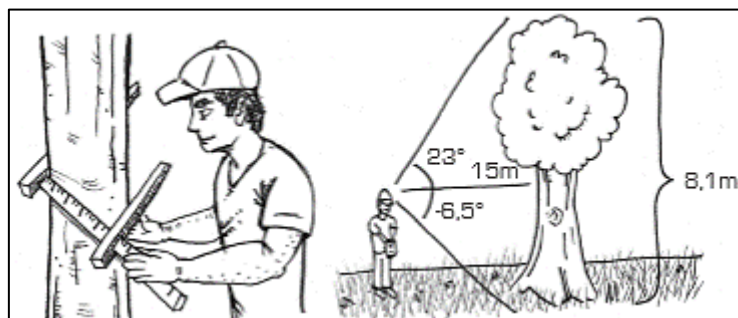


Figura 5. Medición para la estimación de biomasa método indirecto.
Fuente: Yepes et al. (2011).

Los bosques tropicales almacenan grandes cantidades de carbono en su biomasa Yepes-quintero et al. (2011) Según lo expone Mohd Zaki y Abd Latif (2017), la mayor cantidad de carbono está contenido en la biomasa aérea de los árboles; por su parte Brown, (1997) asegura que aproximadamente el 50% de la biomasa forestal es carbono siendo un factor de conversión rápido para la estimación de la misma, esta teoría se ajusta con lo expresado por Phillips et al. (2011) donde expone que la mayoría de estudios de estimación de carbono para los bosques tropicales utilizan un factor de 0,5 ya que se asume que el carbono corresponde a un 50% de la biomasa.

2.3 Estimación de la biomasa forestal basada en teledetección.

La teledetección presenta una técnica para adquirir imágenes de la superficie de la tierra a través de sensores remotos instalados en plataformas aéreas o espaciales; de igual manera define un sensor como el encargado de coleccionar la información recibida por las cubiertas terrestres en este sentido se puede hablar de sensores pasivos y activos, los primeros dependen de la energía proveniente de una fuente exterior como el sol, y los activos son capaces de emitir su propio haz de energía (Chuvienco, 2010).

Esta técnica permite medir la cantidad de radiación del espectro electromagnético que se refleja o dispersa (Sharma y Chaudhry, 2015). Las imágenes de satélite tienen como característica la toma de datos contiguos de la superficie terrestre en varias regiones del espectro electromagnético, esta información proporciona los mecanismos para el estudio de ecosistemas forestales a gran escala y permite determinar las relaciones existentes con los ciclos globales del planeta (González, 2008).

Los datos de sensores remotos se ha convertido en una fuente primaria para la estimación de la biomasa aérea, las técnicas tradicionales para su estimación presentan dificultades cuando se requiere mostrar su distribución a grandes escalas; los datos colectados por sensores remotos presentan una ventaja con respecto a los métodos tradicionales ya que permiten el procesamiento rápido de grandes volúmenes de datos, su correlación entre bandas espectrales y mediciones en la vegetación lo que la convierten en un método primordial para la estimación de biomasa aérea en grandes áreas (Lu, 2006). Diferentes autores han presentado avances en sus investigaciones utilizando datos del satélite LANDSAT y diferentes índices de vegetación para la estimación de la biomasa aérea en ecosistemas forestales tal es el caso de (Foody, Boyd, y Cutler, 2003; Lu, 2005; Powell et al. 2010; Roy y Ravan, 1996; Steininger, 2000; Zheng et al. 2004); entre otros. A ello, Zhu y Liu (2015), expone que los datos de la misión LANDSAT han proporcionado estimaciones de biomasa aérea de manera precisa gracias a sus características y su largo tiempo de operación.

2.4 Índices de vegetación (VI).

En el campo de la teledetección se han desarrollado diferentes índices de vegetación para evaluar las características de cubiertas vegetales a través de mediciones espectrales (Bannari, Morin, Bonn, y Huete, 1995), Según Chen y Wang (2008), citado por Das y Singh (2012), la reflectancia espectral se utiliza para comprender la naturaleza de las características de la vegetación.

De igual manera, Silleos, Alexandridis, Gitas, y Perakis (2006), exponen que la vegetación saludable presenta una interacción propia con el espectro electromagnético donde la clorofila de las hojas absorbe una gran cantidad de energía lumínica para el proceso de la fotosíntesis, las zonas del espectro visible del rojo y el azul son absorbidas y el verde es reflejado por la clorofila a ello se debe el color característico de la vegetación, al mismo tiempo el infrarrojo cercano es reflejado por las estructuras internas de la hoja; este comportamiento da lugar a utilizar imágenes de satélite para comprender la condición de la vegetación. Según lo expuesto por Viña, Gitelson, Nguy-Robertson y Peng (2011) un VI es una operación matemática entre bandas espectrales en las regiones del visible e infrarrojo; se observa el comportamiento de la vegetación en los diferentes rangos del espectro electromagnético en la figura 6.

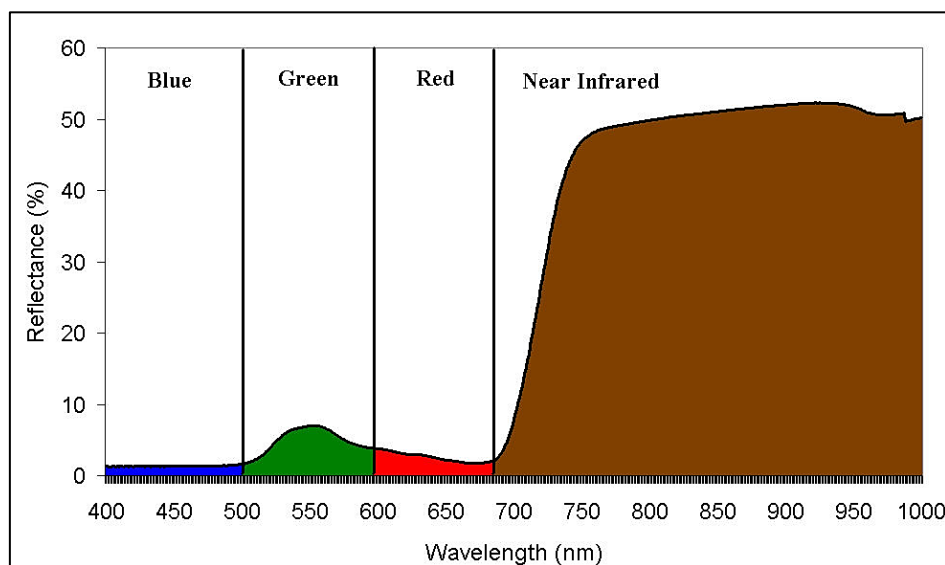


Figura 6. Comportamiento espectral de la vegetación sana.

Fuente: tomado de http://www.seos-project.eu/modules/agriculture/images/vegspectrum_large.jpg

Para, Chuvieco (2010), el discriminar cubiertas a través de cocientes ayuda a entender el comportamiento radiométrico de la vegetación, donde al relacionar las bandas del rojo (0.6 a 0.7 μm) y el infrarrojo cercano (0.7 a 1.1 μm) se obtiene un alto contraste lo que permite separar la vegetación sana de otro tipo de coberturas; al igual el autor señala que para la discriminación de coberturas es necesario aplicar métodos de

corrección del sombreado topográfico lo que reduce en efecto del relieve (pendiente y orientación) ya que los VI se ven afectados por efectos atmosféricos.

2.4.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI: Es un índice de vegetación el cual es utilizado frecuentemente por investigadores en el campo medioambiental, según Chuvieco (2010) por la facilidad en su interpretación es muy utilizado para el seguimiento y la dinámica de la vegetación terrestre global; para Silleos et al. (2006) es un índice que separa la vegetación de otro tipo de coberturas y es calculado a partir de la relación entre la banda del infrarrojo cercano (NIR) y banda del rojo (Red), que presenta una escala de medición entre 1 y -1, donde valores cercanos a cero (0) se entienden como superficies no vegetadas y valores negativos a superficies sin ningún tipo de vegetación, además de que minimiza los errores causados por la topografía sus valores indican el estado y la abundancia de la vegetación. Pudiéndose realizar comparaciones en diferentes épocas para determinar las dinámicas de la vegetación en un ecosistema

2.4.2 Índice de Vegetación Ajustado al Suelo SAVI: según lo expone Rodríguez-Moreno y Bullock (2013) este índice tiene como objetivo medir el vigor y la estructura del dosel de la vegetación sin embargo se incorpora un ajuste para la cubierta del suelo, para Silleos et al. (2006), este índice permite minimizar los efectos que tiene el suelo agregando una variable L, donde para vegetación muy densa toma el valor de uno (1), para vegetación medio densa toma el valor de 0,5 y para escasa vegetación puede tomar un valor de 0,25 todo depende de las variaciones del terreno.

2.4.3 Índice de Vegetación Mejorado EVI: Es un índice de vegetación utilizado principalmente para datos del sensor MODIS, según lo expone, Roldán y Poveda (2006), este corrige las distorsiones de la atmosfera causadas principalmente por nubes y aerosoles que pueden alterar las la captura de datos de los sensores, presentan factores C para corregir los efectos de la atmosfera G y L corresponden a valores de ajuste sobre el dosel de la vegetación, en este sentido se utiliza la banda del azul para corregir los efectos de los aerosoles sobre la banda roja; este VI mejora

la sensibilidad para detectar biomasa y reduce la influencia de la atmosfera Huete et al. (1999) citado por Silleos et al. (2006).

2.5 LANDSAT.

Según el servicio geológico de Estados Unidos (USGS, 2016), por sus siglas en inglés, el programa LANDSAT ha proporcionado a diferentes comunidades de usuarios información de calidad durante 40 años, este tipo de información se caracteriza por presentar una serie de datos multi-espectrales, continuos, calibrados y a mediana resolución de las propiedades de la superficie de la tierra, con el fin de proveer datos de calidad a los diferentes sectores y como característica especial se encuentran en acceso libre al público.

El programa LANDSAT se caracteriza por ser una serie de misiones espaciales a bordo de satélites desde el año de 1972 para la observación de la tierra, es gestionado por La Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) y el USGS, hasta el día de hoy se continúa registrando datos del cambio de la superficie terrestre desde el espacio, actualmente el programa continua en operación en su octava misión que se denomina “LANDSAT Data Continuity Mission” (LDCM), el cual continua con el registro de imágenes multi-espectrales para la observación de la tierra, continuando el legado de misiones anteriores (Ariza, 2013). Se observa la evolución del programa satelital del LANDSAT en la figura 7.

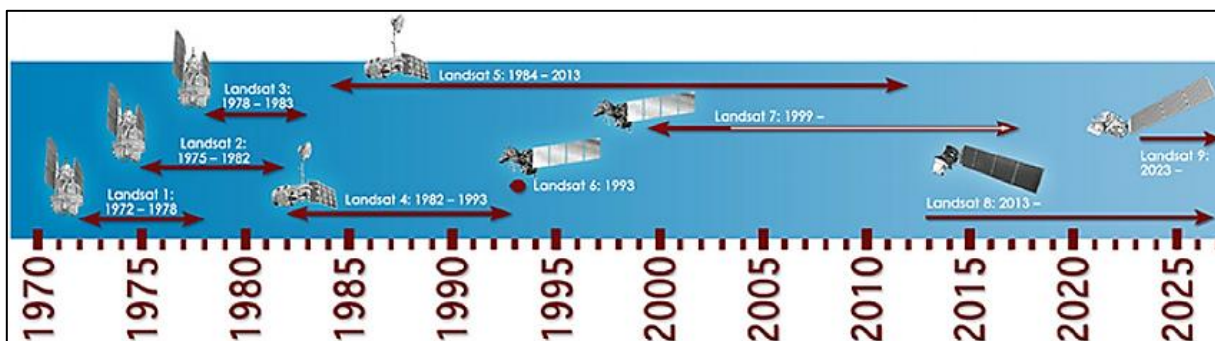


Figura 7. Evolución del programa satelital LANDSAT.

Fuente: Tomado de www.nasa.gov/images/content/669835main_2012timeline_lg.jpg

La misión LANDSAT 8 se caracteriza por seguir obteniendo imágenes de satélite de calidad en las zonas terrestres y costeras actualizando continuamente la base de datos existente, por otro lado posee características espectrales mejoradas que permite comprender la dinámica de los cambios globales y regionales (USGS, 2016).

Posee dos sensores los cuales son los responsables de capturar la información; según Ariza (2013) el Operational Land Imager (OLI) y el térmico infrarrojo Thermal Infrared Sensor (TIRS), el primero proporciona mejoras en los sistemas de captura de la bandas espectrales adicionando la banda 1 (azul profundo) para ser utilizada en el estudios de hídricos y costeros y la banda 9 (cirrus) para la detección de nubes, el segundo proporciona información sobre las bandas térmicas, posee un resolución radiométrica de 12 bits lo que proporciona una mejora en la capacidad de captura y registro de cambios en la superficie terrestre mejorando la capacidad que se tenía con las anteriores programas; de igual manera se recogen aproximadamente 400 escenas al día las cuales quedan disponibles 24 horas después a través del servidor del USGS; se presenta las características de las bandas espectrales del sensor OLI y TIRS en la tabla 1.

Tabla 1. Características espectrales del sensor OLI y TIRS

Bandas	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
Banda5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

Fuente: Adaptado de Ariza (2013).

2.6 Referencias metodológicas.

Diferentes autores a nivel mundial han utilizado estas técnicas para realizar avances en la investigación del monitoreo y estimación de la biomasa aérea y carbono de bosques con el uso de sensores remotos y datos de campo de inventarios forestales; tal es el caso de Saatchi et al. (2007) que utilizó imágenes del sensor MODIS, producto NDVI y datos de 544 mediciones de parcelas para diferentes especies vegetales además de datos ambientales del clima con el fin de cuantificar la biomasa aérea forestal en la cuenca Amazónica en sur América; en esa misma latitud Lu, Batistella, y Moran (2005) utilizaron imágenes del satélite LANDSAT sensor TM y datos de campo para estimar la biomasa aérea y la estructura de los bosques en el estado de Rondonia perteneciente a la cuenca Amazónica Brasileña; otro ejemplo es el de Du et al. (2014) donde utilizó imágenes del sensor MODIS, producto MCD12C1 (cobertura forestal) y datos del inventario nacional forestal periodo 2004 - 2008 para determinar y cartografiar la distribución espacial de la biomasa forestal en China.

Zheng et al. (2004) utilizó mediciones de 55 parcelas circulares de diferentes especies forestales y datos del satélite LANDSAT sensor ETM+ trabajando diferentes índices de vegetación y por medio de correlaciones estadísticas para estimar la biomasa aérea en bosques, le permitió clasificar coberturas de la tierra además de diferenciar bosques juveniles de bosques maduros a través de los contenidos de biomasa aérea en bosques al norte de Wisconsin, USA; al igual Günlü, Ercanli, Başkent, y Çakır (2014) manejaron imágenes de satélite del LANDSAT sensor TM y 10 índices de vegetación utilizaron 130 datos de mediciones de parcelas simples operando regresiones múltiples para la estimación de biomasa aérea en bosques de pinos al noroeste de Turquía.

Gunawardena, Nissanka, Dayawansa, y Fernando, (2015) realizaron aproximaciones en la estimación de biomasa en los bosques densos y otros tipos de vegetación del parque nacional de las llanuras de Hartón en Sri Lanka utilizando datos de sensores remotos RADAR ALOS PALSAR datos multi-espectrales del satélite IRS LISS III y térmicos del LANDSAT 8 además de datos de 55 parcelas de muestreo en campo donde se relacionó la biomasa estimada con el NDVI a través de métodos lineales obteniendo los mejores resultados con el uso de este índice y generando el mapa de distribución de la biomasa del parque; por otro lado Martínez-Barrón et al. (2016) realizaron la modelación de la biomasa y el carbono aéreo del estado de Durango en México utilizando imágenes del satélite LANDSAT sensor TM y datos de 39 parcelas de muestreo relacionando las bandas espectrales e índices de vegetación con biomasa y carbono aéreo estimado a partir de ecuaciones alométricas a través de regresiones lineales múltiples, obteniendo como resultado la estimación y la distribución espacial de biomasa y carbono aéreo para el área de estudio.

A nivel nacional Anaya, Chuvieco, y Palacios (2008) presentaron en su investigación un método para las estimaciones regionales de biomasa aérea en Colombia utilizando imágenes del sensor MODIS de los productos MOD44 y MOD13A1 y mapas de fracción vegetal (VCF), mediciones de biomasa aérea en campo con 44 parcelas reportadas en la literatura que varían de tamaño desde 0.01 ha hasta 1 ha realizadas

en Colombia, Venezuela y Panamá en diferentes coberturas vegetales como pastizales, bosques primarios y secundarios.

El Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM según Galindo et al. (2011) desarrolló una metodología para determinar los contenidos de biomasa aérea en bosques naturales a nivel país, utilizando datos de campo e información de sensores remotos, donde se utilizó técnicas de procesamiento digital de imágenes del satélite MODIS producto MOD43B4 y datos LIDAR del sensor GLAS ICESat, índices de vegetación e información de 3.022 parcelas permanentes y temporales de muestreo registradas en bosques para un periodo comprendido entre 1988 a 2010 estas variaron de tamaño entre 0.025 a 1.5 ha, además de variables ambientales, con esta metodología se determinó el mapa de biomasa aérea de Colombia para el año 2007.

Para la estimación y mapeo de carbono Saatchi et al. (2011) realizó una aproximación de las reservas de biomasa aérea y carbono para las Américas, África y el Sudeste Asiático a 1 Km de resolución, utilizando datos provenientes de diferentes sensores ópticos y activos, donde utilizó 4.079 datos de parcelas georeferenciadas de inventarios forestales de tamaño mayor a 0.1 ha, estimado la biomasa aérea de los bosques en estudio, el carbono se estimó utilizando una fracción del 50% de la biomasa aérea; al igual Baccini et al., (2012) estima la densidad de carbono almacenado en la biomasa aérea de los trópicos para la mismas zona de estudio a una resolución de 500 m utilizando teledetección y datos de campo para el periodo 2007- 2008 donde se concluye que la mayor cantidad de reservas de carbono en biomasa aérea se encuentran en los bosques naturales de las Américas

Otro ejemplo es el de Linh y Ngoc, (2016) donde utilizaron datos de sensores remotos del satélite Landsat 8 del Parque Nacional Bach Ma, situado en el centro de Vietnam en la provincia de Thua Thien Hue, además de mapas de cobertura de la tierra de diferentes años y bases de datos de estimaciones de biomasa aérea y carbono,

además del uso de índices de vegetación para realizar el mapeo de biomasa y reservas de carbono en tres tipos de bosques presentes en la zona.

Cabe resaltar que los estudios antes mencionados son de suma importancia para estimar los contenidos de biomasa aérea y carbono en los bosques naturales, sin embargo se han utilizado diferentes escalas de trabajo y metodologías para este fin, todas pueden ser aceptables desde los diferentes contextos de aplicación

3. METODOLOGÍA.

3.1 Área de estudio.

El santuario de Fauna y Flora de Iguaque SFFI, se encuentra ubicado en Colombia; Departamento de Boyacá, en jurisdicción de los municipios de Villa de Leiva, Arcabuco, Chíquiza y Sáchica; se caracteriza por tener una temperatura promedio entre 16,3° y 18,8°C, precipitaciones promedios por el orden de 810 mm/año, presenta un régimen de lluvias bimodal donde en el primer semestre llueve en los meses de marzo, abril y mayo, para el segundo semestre del año retornan lluvias en los meses de septiembre, octubre y noviembre, presenta un piso térmico frío a páramo y corresponde a una formación ecológica de bosque húmedo nuboso (selva húmeda) Parques Nacionales Naturales de Colombia, (2006). Se encuentra localizado entre las coordenadas geográficas 05°44'29.90" y 05°35'52.69" de latitud Norte sobre la línea del Ecuador y los 73°31'8.18" y 73°22'43.38" de longitud Oeste al meridiano de Greenwich, sobre la cordillera central de los Andes nororiente Colombiano, posee una superficie de 6.923 hectáreas y presenta elevaciones entre los 2.400 y 3.890 msnm, este santuario presenta dentro de su composición vegetal, bosques andinos y alto-andinos los cuales tienen como característica la presencia de especies forestales como *Weinmannia*, *Clusia*, *Miconia*, *Eugenia*, *Cedrela*, *Quercus*, entre otras. En la figura 8, se presenta el área de estudio.

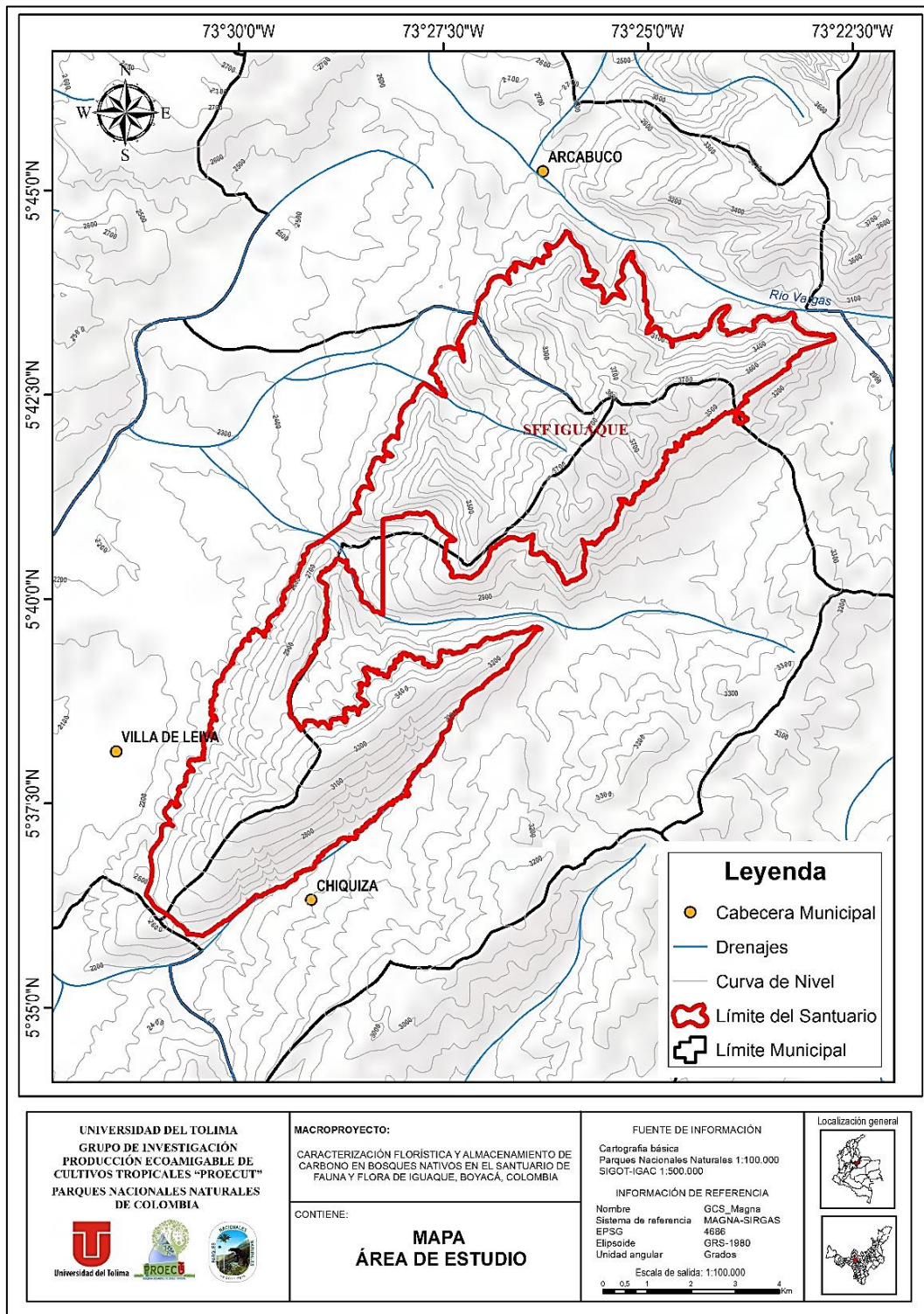


Figura 8. Mapa de localización del SFFI Boyacá Colombia

3.2 JUSTIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.

Dentro de la revisión de la literatura en el tema, se propone en dos fases el desarrollo del flujograma el cual dará respuesta a las preguntas de investigación; en este sentido la primera fase comprende el trabajo de campo en el cual fue indispensable la identificación de bosques y la realización de un inventario forestal para adquirir los datos de las parcelas y variables forestales georreferenciadas con el objetivo de estimar la biomasa aérea y el carbono real con datos de campo de los bosques del santuario, en la segunda fase se propuso lo relacionado con la adquisición y el procesamiento de datos de sensores remotos hallando los valores de índices de vegetación y realizando el proceso de correlación y distribución los cuales apuntan a cumplir con el objetivo general, este flujograma permite como primera medida la obtención de información primaria y el procesamiento digital de imágenes acorde para las necesidades técnicas; según el contexto puede ser ajustada según los objetivos del investigador. En la figura 9 se propone el esquema metodológico.

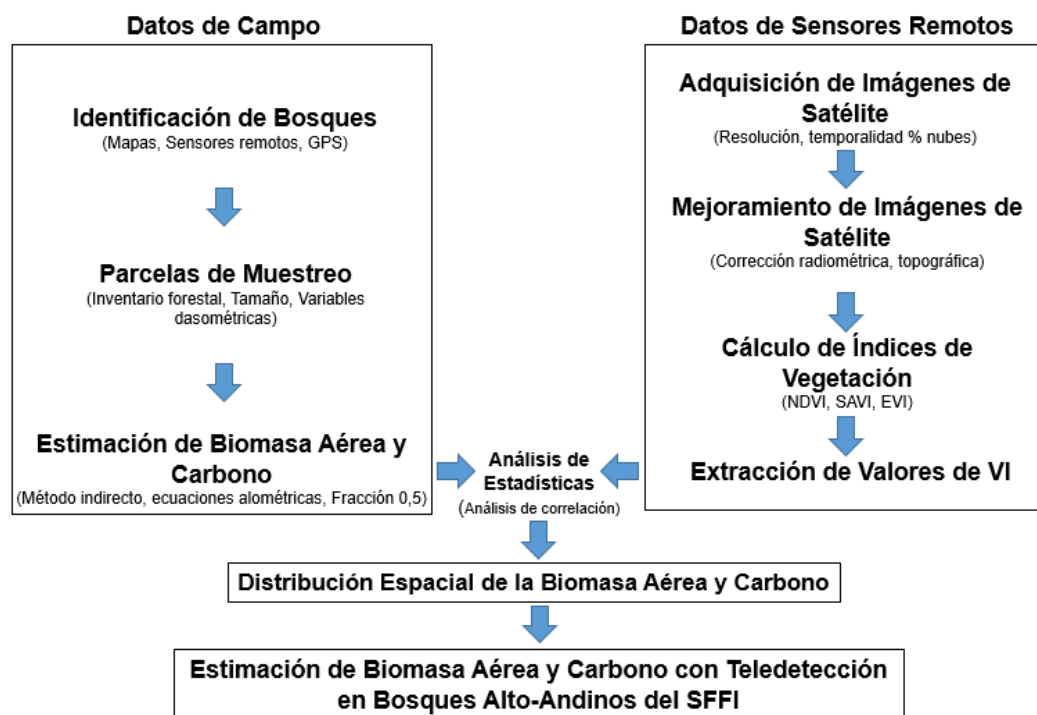


Figura 9. Esquema metodológico

3.3 DESARROLLO METODOLÓGICO.

3.3.1 Identificación de bosques del SFFI

Según Larrote y Corredor (2013), para la zona de estudio la entidad de Parques Nacionales Naturales de Colombia PNN, ha realizado el monitoreo satelital de las coberturas de la tierra para el periodo 2010-2012 a escala 1:100.000, mediante la interpretación visual de imágenes de satélite LANDSAT, actualizando la cartografía de coberturas y uso de la tierra bajo la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia para de los límites oficiales del santuario, las estadísticas de las coberturas y usos del suelo se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Coberturas y uso de la tierra periodo 2010-2012 SFFI.

Unidad	Código	Cobertura	Área Ha	%
Territorios Agrícolas	231	Pastos Limpios	4,30	0,06
	242	Mosaico de Pastos y Cultivos	102,14	1,48
	243	Mosaico de Cultivos, Pastos y Espacios Naturales	144,44	2,09
	244	Mosaico de Pastos con Espacios Naturales	12,95	0,19
Bosques y Áreas Seminaturales	3111	Bosque Denso Alto de Tierra Firme	1477,80	21,35
	3131	Bosque Fragmentado con Pastos y Cultivos	65,56	0,95
	3221	Arbustal denso	595,09	8,60
	3222	Arbustal abierto	1227,77	17,73
	314	Bosque de Galería y Ripario	31,65	0,46
	323	Vegetación Secundaria o en Transición	28,76	0,42
	321111	Herbazal Denso de Tierra Firme no Arbolado	1755,79	25,36
	321113	Herbazal Denso de Tierra Firme con Arbustos	1476,49	21,33
TOTAL			6923	100

Fuente: Autor, con base a la cartografía de coberturas y uso del suelo CLCC.

El Santuario posee el 21,35% del total de la superficie en bosques densos altos de tierra firme lo que corresponde a 1477,80 Hectáreas³, otras coberturas naturales representativas asociadas al ecosistema como arbustales abiertos, herbazales no

³ Estimada mediante el sistemas de referencia oficial para Colombia Magna-Sirgas zona central

arbolados y herbazales con arbustos con 17,73, 25,36 y 21,33% respectivamente; los bosques densos están definidos por la metodología CORINE Land Cover Colombia – CLCC, (IDEAM, 2010), como:

“Áreas con vegetación de tipo arbóreo caracterizada por un estrato más o menos continuo cuya área de cobertura arbórea representa más del 70% del área total del unidad, con altura del dosel superior a 15 metros y que se encuentra localizada en zonas que no presentan procesos de inundación periódicos”.

Se seleccionó la categoría de bosque denso alto de tierra firme como cobertura de estudio para realizar el inventario forestal y tener una guía en campo para el montaje de las parcelas. Se presenta la distribución de los bosques densos altos de tierra firme dentro del santuario en la figura 10.

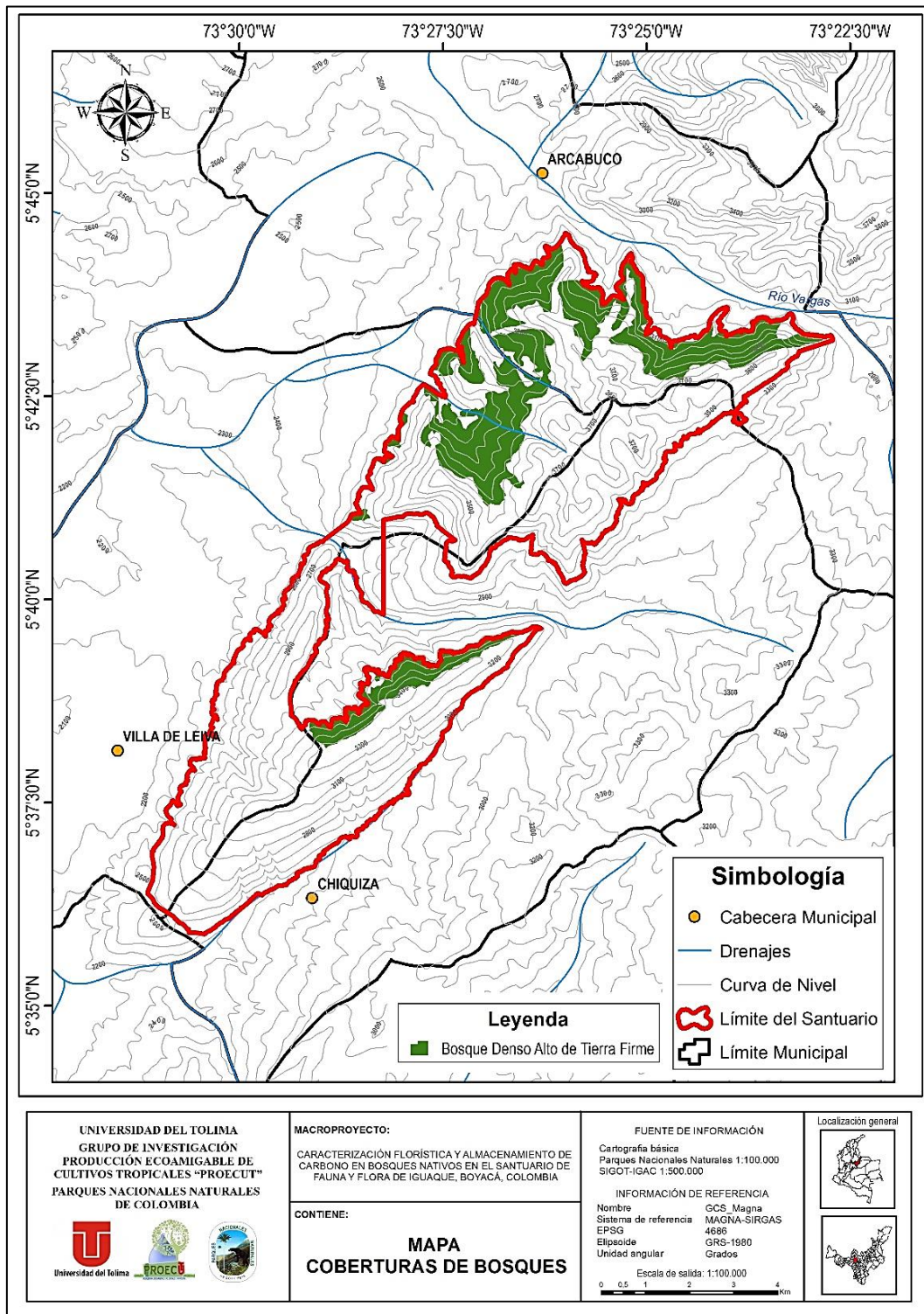


Figura 10. Mapa de localización de bosques densos en el SFFI

3.4 INVENTARIO FORESTAL.

3.4.1 Parcelas Temporales de Muestreo PTM

El inventario forestal se realizó en bosques densos del SFFI a finales del año 2016 e inicios del 2017, se midió 23 parcelas temporales de muestreo (PTM) al azar de un tamaño de 10 x 25 metros (250 m²) de forma rectangular, fueron muestreados individuos de árboles donde su diámetro a la altura del pecho (DAP) fuese mayor o igual a ≥ 10 cm de diámetro. Para llevar a cabo la medición de los árboles se utilizaron cintas diamétricas, donde se registró el diámetro del árbol al 1.30 m desde la base del árbol hasta la altura del pecho del censista, para georreferenciar las parcelas se utilizó un GPS GARMIN serie eTrex Vista HCx donde se registró el punto en la mitad de la parcela, con un re-muestreo de hasta de 2 minutos para lograr una precisión de ± 3 m por parcela, en el anexo 1 se presenta el listado de puntos. En la figura 11, se presenta la forma de la parcela.

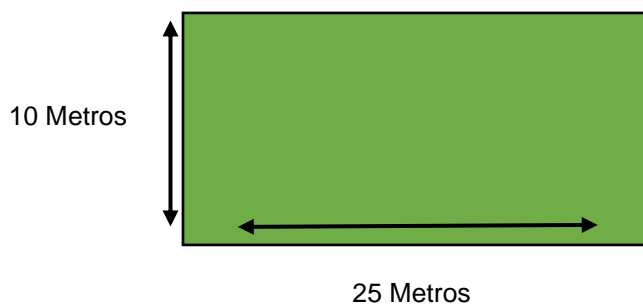


Figura 11. Forma y tamaño de las parcelas permanentes de muestreo.

Se realizó un mapa para determinar la ubicación de las parcelas y su distribución sobre los bosques densos, es importante mencionar que algunas PTM se realizaron en diferentes bosques que a la escala cartografiada no se distinguen en la cartografía oficial; la distribución de las parcelas en el santuario se presenta en la figura 12.

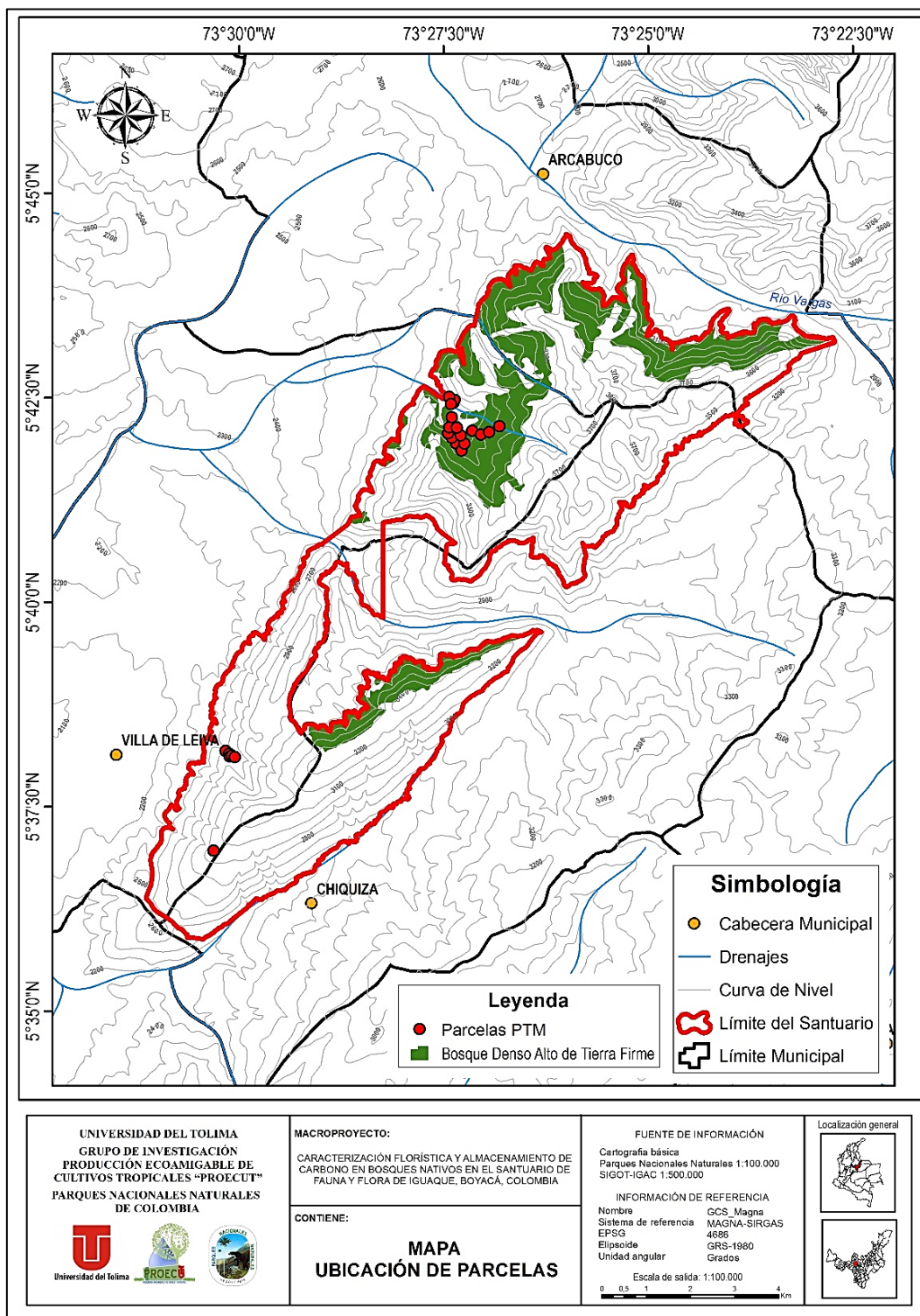


Figura 12. Mapa de ubicación de parcelas temporales de muestreo PTM.

3.4.2 Estimación de biomasa aérea y carbono

Para la estimación de la biomasa aérea de los árboles se utilizó la ecuación alométrica propuesta por Lerma y Orjuela (2014), elaborada a través del método destructivo para especies de árboles de bosques alto andinos caracterizando especies forestales de *Weimannia*, *Miconia*, y *Baccharis*, en Cajamarca, Colombia; Como resultado se presenta la siguiente ecuación:

$$LN(Bt) = -1.85 + 2.11 * LN(DAP) \quad (R^2=0,94)$$

Donde:

Bt: Biomasa arriba del suelo (Kg/árbol)

LN: Logaritmo natural

DAP: Diámetro a la altura del pecho.

Para determinar la biomasa aérea por parcela se realizó la sumatoria de las biomásas individuales de los árboles lo que arroja el resultado en Kg/par (kilogramo/parcela), para obtener los resultados en t/ha (tonelada/ha) se multiplica por un factor de 0,04 ya que cada parcela corresponde a 250 metros² (1/4 de hectárea); para determinar el contenido de carbono se multiplica la biomasa determinada por un factor de 0,5 ya que (Brown, 1997) asegura que aproximadamente el 50% de la biomasa de la vegetación forestal es carbono.

3.5 DATOS DE SENSORES REMOTOS.

3.5.1 Adquisición de imágenes de satélite

Se empleó 2 imágenes del Satélite LANDSAT 8 OLI_TIRS con fecha de febrero de 2016 (temporada seca) y de mayo del 2016 (temporada de lluvias), proporcionadas por la NASA a través del portal *LAND VIEWER* del *EOS DATA ANALYTICS*; las imágenes se seleccionaron a partir del criterio de % de nubosidad y de la estación climática del año; sin embargo para la imagen de estación lluviosa fue necesario

eliminar algunas nubes dentro del área, para no alterar los resultados se creó una máscara de nubes con la banda de calidad (*BQA*).

Se utilizó las bandas espectrales del azul (banda 2), roja (banda 4) infrarrojo IRC (banda 5); la información geográfica y de sensores remotos se trabajó en SIG de escritorio principalmente utilizando el software *ArcGIS* en la versión 10.3 y *gvSIG* en la versión 2.3, los datos estadísticos fueron manejados en el software estadístico *Infostat* versión 2017; Se presenta la descripción de los productos de sensores remotos en la tabla 3.

Para los datos de elevación se utilizó un modelo de elevación digital *DEM* con resolución de 1 arco/segundo (30 metros) de la misión *ASTER GDEM Versión 2* del proyecto internacional entre el METI y la NASA de octubre del 2011 a través del portal del *USGS EarthExplorer*, estos datos fueron mejorados con el fin de eliminar las depresiones o posibles errores al momento de la captura y re-proyectadas al sistema oficial para Colombia *MAGNA-SIRGAS*.

Tabla 3. Características de las imágenes del satélite LANDSAT 8.

Propiedades	Imagen Febrero 2016	Imagen Mayo 2016
ID de la imagen	LC80070562016032LGN00	LC80070562016144LGN00
Formato	GEOTIFF	GEOTIFF
Path/row	007/056	007/056
Fecha de captura	2016-02-01	2016-05-23
Acimut solar	128.76189712	56.31905694
Elevación solar	52.96286801	61.21069074
Cubrimiento de nubes	4,70%	55.94%
Proyección	UTM	UTM
Datum	WGS 84	WGS 84
Elipsoide	WGS 84	WGS 84
Zona Utm	18 N	18 N
Resolución Espacial	30 m Bandas Multiespectrales 30 m Bandas Termales 15 m Banda Pancromática	30 m Bandas Multiespectrales 30 m Bandas Termales 15 m Banda Pancromática

3.6 MEJORAMIENTO DE IMÁGENES DE SATÉLITE.

3.6.1 Corrección radiométrica

Para realizar la conversión de los niveles digitales (ND) de las bandas espectrales de la imagen a unidades físicas denominada reflectancia espectral, se utilizó los coeficientes radiométricos de calibración que se encuentran registrados en el metadato txt de la imagen, esto se realiza el fin de hallar la reflectancia espectral en el techo de la atmosfera (TOA) y reducir los posibles errores causados por el efecto atmosférico al momento de la captura de la imagen por el sensor, según el manual del usuario del LANDSAT 8 del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2016), se determina de acuerdo con la ecuación:

$$\rho\lambda' = M\rho * Q_{cal} + A\rho$$

Donde:

$\rho\lambda'$ = Valor de reflectancia planetaria TOA, sin corrección por ángulo solar.

$M\rho$ = Factor multiplicativo de escalado de la banda.

$A\rho$ = Factor aditivo de escalado de la banda.

Q_{cal} = Valor del pixel (DN).

Es necesario adicionar el ángulo solar dentro del cálculo ya que este incorpora la corrección de iluminación al centro de la escena de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\sin(\theta)}$$

Donde:

$\rho\lambda$ = Reflectancia planetaria TOA (sin unidades)

θ = Angulo de elevación solar

Para desarrollar la ecuación se obtuvo los parámetros de entrada del metadato de la imagen donde se obtuvo los valores aditivos y multiplicativos escalados y el valor del ángulo solar, se acoge lo expuesto por Chander, Markham, Helder, y Ali (2009), donde

aconsejan realizar los cálculos de los ángulos en radianes ya que diversos software utilizan radianes en vez de grados lo que puede alterar el resultado.

3.6.2 Corrección topográfica

Autores como, (Chuvieco, 2010; Civco, 1989; Gao y Zhang, 2009; Hantson y Chuvieco, 2011), entre otros, exponen la importancia de realizar la corrección topográfica en imágenes de sensores remotos ya que la luminosidad y el ángulo solar influyen en el efecto de sombreado topográfico en zonas montañosas y escarpadas, estas alteran los valores de la radiancia en los niveles digitales ND del pixel y recomiendan utilizar modelos digitales de elevación DEM para modelar las condiciones de iluminación al momento de la captura de la imagen con el fin de minimizar la variación del efecto topográfico. Se muestra algunos métodos utilizados para la corrección del efecto topográfico en imágenes de sensores remotos en la tabla 4.

Tabla 4. Métodos utilizados para corrección topográfica en imágenes de satélite.

Método	Ecuación	Autor
Cosine Corretion	$L_n = L \frac{\cos(\theta)}{\cos(i)}$	Teillet et al. (1982)
C-Corretion	$L_n = L \frac{\cos(\theta) + C}{\cos(i) + C}$	Teillet et al. (1982)
Minnaert correction	$L_n = L \left[\frac{\cos(\theta)}{\cos(i)} \right]^k$	Minnaert (1941)
SCS correction	$L_n = L \frac{\cos \alpha \cos \theta}{\cos i}$	Gu y Gillespie. (1998)
SCS+C correction	$L_n = L \frac{\cos \alpha \cos \theta + C}{\cos i + C}$	Soenen et al. (2005)

Donde:
 L_n : Iluminación topográfica corregida
 L : Iluminación topográfica no corregida
 i : Ángulo de incidencia (grados)
 θ : Ángulo solar Zenith (grados)
 α : Pendiente (grados)
 k : Constante de corrección Minnaert
 c : Constante de corrección C

Fuente: Modificado de Kane et al. (2008).

Para la corrección topográfica se utilizó el método de **C – Corection**; ya que autores como (Hantson y Chuvieco, 2011; Riaño, Chuvieco, Salas, y Aguado, 2003; Teweke, Kappas, Lauer, y Erasmi, 2006), ratifican la obtención de buenos resultados en la corrección topográfica de imágenes LANDSAT utilizadas en cubiertas forestales y en la clasificación de coberturas de la superficie terrestre, por lo que se utiliza según Teillet et al. (1982) la siguiente ecuación:

$$L_n = L \left\{ \frac{\text{Cos}(\phi) + C}{\text{Cos}(i) + C} \right\}$$

Para determinar la constante **C** se utilizó lo propuesto por Teillet et al. (1982) donde se presentó la siguiente ecuación:

$$C = \frac{m}{b}$$

Donde:

m= Pendiente de la línea de regresión

b= Intercepto de la línea de regresión

Se generó un modelo de relieve sombreado (Hillshade) derivado del DEM, donde la orientación se asignó con los valores en grados de los ángulo solar y acimut contenidos en el archivo del metadato (MTL) de la imagen; posteriormente se realizó la regresión lineal de la bandas en unidades de reflectancia contra el modelos de sombras en el software gvSIG 2.3 utilizando el algoritmo de correlación entre capas.

3.7 CÁLCULO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN.

Con base a las imágenes mejoradas se calculó los índices de vegetación (VI), estos índices son medidas cuantitativas generadas a partir de los valores corregidos de los pixeles de la imagen relacionando las bandas espectrales y generando valores únicos para determinar aspectos de la vegetación en la superficie de la tierra. Existe un gran variedad de VI, para realizar monitoreo de la vegetación y la biomasa, son ampliamente utilizados en imágenes multi-espectrales de diferentes resoluciones, en

esta investigación se propuso utilizar tres (3) VI, se muestra los índices que fueron utilizados en la tabla 5.

Tabla 5. Índices de vegetación utilizados.

Índice	Ecuación	Autor
Índice de diferencia normalizada (NDVI)	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Rouse et al. (1974)
Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red + L} \cdot (1 + L)$	Huete (1988)
Índice de vegetación mejorado (EVI)	$G \cdot \frac{NIR - Red}{L_2 + NIR + C_1 \cdot Red - C_2 \cdot Blue}$	Huete et al. (1999)

Donde:
 NIR, Red y Blue: Banda de reflectancia respectiva.
 L: 0,5
 L₂: 1
 G: 2,5
 C₁: 6
 C₂: 7.5

Fuente: Modificado de Moreira et al. (2016).

3.8 EXTRACCIÓN DE VALORES DE VI.

Se hizo la extracción de los valores para cada índice (valores digitales) sobre los puntos de biomasa aérea de las 23 parcelas temporales de muestreo, en este proceso se utiliza la herramienta Extract Multi Values to Points del software ArcGis 10.3, donde los puntos de las parcelas toman el valor del pixel, como los puntos geo-referenciados al centro de la parcela presentan una precisión de hasta $\pm 3m$, dado el caso del que el punto quede a borde de pixel o comparta relación con el pixel vecino se tomó el valor de ambos y se determinó un promedio. De igual manera se procedió a determinar los parámetros estadísticos del proceso, ya que estos van a ser utilizados para relacionar las variables forestales medidas en campo (biomasa aérea) y su relación con los valores de los VI trabajados.

3.9 ANÁLISIS DE ESTADÍSTICAS.

3.9.1 Análisis de correlación

Para el análisis estadístico se procedió a seleccionar las parcelas que tengan como mínimo una densidad de 30 árboles inventariados, sin embargo la parcela n° 23 se eliminó del análisis ya que su correlación disminuía los valores de ajuste y se trataba de un bosque secundario, se realizó la comparación de la biomasa aérea calculada por el método indirecto y los índices de vegetación calculados en la imagen; se realizó un análisis exploratorio utilizando el software estadístico Infostat versión 2017, donde se determina inicialmente el grado de relación entre los valores cuantitativos de las variables dependientes e independientes, través del método de correlación de Pearson.

$$r_{jk} = \frac{S_{jk}}{\sqrt{S_j^2 + S_k^2}}$$

Donde:

S_{jk} = Covarianza entre la variable j y k

S_j^2 = Varianza de la variable j

S_k^2 = Varianza de la variable k

Una vez determinado el mejor índice, se realizó las regresiones estadísticas lineales y no lineales entre las variables dependientes (biomasa aérea) y las variables independientes (VI) con el fin de determinar los mejores ajustes que puedan dar respuesta a los contenidos de biomasa aérea calcúlalos por medio de los índices de vegetación a través de la construcción de estadígrafos los cuáles permiten comparar los parámetros e indicadores para la construcción y ajuste del modelo.

Autores como Segura y Kanninen (2005) y Segura y Andrade (2008), recomiendan que los modelos pueden ser evaluados a través de indicadores; en este caso fueron seleccionados los resultados provistos por el Infostat que comprendieron:

- Coeficiente de determinación (R^2): Estadístico que tiene la capacidad de revelar si una variable puede ser explicada por otra y mide el grado de asociación entre las mismas, puede tomar valores entre 0 y 1 donde valores cercanos a uno serán los de mejor ajuste entre variables.
- Coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}): Medida que al igual que el R^2 busca determinar la relación entre variables sin embargo el ajuste consiste en incluir el tamaño del conjunto de datos y el número de variables incluidas en la regresión.
- Error Cuadrático Medio de Predicción (ECMP): Determina la variación y calcula el error promedio al cuadrado donde se determina la capacidad de ajuste.
- Criterio de Información Akaike (AIC): Representa una medida para la selección de modelos que ha sido generados a través de estadística para un conjunto de datos.
- Criterio de Información Bayesiano (BIC): Representa una medida de bondad para la selección de modelos y se relaciona directamente con los criterios del AIC.

Se determinó el mejor modelo matemático para los valores de NDVI de la imagen de temporada seca, adicional se procedió a evaluar la exactitud de predicción de biomasa aérea mediante el error cuadrático medio (RMSE) propuestos por Günlü et al. (2014), con la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 1}}$$

Donde:

n =Número de observaciones

y_i, \hat{y}_i = Valores observados y predichos de AB

Además se procedió a graficar los resultado obtenidos entre la biomasa aérea estimada y predicha para determinar su ajuste.

3.10 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA BIOMASA AÉREA Y CARBONO.

Se creó una máscara que posee los valores mínimos y máximos de NDVI para la estación seca hallados en las parcelas para los bosques del santuario, a través de la calculadora raster se aplica la fórmula del modelo generado con el fin de estimar en el pixel el contenido de biomasa aérea; para determinar el carbono se multiplica por un el factor de 0,5 y se genera la cartografía de la distribución de la biomasa aérea y carbono del santuario.

Se determinó 3 clases de rangos de biomasa aérea y carbono para determinar medidas en la distribución en el santuario, se realizó el proceso de vectorización de los datos y se calculó el área en hectáreas bajo el sistema oficial de referencia para Colombia Magna-Sirgas, EPSG 3116; al igual se multiplico el área con los contenidos de biomasa y carbono donde se determinó el valor total en las áreas de los bosques del santuario.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1 RESULTADOS

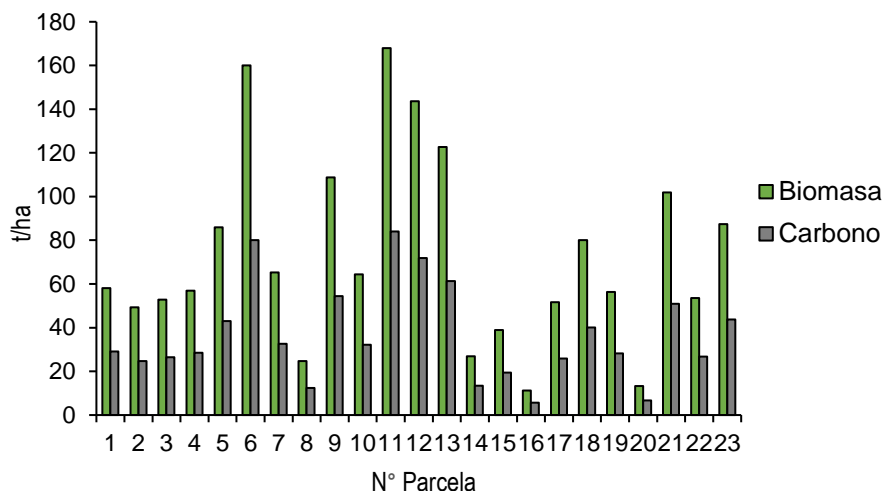
4.1.1 Estimación de biomasa aérea

Los resultados de biomasa aérea obtenida con la ecuación alométrica se presentan en la tabla 6, se registró un total de 602 árboles, se obtuvo que la biomasa aérea varió entre 11,22 y 167,95 t/ha y un promedio de 73,13 t/ha, al igual el carbono entre 5,61 y 83,98 t/ha y un promedio de 36,56 t/ha; en el grafico 1 se presenta la distribución de los contenidos de biomasa y carbono en las parcelas de muestreo.

Tabla 6. Biomasa aérea y carbono de las parcelas temporales de muestreo.

N° Parcela	N° Árboles	DAP Promedio	Biomasa		Carbono
			Kg/Parcela	t/ha	t/ha
1	13	19,27	1.453,06	58,12	29,06
2	32	13,18	1.234,04	49,36	24,68
3	30	13,75	1.322,02	52,88	26,44
4	25	14,82	1.423,00	56,92	28,46
5	33	16,31	2.147,16	85,89	42,95
6	47	17,35	4.000,72	160,03	80,02
7	36	14,21	1.632,87	65,31	32,66
8	19	12,16	616,5	24,66	12,33
9	47	15,61	2.720,84	108,83	54,42
10	20	16,89	1.609,00	64,36	32,18
11	34	20,8	4.198,87	167,95	83,98
12	44	13,08	3.591,46	143,66	71,83
13	33	18,7	3.067,37	122,69	61,35
14	17	13,30	673,55	26,94	13,47
15	18	14,85	970,93	38,84	19,42
16	9	11,97	280,48	11,22	5,61
17	19	15,68	1.292,45	51,7	25,85
18	19	19,01	2001,16	80,05	40,03
19	14	16,37	1409,06	56,36	28,18
20	12	11,25	333,75	13,35	6,68
21	25	19,24	2548,98	101,96	50,98
22	17	17,76	1339,21	53,57	26,79
23	39	15,14	2184,98	87,40	43,7
Total	602	347,4	42051,45	1682,05	841,025
		Min	280,48	11,22	5,61
		Max	4198,87	167,95	83,98
		Promedio	1828,32	73,13	36,56

Gráfico 1. Distribución de la biomasa aérea y carbono en PTM.



4.1.2 Mejoramiento de imágenes de satélite

Para el mejoramiento de las imágenes se realizó las respectivas operaciones en la plataforma SIG, para la corrección radiométrica, se calculó reflectancia al techo de la atmosfera (TOA); se puede observar las ecuaciones matemáticas empleadas en la tabla 7.

Tabla 7. Ecuaciones matemáticas para la corrección radiométrica.

Imagen febrero 2016	
Banda L8	Ecuación
Banda 2	$\rho\lambda' = ((2.0000E-05 * \text{banda2}) - 0.100000) / (\text{Sin}(52.96286801 * \pi / 180))$
Banda 4	$\rho\lambda' = ((2.0000E-05 * \text{banda4}) - 0.100000) / (\text{Sin}(52.96286801 * \pi / 180))$
Banda 5	$\rho\lambda' = ((2.0000E-05 * \text{banda5}) - 0.100000) / (\text{Sin}(52.96286801 * \pi / 180))$
Imagen mayo 2016	
Banda 2	$\rho\lambda' = ((2.0000E-05 * \text{banda2}) - 0.100000) / (\text{Sin}(61.21069074 * \pi / 180))$
Banda 4	$\rho\lambda' = ((2.0000E-05 * \text{banda4}) - 0.100000) / (\text{Sin}(61.21069074 * \pi / 180))$
Banda 5	$\rho\lambda' = ((2.0000E-05 * \text{banda5}) - 0.100000) / (\text{Sin}(61.21069074 * \pi / 180))$

Se realizó el cálculo de los parámetros descritos para la corrección topográfica y determinar el factor **C**, se relaciona los valores entre el Hillshade y los valores de

reflectividad TOA de las bandas espectrales, se genera una regresión lineal donde se divide el intercepto con la pendiente de la ecuación; se presentan las ecuaciones matemáticas empleadas en la tabla 8.

Tabla 8. Ecuaciones de regresión lineal para determinar el factor C.

Imagen L8	Banda	Ecuación de regresión	Valor R ²	Factor C
Febrero	2	0,0755 + -0,0033(Cos(i))	0,016%	-22,8787
	4	0,0544 + -0,0077(Cos(i))	0.024%	-7,0649
	5	0,1597 + -0,0287(Cos(i))	0.1%	-5,5644
Mayo	2	0,1034 + 0,0173(Cos(i))	0.027%	5,9768
	4	0,0804 + 0,0175(Cos(i))	0.02%	4,5942
	5	0,221 + 0,0299(Cos(i))	0.024%	7,3913

De igual manera se generó las ecuaciones para determinar la corrección topográfica en los esfuerzos de eliminar el sombreado topográfico de las bandas individuales, se presentan las ecuaciones matemáticas empleadas en la tabla 9.

Tabla 9. Ecuaciones matemáticas para la corrección topográfica.

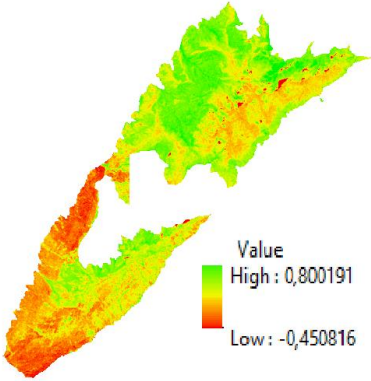
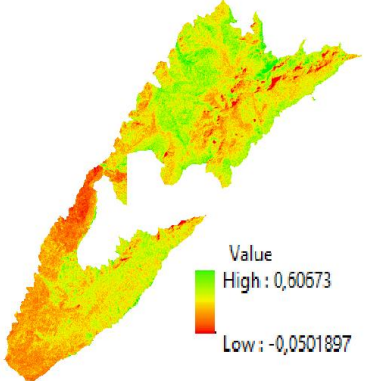
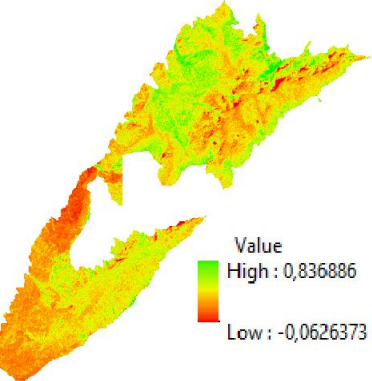
Imagen L8	Banda	Ecuación
Febrero	2	$L_h = L = \frac{\text{Cos}(52.96286801 * \frac{\pi}{180}) + (-22,8787)}{\text{Cos}(i) + (-22,8787)}$
	4	$L_h = L = \frac{\text{Cos}(52.96286801 * \frac{\pi}{180}) + (-7.0649)}{\text{Cos}(i) + (-7.0649)}$
	5	$L_h = L = \frac{\text{Cos}(52.96286801 * \frac{\pi}{180}) + (-5,5644)}{\text{Cos}(i) + (-5,5644)}$
Mayo	2	$L_h = L = \frac{\text{Cos}(61.21069074 * \frac{\pi}{180}) + (5,9768)}{\text{Cos}(i) + (5,9768)}$
	4	$L_h = L = \frac{\text{Cos}(61.21069074 * \frac{\pi}{180}) + (4,5942)}{\text{Cos}(i) + (4,5942)}$
	5	$L_h = L = \frac{\text{Cos}(61.21069074 * \frac{\pi}{180}) + (7,3913)}{\text{Cos}(i) + (7,3913)}$

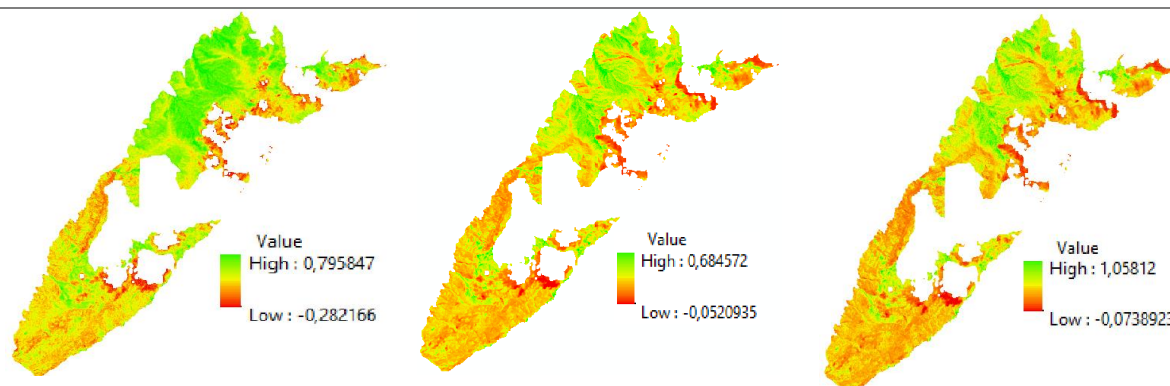
4.1.3 Cálculo de índices de vegetación

Se calculó 3 índices de vegetación para la imagen de febrero (estación seca) y mayo (estación lluviosa) del área de estudio; se representan los resultados obtenidos y se muestran los parámetros estadísticos calculados en la tabla 10.

Los valores de VI presentan valores estándar entre -1 y 1 para las ambas imágenes se realiza una representación visual del resultados de los VI utilizando la rampa de colores de *ARCGIS 10.3 Red to Green*, donde los tonos verdes representan valores cercanos a 1 y los tonos rojos presentan valores cercanos a -1, esto se realiza para cada VI calculado.

Tabla 10. Índices de vegetación calculados para el SFFI.

ÍNDICE DE VEGETACIÓN					
Imagen febrero (Temporada seca)					
	NDVI		SAVI		EVI
					
	Value High : 0,800191 Low : -0,450816		Value High : 0,60573 Low : -0,0501897		Value High : 0,836886 Low : -0,0626373
Mínimo	-0,45	Mínimo	-0,05	Mínimo	-0,06
Máximo	0,80	Máximo	0,61	Máximo	0,84
Promedio	0,51	Promedio	0,26	Promedio	0,33
Imagen mayo (Temporada lluviosa)					



Mínimo	-0,28	Mínimo	-0,05	Mínimo	-0,07
Máximo	0,80	Máximo	0,68	Máximo	1,06
Promedio	0,49	Promedio	0,26	Promedio	0,37

Para la imagen de febrero se presentó valores mínimos de NDVI, SAVI y EVI de -0,45, -0,05 y -0,06 y valores máximos de VI 0,80, 0,61 y 0,84, donde se obtiene un promedio de 0,51, 0,26 y 0,33 respectivamente; para la imagen de mayo se obtiene valores mínimos de -0,28, -0,05 y -0,07 y valores máximos de 0,80, 0,68 y 1,06 donde se obtiene un promedio de 0,49, 0,26 y 0,37 respectivamente.

4.1.4 Extracción de valores VI

La extracción de los valores de VI con el cruce entre los puntos de las 23 parcelas con los valores mínimos, máximos y promedios se presenta en la tabla 11. Se publicó la distribución de los VI con respecto al valor del pixel de las parcelas inventariadas en los bosques naturales del santuario para la temporada seca y lluviosa como se presenta en la gráfica 2 y 3.

Tabla 11. Valores de VI para las 23 parcelas de muestreo.

Imagen	Parámetro	Índice de vegetación		
		NDVI	SAVI	EVI
Febrero	Mínimo	0,519	0,238	0,315
	Máximo	0,707	0,419	0,561
	Promedio	0,641	0,331	0,444
Mayo	Mínimo	0,54	0,241	0,334
	Máximo	0,734	0,456	0,674
	Promedio	0,652	0,386	0,560

se obtuvo valores para la imagen de febrero en promedio para valores de bosque de NDVI, SAVI y EVI de 0,641, 0,331 y 0,444 respectivamente, para la imagen de mayo se obtuvo valores promedios de 0,652, 0,386 y 0,560 respectivamente, presentando para las imágenes de estación lluviosa valores más alto en los VI, sin embargo se observa que los valores máximos para la estación seca y lluviosa corresponden a 0,707 y 0,734 respectivamente, esto permite observar que a bajas densidades de árboles aumenta el valor del VI.

Gráfico 2. Valores de índices de vegetación para bosques en temporada seca.

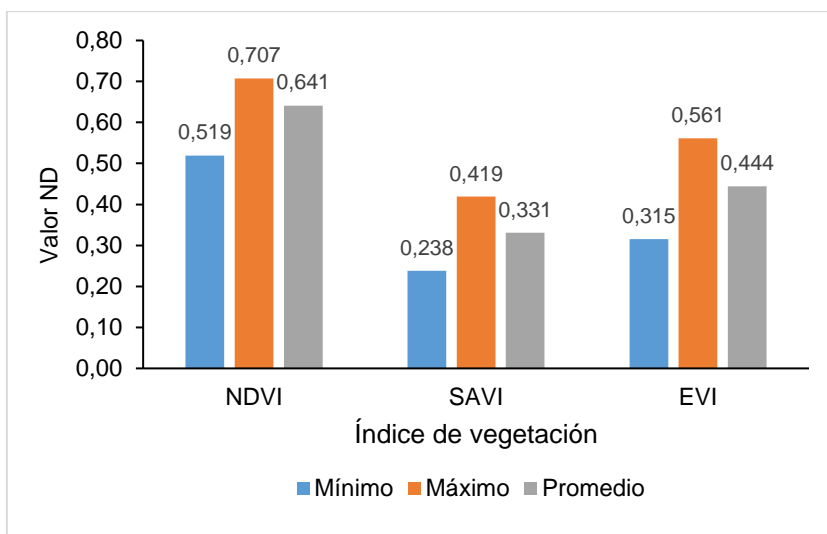
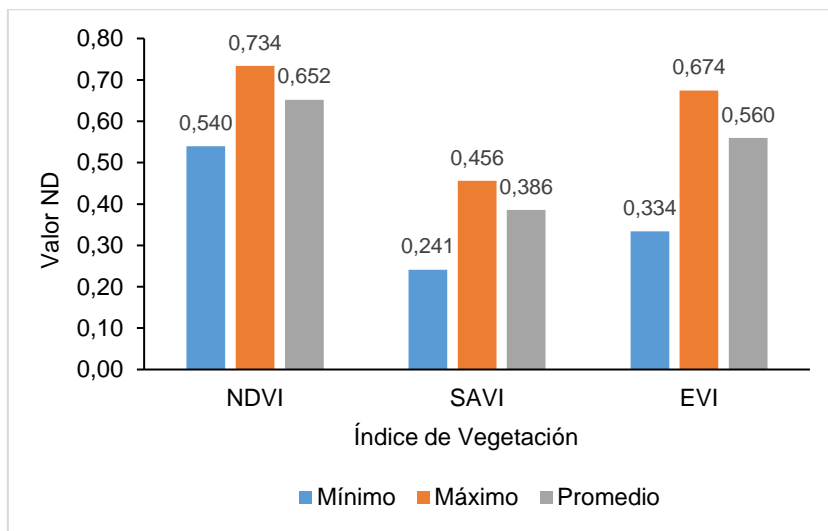


Gráfico 3. Valores de índices de vegetación para bosques en temporada lluviosa.



4.1.5 Análisis de correlación

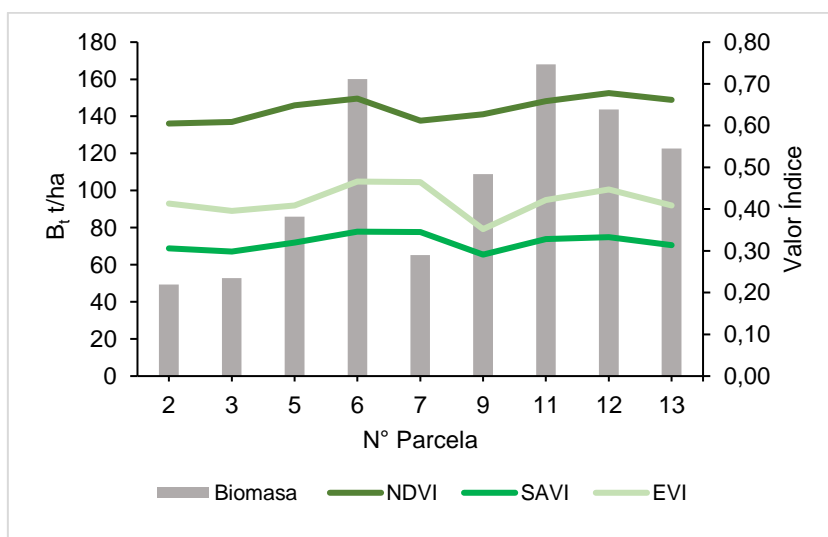
Se presenta los datos de los valores de la biomasa aérea relacionada con los valores de índices de vegetación para ambas fechas, donde se observó variabilidad frente a los contenidos de biomasa estimados con variables dasométricas en la tabla 12.

Tabla 12. Comparación de la biomasa estimada por parcela y los VI.

Parcela	N° Árboles	B _T t/ha	Febrero (Seca)			Mayo (Lluviosa)		
			NDVI	SAVI	EVI	NDVI	SAVI	EVI
2	32	49,36	0,605	0,306	0,413	0,598	0,241	0,334
3	30	52,88	0,609	0,298	0,396	0,640	0,349	0,539
5	33	85,89	0,649	0,320	0,409	0,693	0,409	0,577
6	47	160,03	0,665	0,346	0,466	0,671	0,421	0,635
7	36	65,31	0,612	0,345	0,465	0,646	0,370	0,545
9	47	108,83	0,627	0,291	0,352	0,659	0,378	0,558
11	34	167,95	0,659	0,328	0,422	0,675	0,389	0,577
12	44	143,66	0,678	0,333	0,447	0,662	0,399	0,601
13	33	122,69	0,662	0,314	0,409	0,726	0,410	0,599

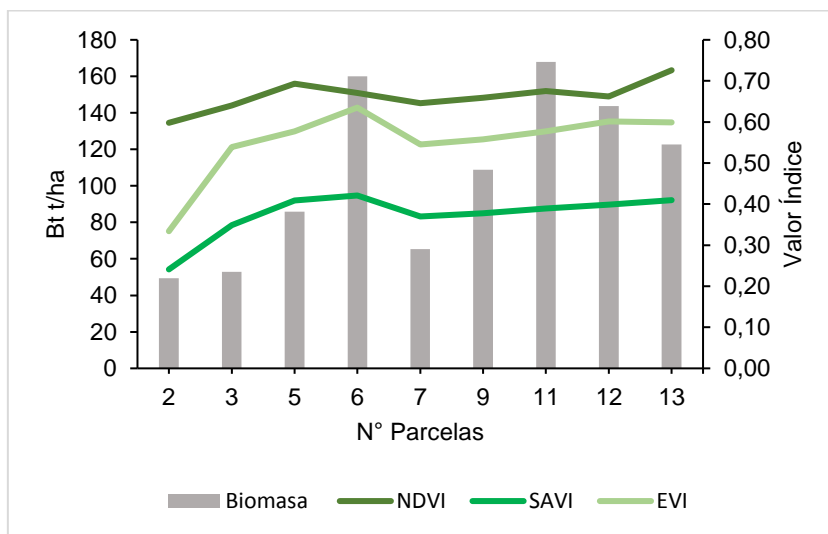
se observó que para la imagen de febrero (estación seca) el NDVI presenta aumento del valor en la parcela 6 y 11 de 0,665 y 0,659 respectivamente que contienen los mayores estimaciones de biomasa aérea, por su parte la parcela 12 presentó un valor de NDVI de 0,678 siendo el mayor valor registrado para una medida de biomasa de 143,66 t/ha; para el índice SAVI y EVI su tendencia es similar presentando una disminución de su valor en la parcela 9 con 0,291 y 0,352 respectivamente para un registro de 108,83 t/ha; se presenta en el grafico 4.

Gráfico 4. Índices de temporada seca vs contenidos de biomasa aérea.



Se observó que para la imagen de Mayo (temporada lluviosa) existió un aumento en los valores de NDVI en la parcela 5 y 13 de 0,693 y 0,726 para una estimación de biomasa aérea de 85,89 y 122,69 t/ha respectivamente; para el índice SAVI y EVI su tendencia es similar, sin embargo en la parcela 6 presentó un aumento en su valor de 0,421 y 0,635 respectivamente para un valor estimado de biomasa de 160,03 t/ha; se presenta en el grafico 5.

Gráfico 5. Índices de temporada lluviosa vs contenidos de biomasa aérea.



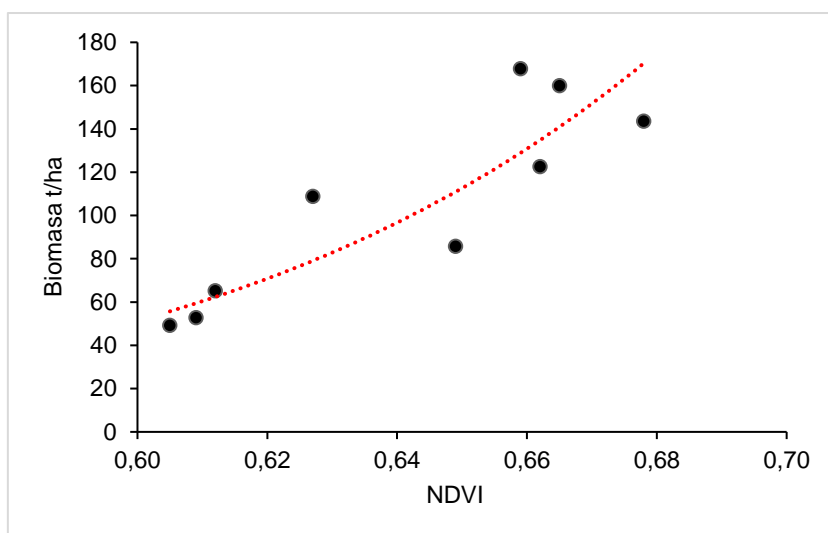
Según el análisis de Pearson, el índice de vegetación que mejor correlación presentó fue el NDVI de la imagen de temporada seca con un valor de R de 0,88; la imagen de temporada lluviosa presentó que el SAVI y el EVI demostraron correlaciones de 0,67 y 0,68 respectivamente siendo estas los valores más altos de R para ese periodo; se observan los valores de correlación de la biomasa aérea respecto a los índices de vegetación para ambas fechas, se presenta en la tabla 13.

Tabla 13. Coeficientes de Correlación de Pearson.

Estación	Parámetro	B _T	Febrero (seca)			Mayo (lluviosa)		
		t/ha	NDVI	SAVI	EVI	NDVI	SAVI	EVI
	t/ha	1,00						
Febrero (seca)	NDVI	0,88	1,00					
	SAVI	0,44	0,46	1,00				
	EVI	0,25	0,31	0,95	1,00			
	NDVI	0,55	0,71	0,18	-0,01	1,00		
Mayo (lluviosa)	SAVI	0,67	0,74	0,42	0,20	0,84	1,00	
	EVI	0,68	0,72	0,42	0,22	0,77	0,98	1,00

Se observó la distribución entre los valores del índice de vegetación y la biomasa aérea calculada en las parcelas donde mostró un comportamiento donde la tendencia obedece a mayor valor de índice de vegetación es mayor el contenido de biomasa aérea estimada en campo sin embargo el valor del índice varío y la gráfica toma una forma de J; se presenta en el grafico 6.

Gráfico 6. Correlación entre la biomasa aérea y el NDVI de temporada seca.



Se realizó la construcción del estadígrafo con los diferentes modelos aplicados para la determinación de variables y los criterios de evaluación donde se observó que el modelo 4 presenta un R^2 de 0,82 siendo el que mejor se ajusta a la tendencia es una función de tipo potencial se presenta en la tabla 14.

Tabla 14. Estadígrafo para la determinación del modelo.

N°	Modelo	Parámetros		R^2	R^2 aj	ECMP	AIC	BIC
		a	b					
1	$B_i = a + b \cdot (\text{NDVI})$	-821,27	1447,80	0,78	0,74	783,60	85,72	86,31
2	$B_i = a + b \cdot \text{Ln}(\text{NDVI})$	519,27	925,81	0,78	0,75	769,76	85,62	86,21
3	$\text{Ln}(B_i) = a + b \cdot (\text{NDVI})$	-5,25	15,33	0,81	0,79	0,07	1,78	2,37
4	$\text{Ln}(B_i) = a + b \cdot \text{Ln}(\text{NDVI})$	8,95	9,81	0,82	0,79	0,07	1,56	2,16

Dónde: a y b= parámetros del modelo; R^2 =Coeficiente de determinación; R^2 aj=Coeficiente de determinación ajustado; ECMP=Error medio cuadrático ponderado; AIC=Criterio de información Akaike; BIC= Criterio de información Bayesiano.

Se procedió a construir la ecuación matemática tipo potencial, generalizando los parámetros calculados a partir del estadígrafo utilizando las constantes a y b calculadas en el programa estadístico Infostat, como resultado se presenta la siguiente ecuación:

$$B_t = 7707,89 * (NDVI)^{9,81} \quad (R^2=0,82)$$

Se observó los resultados obtenidos con la ecuación elaborada para la estimación de la biomasa aérea donde los valores de NDVI son utilizados para predecir los contenidos de biomasa total; se presenta en la tabla 15.

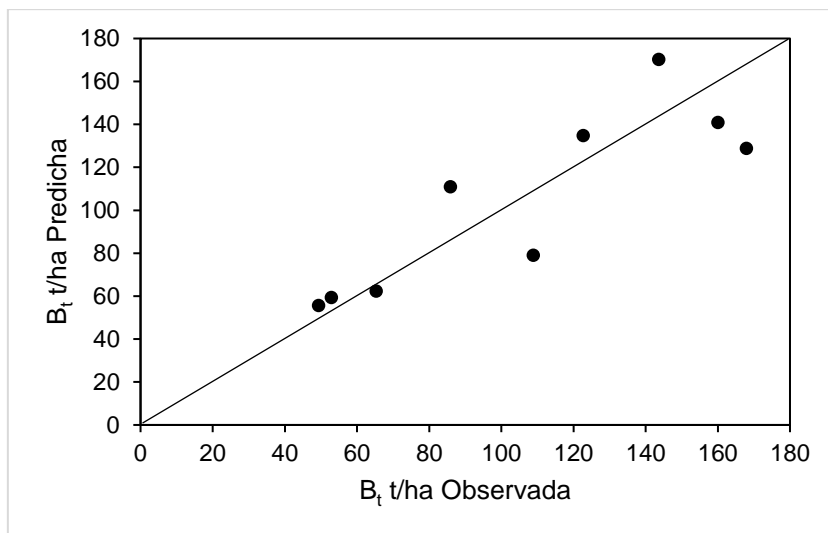
Tabla 15. Valores de biomasa aérea observada y predicha por el modelo.

Parcela	N° Árboles	B_t Observada	B_t Predicha	RMSE
2	32	49,36	55,71	
3	30	52,88	59,43	
5	33	85,89	110,93	
6	47	160,03	140,87	
7	36	65,31	62,37	
9	47	108,83	79,09	
11	34	167,95	128,88	
12	44	143,66	170,33	
13	33	122,69	134,76	
Promedio		106,29	104,71	17,11

Se observó un valor promedio de biomasa aérea observada para las nueve parcelas de 106,29 t/ha, para la biomasa predicha se observó un valor de 104,71t/ha, según el resultado se obtiene un RMSE de biomasa aérea de 17 t/ha.

Se mostró claramente la comparación entre los valores de biomasa aérea observada y predicha utilizando los valores de VI en las nueve parcelas las cuales se ajustaron a la tendencia de la biomasa observada; se presenta en el gráfico 7.

Gráfico 7. Relación entre los valores de biomasa aérea observada y predicha.



4.1.6 Distribución espacial de la biomasa aérea y carbono

Se obtuvo una distribución espacial de biomasa aérea en tres clases que comprendieron intervalos de menor a mayor de 55 a 100, de 100 – 140 y de 140 – 170 t/ha respectivamente, al utilizar una ecuación tipo potencial, se utilizó en *Arcgis* el operador “Power” en la calculadora raster.

Se presentó los valores de área para cada clase de distribución y el porcentaje de participación sobre el total del área del santuario, en la figura 13 y 14 se mostró el mapa de distribución de la biomasa aérea y carbono del santuario, donde se observó dos zonas que concentran principalmente las mayores densidades de bosques naturales, una franja al suroeste del santuario que comprende alturas entre los 3.000 y 3.300 m.s.n.m presenta rangos en su mayoría de entre 55 y 100 t/ha de biomasa aérea; en la parte norte del santuario esta la mayor presencia de bosques naturales que representó una heterogeneidad en los contenidos de biomasa aérea

comprendiendo los 3 rangos de distribución estando focalizados en sectores; se presenta en la tabla 16.

Tabla 16. Área estimada en la distribución de rangos de biomasa aérea y carbono.

Clase	Biomasa t/ha	Carbono t/ha	Área Ha	%
1	50-100	28-50	569,80	8,23
2	100-140	50-70	421,36	6,09
3	140-170	70-85	222,46	3,21
Total			1213,62	17,53
Área Santuario			6923	100

Se presentó la clase 1, 2 y 3 que poseen un área de 569,80, 421,36 y 222,46 hectáreas respectivamente siendo la clase 1 la que comprendió rangos de biomasa aérea y carbono entre 50 y 100 t/ha la de mayor participación en el santuario con un porcentaje del 8,23% del total del área de estudio; la suma de las 3 clases tipo bosques natural alcanzó un área total de 1213,62 hectáreas que correspondió al 17,53% del total del área del santuario.

El área oficial en la cartografía vectorial oficial de PNN a escala 1:100.000 de los bosques densos altos de tierra firme del santuario corresponde a 1477,80 hectáreas, ostentó una diferencia de 264,18 hectáreas con respecto a los resultados obtenidos en este estudio, sin embargo al multiplicar el área calculada en hectáreas con la biomasa aérea y carbono promedio para las 23 parcelas se obtuvo que el santuario posee un total de 88752,03 toneladas de biomasa aérea y 44376,01 toneladas de carbono almacenadas en los bosques naturales.

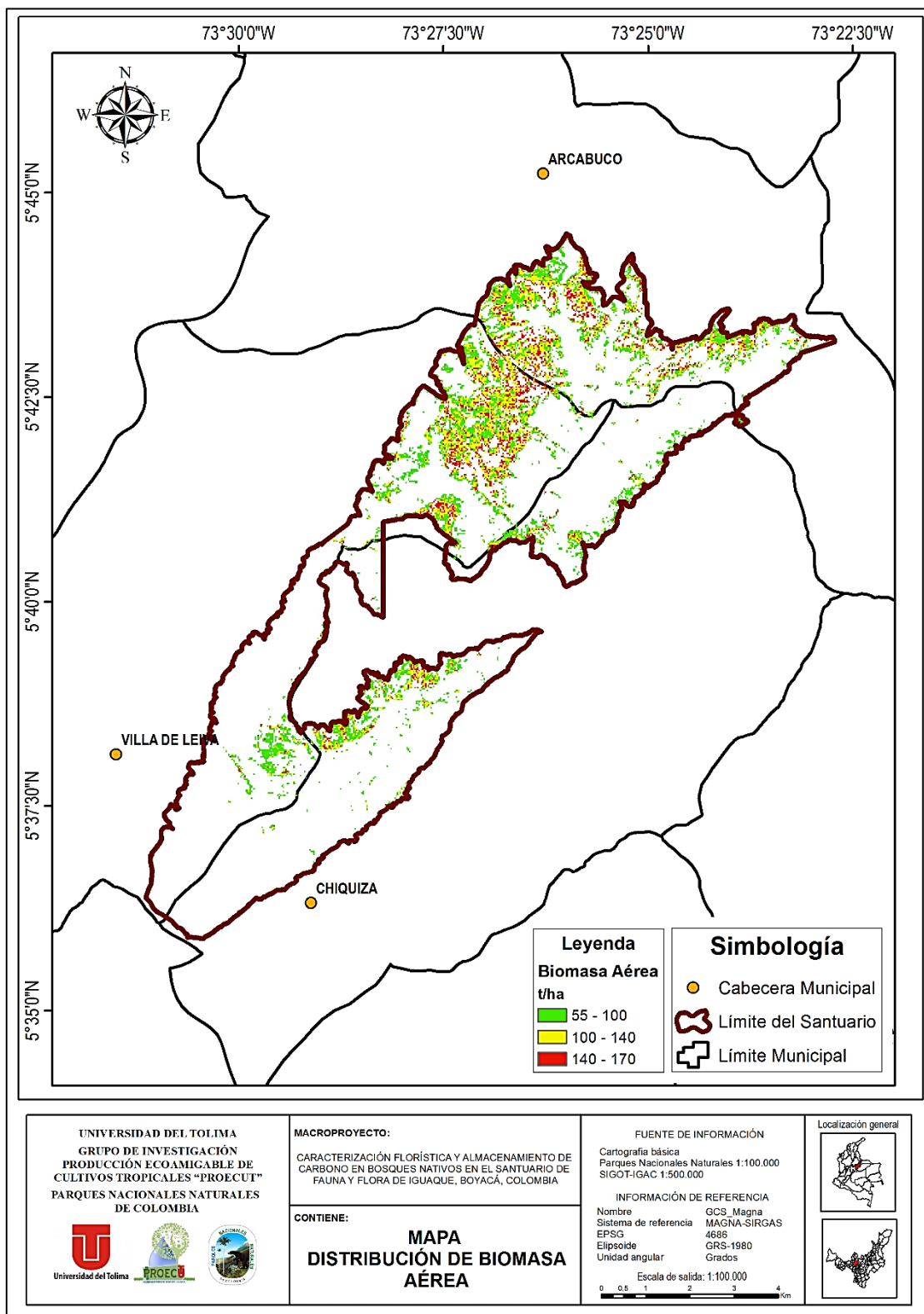


Figura 13. Mapa de distribución de la biomasa aérea en el santuario.

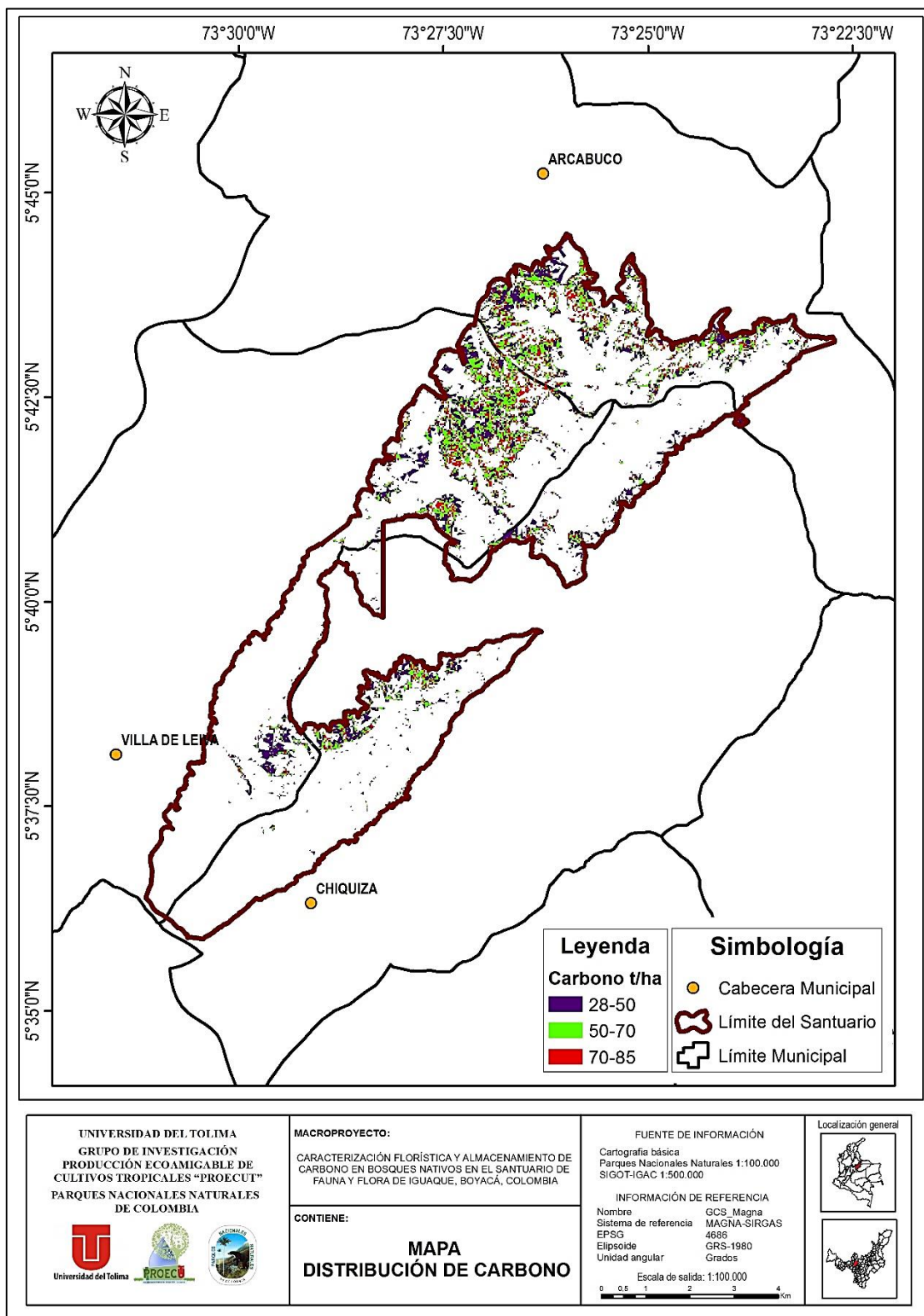


Figura 14. Mapa de distribución de carbono en el santuario.

4.2 DISCUSIÓN.

Los bosques del santuario en promedio contienen una biomasa aérea de 73,13 t/ha, en general varían los contenidos entre 11,22 y 167,95 t/ha, los valores promedio de carbono es de 36,56 t C/ha y varían entre 5,81 y 83,98 t C/ha valores que se encuentran por debajo con los reportados por Phillips et al. (2011) y donde para los bosques naturales de Colombia el promedio de biomasa aérea varía entre 96,2 y 258,9 t/ha y para carbono entre 48,1 y 129,4 t C/ha respectivamente; Mojica (2013) reporta para bosques andinos maduros con especies de *Weimannia* y *Miconia* promedios de biomasa aérea de 173 t/ha y contenidos de carbono promedios de 87 t C/ha, por otro lado Yepes-Quintero et al. (2011) en su investigación para las estimaciones de biomasa aérea en Antioquia, reportaron para bosques de tierras altas (alturas superiores a los 1.500 m.s.n.m) valores entre 25 y 102 t/ha; y para carbono valores entre 12,61 y 51,19 t C/ha siendo estos resultados acordes a los reportados en este estudio.

Las estimaciones de biomasa aérea y carbono en este estudio permiten observar que los bosques del santuario presentan diferentes edades de desarrollo lo que trae consigo variabilidad en los diámetros de los árboles para el aporte de la biomasa aérea utilizando ecuaciones alométricas, este fenómeno puede presentarse debido a procesos antrópicos que alteran la estructura original del bosque o procesos naturales relacionados con la sucesión natural bosque y las condiciones medioambientales propias del ecosistema, lo que concuerda con lo mencionado por Vásquez y Arellano (2012), aunque se han desarrollado estudios a nivel nacional para las estimaciones de biomasa aérea y carbono de bosques naturales andinos, este estudio presenta el primer reporte local sobre la estimación de la biomasa aérea y carbono en los bosques del santuario de fauna y flora Iguaque.

Los valores obtenidos de los VI para la imagen de estación seca y lluviosa son similares con los obtenidos por Gonzaga (2014), donde utiliza 3 índices de vegetación en imágenes LANDSAT 7 ETM+ para determinar diferentes coberturas vegetales presentes en la zona centro de la provincia de Loja Ecuador, donde obtiene valores de NDVI entre -0,154 y 0,828, para SAVI entre -0,150 y 0,641 y para MSI entre -0,618 y 1,30; por su parte Leal (2015) en su investigación en la cuenca del río Combeima en Ibagué Colombia, halló operando imágenes LANDSAT 5 TM para el mes de julio y agosto correspondientes a meses de estación seca, valores de NDVI entre -0,13 y 0,91 y entre -0,05 y 0,78 respectivamente, de la misma manera, Gasparri, Parmuchi, Bono, Karszenbaum, y Montenegro (2007), en su investigación en la región forestal del parque chaqueño en el noroeste de Argentina para estaciones climáticas de invierno y verano encuentran variaciones de NDVI entre 0,44 y 0,77 y de SAVI entre 0,17 y 0,37 que se ajustan a los obtenidos en este estudio.

Los VI extraídos para los bosques del santuario representan el valor promedio que pueden catalogar este tipo de formaciones vegetales en diferentes épocas del año lo que se asemeja a los resultados obtenidos por, Alatorre, Beguería y Vicente-Serrano, (2010) obtienen para bosques frondosos en imágenes del primavera y verano de una serie temporal desde 1989 a 2007 del LANDSAT TM y ETM+ en España, valores de NDVI promedio 0,63; para los valores de SAVI fueron cercanos a los obtenidos por, Sinha, Sharma, y Nathawat, (2015) donde para bosques densos de la reserva natural Sariska en la India, utilizando imágenes de satélite del LANDSAT ETM+ obtienen valores promedios de 0,41; por otro lado los valores de EVI fueron superiores a los registrados por, Basualdo, Huykman, Volante, Piñeiro, y Paruelo (2012) donde hallaron que para bosques primarios y bosques secundarios en las provincias de Salta y Santiago del Estero en Argentina utilizando imágenes LANDSAT y MODIS valores promedios de 0,33 y 0,339 respectivamente.

Los índices de vegetación tienen la capacidad de detectar la abundancia y el vigor de la vegetación en un determinado territorio pero presentan una dinámica según las condiciones medioambientales, esto se traduce en que los VI se ven influenciados por las condiciones climáticas principalmente precipitación y temperatura, es necesario comparar el valor de los índices para las temporadas climáticas seca y lluviosa y así determinar las características fisiológicas en diferentes épocas del año, además de poder monitorear las dinámicas de la vegetación y las relaciones con el cambio climático esto concuerda con lo dicho por (Gupta, 2014; Suepa, Qi, Lawawirojwong, y Messina, 2016; Wang, Rich, y Price, 2003).

El ajuste del modelo de este estudio es compatible con los resultados obtenidos por Devagiri, Money, Singh, Dadhawal, y Patil (2013), que al comparar las estimaciones de biomasa aérea de ocho tipos de bosques y relacionarlos con el NDVI de imágenes MODIS al suroeste del estado de Karantaka en la India obtienen los mejores ajustes estadísticos para modelos tipo exponencial y potencial con R^2 de 0,8074 y 0,8056 respectivamente lo que se asemeja a los valores estimados en este estudio; en este sentido Steininger (2000), utilizó imágenes LANDSAT TM y modelos no lineales para la estimación de biomasa aérea en bosques tropicales secundarios de Brasil y Bolivia, un R de 0.714 valor que está por debajo del estimado; de igual manera Wu et al. (2016) para bosques mixtos al Noroeste de Zhejiang en China, utiliza imágenes LANDSAT OLI para el cálculo del NDVI donde a través de regresiones con el algoritmo Random Forest (árboles de decisión) obtiene correlaciones de R^2 superior a 0,90 y RMSE de 12 t/ha; por otro lado en los resultados obtenidos por Galindo et al. (2011) para la biomasa aérea de los bosques de Colombia en el año 2010 utilizando imágenes LANDSAT, se obtienen rangos de biomasa promedio que oscilan entre 125,1 y 295,1 t/ha para los bosques del santuario, resultados que están sobreestimados a los obtenidos en esta investigación.

Los valores de índices de vegetación pueden variar debido a las condiciones, fenológicas y de densidad de copas en un bosque, además se pueden presentar parcelas con estimaciones de biomasa atípicas debido a la heterogeneidad de los bosques del santuario ya que se pueden presentar bosques con diferentes edades de desarrollo, lo que puede influir con el análisis estadístico y el respectivo ajuste del modelo, lo que concuerda con lo expuesto por, (Devagiri et al. 2013; Escandon, De jong, Ochoa, March, y Castillo, 1999).

Los datos derivados de sensores remotos tienen un gran potencial al proveer información de ecosistemas a diferentes escalas y temporalidades, esto se convierte en una alternativa viable para la estimación periódica de la biomasa aérea en bosques naturales tropicales, las imágenes LANDSAT son una fuente de datos ópticos de fácil acceso que permiten integrar diferentes enfoques investigativos para determinar las relaciones entre los datos colectados en inventarios forestales y el uso de índices de vegetación, lo que concuerda con lo expuesto por, (Foody et al. 2003; Lu et al. 2014 y Steininger, 2000).

5. CONCLUSIONES.

Se concluye que la metodología utilizada en este estudio da respuesta a las preguntas de investigación y objetivos antes planteados y queda como referente para seguir utilizando la teledetección en estudios de investigación que involucren temas sobre el monitoreo y gestión forestal en pro de medidas para la mitigación al cambio climático a nivel del Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Colombia SINAP; por otro lado se pudo derivar información técnica importante a escala del santuario como:

La estimación del contenido de biomasa aérea y carbono de los bosques naturales del santuario de fauna y flora Iguaque a partir de la medición en campo de variables dasométricas y el uso de ecuaciones alométricas, se obtuvo un valor promedio de 73,13 t/ha, y 36,56 t C/ha, sin embargo estos bosques son heterogéneos ya que presentan diferentes edades de desarrollo encontrando una alta variación entre los contenidos de biomasa aérea y carbono mínimo y máximo del orden de 11,22 hasta 167,95 t/ha y entre 5,61 y 83,98 t C/ha respectivamente; esta investigación demostró que aproximadamente se posee un total de 88752,03 toneladas de biomasa aérea y 44376,01 toneladas de carbono almacenado en los bosques naturales del santuario, presentando un gran potencial para el secuestro de CO₂. Por otro lado el establecimiento de parcelas temporales de muestreo PTM son una herramienta fundamental para el registro rápido y eficaz de variables dasométricas como el DAP y el uso de ecuaciones alométricas denota la mejor opción para estimar de forma apropiada los contenidos de biomasa aérea en ecosistemas forestales andinos ya que son los principales almacenes de carbono sobre la superficie terrestre.

El uso de índices de vegetación derivados de las imágenes del satélite LANDSAT 8 y la correlación con la biomasa aérea estimada bajo variables dasométricas del inventario forestal, permitió la construcción de un modelo matemático no lineal de tipo potencial con un R² de 0,82 el cual obtuvo un RMSE de 17 t/ha bajo el índice NDVI

para la temporada seca, cuyos valores para el tipo de cobertura de bosque natural fluctuó en valores de índice mínimo y máximo de 0,605 y 0,678 respectivamente para una densidad de 30 árboles por parcela establecida, este índice represento la mejor correlación entre los parámetros utilizados para la estimación de biomasa aérea a través de teledetección; En este sentido Las imágenes LANDSAT son una fuente de datos de sensores remotos clave ya que dada la accesibilidad a los datos, la resolución y las diferentes metodologías para la calibración y mejoras de las imágenes las convierten en un insumo importante cuando se utilizan para temas de observación y monitoreo de bosques naturales a escala del santuario.

Se determinó tres clases en la distribución espacial de la biomasa aérea los cuales oscilaron entre 55 -100, de 100 -140 y 140 – 170 t/ha y de carbono entre 28 – 50 50 – 70 y 70 – 85 t C/ha respectivamente, donde se presentó que la clase uno es la de mayor porcentaje con el 8,23% y un área de 569,80 hectáreas siendo este el de mayor repartición, lo que permitió a través de un mapa establecer una primera aproximación del patrón de distribución de la biomasa aérea y carbono a resolución de 30 metros a nivel de los bosques naturales del santuario, lo cual servirá como línea base para el establecimiento de programas de monitoreo y manejo de bosques naturales con fines de conservación.

6. RECOMENDACIONES.

Con base a los resultados obtenidos se recomienda establecer un programa para el establecimiento de parcelas de muestreo el cual permita obtener más información sobre la composición, estructura y función de los bosques como también sobre el monitoreo de los contenidos de biomasa aérea y carbono del santuario; también es de gran interés el establecimiento de una red de parcelas permanentes de monitoreo PPM distribuidas según las características de la vegetación para determinar atributos ecológicos los cuales permitirán entender a un nivel más detallado las dinámicas que se presentan en ecosistemas forestales andinos.

Es de suma importancia aumentar el nivel de detalle de las categorías en la cartografía oficial de las coberturas y uso del suelo ya que aportará en la toma de decisiones y la selección de sitios para el establecimiento de parcelas y monitoreo de bosques naturales del santuario.

Se hace necesario experimentar con imágenes de otro tipo de sensores remotos ópticos de mayor resolución como RADAR y LIDAR, el uso de índices de vegetación y datos de inventarios forestales para optimizar y ajustar las estimaciones de biomasa aérea y carbono del santuario de fauna y flora Iguaque; de igual manera se recomienda realizar según los objetivos, estudios similares en otros ecosistemas forestales que permitan establecer una metodología acorde que pueda ser utilizada para el monitoreo de bosques naturales a escala del Sistema Nacional de Áreas Protegidas - SINAP en Colombia.

7. REFERENCIAS.

- Alatorre, L. C., Beguería, S., & Vicente-Serrano, S. M. (2010). Análisis de la Evolución Espacio-Temporal del NDVI Sobre Áreas Vegetadas y Zonas de Riesgo de Erosión en el Pirineo Central. *Revista de Ecología de Montaña*, 165, 7–27. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2010.165001>
- Alvarez, G. (2008). *Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba , Bolivia*. (Tesis de Maestría) Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza-CATIE.Turrialba, Costa Rica.
- Anaya, J. A., Chuvieco, E., & Palacios, A. (2008). Estimación de biomasa aérea en Colombia a partir de imágenes MODIS. *Revista de Teledetección*, 30, 5–22.
- Andrade-Castañeda, H. J., Arteaga-Céspedes, C. C., & Segura-Madrigal, M. A. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué , Tolima (Colombia). *Corpoica Ciencia Y Tecnología Agropecuaria*, 18(1), 103–112.
- Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission) Versión 1.0. *Centro de Investigación Y Desarrollo - CIAF*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Tomado de: www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf
- Baccini, A., Goetz, S. J., Walker, W. S., Laporte, N. T., Sun, M., Sulla-Menashe, D., ... Houghton, R. A. (2012). Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*, 2, 182. Tomado de: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1354>
- Bannarri, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13, 95–120. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>
- Basualdo, M., Huykman, N., Volante, J. N., Piñeiro, G., & Paruelo, J. M. (2012). Dinámica Temporal de Atributos Funcionales de Cultivos Agrícolas, Bosques Maduros y Secundarios en el Chaco Semiarido. *Congreso Argentino de Teledetección. El Medio Ambiente Y Sus Cambios: Un Desafío Para La Información Espacial.*, 5. Tomado de: http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-dinamica_temporal_atribut.pdf
- Brown, S. (1997). *Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer*. FAO Forest Paper 134. Roma, Italia.

- Brown, S., Schreder, P., & Kern, J. S. (1999). Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. *Forest Ecology and Management*, 123, 81–90. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00017-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00017-1)
- Chander, G., Markham, B. L., Helder, D. L., & Ali, E.-. (2009). Remote Sensing of Environment Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS , TM , ETM + , and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893–903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Chen, G., & Wang, J. (2008). Spectral Reflectance and Aboveground Biomass Estimation of the Grassland under Protection Condition. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 462–467.
- Chuvienco, E. (2010). *Teledetección Ambiental* (Tercera Ed). Barcelona, España: Ariel Editorial.
- Civco, D. L. (1989). Topographic Normalization of Landsat Thematic Mapper Digital Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55(9), 1303–1309.
- Cortés, L., Hernández, J., Valencia, D., & Corvalán, P. (2014). Estimation of Above-Ground Forest Biomass Using Landsat ETM+, Aster GDEM and Lidar. *Forest Research Open Access*, 3(2), 1–7. <https://doi.org/10.4172/2168-9776.1000117>
- Das, S., & Singh, T. P. (2012). Correlation analysis between biomass and spectral vegetation indices of forest ecosystem. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 1(5), 1–13.
- Devagiri, G. M., Money, S., Singh, S., Dadhawal, V. K., & Patil, P. (2013). Assessment of above ground biomass and carbon pool in different vegetation types of south western part of Karnataka , India using spectral modeling. *Tropical Ecology*, 54(2), 149–165.
- Du, L., Zhou, T., Zou, Z., Zhao, X., Huang, K., & Wu, H. (2014). Mapping Forest Biomass Using Remote Sensing and National Forest Inventory in China. *Forests*, 1267–1283. <https://doi.org/10.3390/f5061267>
- Escandon, J., De jong, B., Ochoa, S., March, I., & Castillo, M. (1999). Evaluación de dos métodos para la estimación de biomasa arbórea a través de datos LANDSAT TM en Jusnajib La Laguna , Chiapas , México : estudio de caso. *Investigaciones Geográficas*, 40, 71–84. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14350/rig.59095>

- FAO. (2006). *Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2005 Hacia la ordenación forestal sostenible*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. (2007). *Definitional issues related to reducing emissions from deforestation in developing countries*. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization of The United Nations.
- FAO. (2014). *El estado de los bosques del mundo 2014 Potenciar los beneficios socioeconómicos de los bosques*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. (2016). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015 ¿Cómo están cambiando los bosques del mundo?* (2nd ed.). Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Figuroa, M. E. (2007). *Los sumideros naturales de CO2: una estrategia sostenible entre el cambio climático y el Protocolo de Kyoto desde las perspectivas urbana y territorial*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla, Secretariado de Publicaciones. Tomado de: <https://books.google.com.co/books?id=feddlyn-TP8C>
- Foody, G. M., Boyd, D. S., & Cutler, M. E. J. (2003). Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment*, 85(4), 463–474. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00039-7](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00039-7)
- Foody, G. M., Cutler, M. E., McMorrow, J., Pelz, D., Tangki, H., Boyd, D. S., & Douglas, I. (2001). Mapping the biomass of Bornean tropical rain forest from remotely sensed data. *Global Ecology and Biogeography*, 10(4), 379–387. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2001.00248.x>
- Galindo, G. ., Cabrera, E., Vargas, D. ., Pabón, H. ., Cabrera, K. ., Yepes, A. ., ... Ordoñez, M. . (2011). *Estimación de la Biomasa Aérea Usando Datos de Campo e Información de Sensores Remotos Version 1.0*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM.
- Gao, Y., & Zhang, W. (2009). LULC Classification and Topographic Correction of Landsat-7 ETM+ Imagery in the Yangjia River Watershed: the Influence of DEM Resolution. *Sensors*, 9(3), 1980–1995. <https://doi.org/10.3390/s90301980>

- Gasparri, N. I., Parmuchi, M. G., Bono, J., Karszenbaum, H., & Montenegro, C. L. (2007). Utilidad de imágenes Landsat 7 ETM+ de diferentes fechas para la estimación de biomasa aérea en bosques subtropicales secos de Argentina. *Congreso de La Asociación Española de Teledetección*, 9. Tomado de: https://www.academia.edu/14746785/Utilidad_de_imágenes_Landsat_7_ETM_de_diferentes_fechas_para_la_estimación_de_biomasa_aérea_en_bosques_subtropicales_secos_de_Argentina
- Gayoso, J., & Guerra, J. (2005). Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque*, 26(2), 33–38.
- Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, J. O., & Foley, J. A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, 2, 1–13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045023>
- Gonzaga, C. (2014). “ *Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM + y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador.*(Tesis de Maestría) Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires, Argentina.
- González, M. (2008). *Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de Pinus maximinoi H. E. Moore, Pinus oocarpa var. ochoterenai Mtz. y Quercus sp. en el norte del Estado de Chiapas, México.* Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza-CATIE.
- Gross, J. E., Woodley, S., Welling, L. A., & Watson, J. E. M. (2016). *Adapting to Climate Change: Guidance for protected area managers and planners. Best Practice Protected Area Guidelines.* Gland, Switzerland: UICN.
- Gu, D., & Gillespie, A. (1998). Topographic Normalization of Landsat TM Images of Forest Based on Subpixel Sun–Canopy–Sensor Geometry. *Remote Sensing of Environment*, 64(2), 166–175. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00177-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00177-6)
- Gunawardena, A. R., Nissanka, S. P., Dayawansa, N. D. K., & Fernando, T. T. (2015). Estimation of Above Ground Biomass in Horton Plains National Park, Sri Lanka Using Optical, Thermal and RADAR Remote Sensing Data. *Tropical Agricultural Research*, 26(4), 608–623.
- Günlü, A., Ercanli, I., Başkent, E. ., & Çakır, G. (2014). Estimating aboveground biomass using Landsat TM imagery: A case study of Anatolian Crimean pine forests in Turkey. *Annals of Forest Research*, 57, 289–298. Tomado de: <http://www.afrjournal.org/index.php/afr/article/view/278>

- Gupta, U. (2014). Study of Temporal Variation of Vegetation Indices and Phenology of Tropical Deciduous Broadleaf Forest in Eastern India. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(8), 9–12. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-8-569-2014>
- Hall, R. J., Skakun, R. S., Arsenault, E. J., & Case, B. S. (2006). Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM + data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest Ecology and Management*, 225, 378–390. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.01.014>
- Hantson, S., & Chuvieco, E. (2011). Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(5), 691–700. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.05.001>
- Houghton, R. A. (2005). Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance. *Global Change Biology*, 11, 945–958. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00955.x>
- Houghton, R. A., Lawrence, K. T., Hackler, J. ., & Brown, S. (2001). The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. *Global Change Biology*, 7, 731–746. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2001.00426.x>
- Huete, A., Justice, C., & Leeuwen, W. van. (1999). *MODIS Vegetation Index (MOD 13) Algorithm Theoretical Basis Document Version 3*. NASA. Goddard Space Flight Center.
- Huete, A. R. (1988). soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2015). *Informe del Estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables 2015*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. New York, USA: Cambridge University Press.

- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York, USA: Cambridge University Press.
- Kane, V. R., Gillespie, A. R., Mcgaughey, R., Lutz, J. A., Ceder, K., & Franklin, J. F. (2008). Remote Sensing of Environment Interpretation and topographic compensation of conifer canopy self-shadowing. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3820–3832. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.001>
- Lapeyre, T., Alegre, J., & Arévalo, L. (2004). Determinación de las Reservas de Carbono de la Biomasa Aérea, en Diferentes Sistemas de Uso de la Tierra en San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*, 3(1,2), 35–44.
- Larrote, J. P., & Corredor, L. P. (2013). Monitoreo Satelital de las Coberturas de la Tierra Para la Caracterización de Indicadores de Estado y Presión en los Parques Nacionales Naturales de Colombia. (Periodo 2010-2012). Tomado de: www.parquesnacionales.gov.co/.../MULTITEMPORAL_COBERTURAS_07-12.pdf
- Leal, J. (2015). *Incidencia del Cambio de las Coberturas Vegetales en la Distribución Espacial de los Deslizamientos en la Cuenca Del Río Combeima (Ibagué – Tolima, Colombia)*. (Tesis de Maestría) Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia.
- Lerma, M., & Orjuela, E. (2014). *Modelos Alométricos para la Estimación de la Biomasa Aérea Total en el Páramo de Anaime, Departamento del Tolima, Colombia*. Universidad del Tolima.
- Linh, H. K., & Ngoc, B. (2016). Mapping biomass and carbon stock of forest by remote sensing and GIS technology at Bach Ma National Park , Thua Thien Hue province, 8(2), 80–87. <https://doi.org/10.13141/jve.vol8.no2.pp80-87>
- Liu, W., Gao, W., Gao, Z., & Wang, X. (2006). Correlation analysis between the biomass of oasis ecosystem and the vegetation index at Fukang. *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability III*, 6298, 1–7. <https://doi.org/10.1117/12.678178>
- Lu, D. (2005). Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 26(12), 2509–2525. <https://doi.org/10.1080/01431160500142145>
- Lu, D. (2006). The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 27(7), 1297–1328. <https://doi.org/10.1080/01431160500486732>

- Lu, D., Batistella, M., & Moran, E. (2005). Satellite Estimation of Aboveground Biomass and Impacts of Forest Stand Structure. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71(8), 967–974. <https://doi.org/10.14358/PERS.71.8.967>
- Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Liu, L., & Moran, E. (2014). A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, 37–41. <https://doi.org/10.1080/17538947.2014.990526>
- Lumbres, R. I. C., & Lee, Y. J. (2014). Forest Science and Technology Aboveground biomass mapping of La Trinidad forests in Benguet , Philippines , using Landsat Thematic Mapper data and k-nearest neighbor method. *Forest Science and Technology*, 1–8. <https://doi.org/10.1080/21580103.2013.866171>
- Main-knorn, M., Cohen, W. B., Kennedy, R. E., Grodzki, W., Dirk, P., Grif, P., & Hostert, P. (2013). Remote Sensing of Environment Monitoring coniferous forest biomass change using a Landsat trajectory-based approach. *Remote Sensing of Environment*, 139, 277–290. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.010>
- Martínez-Barrón, R. A., Aguirre-Calderón, O. A., Vargas-Larreta, B., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., & Yerena-Yamallel, J. I. (2016). Modelación de biomasa y carbono arbóreo aéreo en bosques del estado de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(35), 91–106.
- Minnaert, M. (1941). The reciprocity principle in lunar photometry. *The Astrophysical Journal*, 93(3), 403–410. Tomado de: <http://ci.nii.ac.jp/naid/10025320718/en/>
- Mohd Zaki, N. A., & Abd Latif, Z. (2017). Carbon sinks and tropical forest biomass estimation: a review on role of remote sensing in aboveground-biomass modelling. *Geocarto International*, 32(7), 701–716. <https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1178814>
- Mojica, C. A. (2013). *Caraterización, Almacenamiento de Carbono y Emisiones Evitadas en Bosques Nativos en Áreas de Influencia del Páramo de Anaime Tolima, Colombia.*(Tesis de Pregrado) Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia.

- Moreira, E. P., Valeriano, M. de M., Sanches, I. D. A., & Formaggio, A. R. (2016). Topographic Effect on Spectral Vegetation Indices From Landsat tm Data: is Topographic Correction Necessary? *Boletim de Ciências Geodésicas*, 22(1), 95–107.
- Ordóñez, J. A., & Masera, O. (2001). Captura de Carbono Ante el Cambio Climático. *Madera Y Bosques*, 7(1), 3–12.
- Pearson, T. R. H., Brown, S., Murray, L., & Sidman, G. (2017). Greenhouse gas emissions from tropical forest degradation: an underestimated source. *Carbon Balance and Management*. <https://doi.org/10.1186/s13021-017-0072-2>
- Phillips, J. ., Duque, A. ., Yepes, A. ., Cabrera, K. ., García, M. ., Navarrete, D. ., ... Cárdenas, D. (2011). *Estimación de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia. Estratificación, alometría y métodos analíticos*. Bogotá D.C., Colombia.
- Phillips, J. F., Duque, A. J., Cabrera, K. R., Yepes, A. P., Navarrete, D. A., Cabrera, E., ... Vargas, D. M. (2011). *Estimación de las reservas potenciales de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia*. Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM.
- Phua, M.-H., & Saito, H. (2003). Estimation of biomass of a mountainous tropical forest using Landsat TM data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(4), 429–440. <https://doi.org/10.5589/m03-005>
- PNN Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2006). Plan de Manejo Santuario de Fauna y Flora Iguaque. Tomado de: humboldt.org.co/es/...de.../279-plan-de-manejo-santuario-de-fauna-y-flora-iguaque
- Powell, S. L., Cohen, W. B., Healey, S. P., Kennedy, R. E., Moisen, G. G., Pierce, K. B., & Ohmann, J. L. (2010). Remote Sensing of Environment Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with Landsat time-series and field inventory data: A comparison of empirical modeling approaches. *Remote Sensing of Environment*, 114, 1053–1068. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.12.018>
- Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., & Aguado, I. (2003). Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society*, 41(5), 1056–1061.
- Rodríguez-Moreno, V. M., & Bullock, S. H. (2013). Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor y humedad y aplicación para estimar LAI en el desierto Sonorense. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(4), 611–623.

- Rodríguez-Veiga, P., Wheeler, J., Louis, V., Tansey, K., & Balzter, H. (2017). Quantifying Forest Biomass Carbon Stocks From Space. *Current Forestry Reports*, 3(1), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0052-5>
- Rojo-Martínez, G. ., Jasso-Mata, J., & Velásquez-Martínez, A. (2003). Las masas forestales como sumideros de Co2 ante un cambio climático global. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 9(1), 57–67.
- Roldán, P., & Poveda, G. (2006). Variabilidad Espacio-Temporal de los Índices NDVI y EVI. Aplicación a Cinco Regiones Colombianas. *Metereología Colombiana*, (10), 47–59.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Shell, J. A., & Deering, D. . (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA. Goddard Space Flight Center*, 9.
- Roy, P. S., & Ravan, S. A. (1996). Biomass estimation using satellite remote sensing data — An investigation on possible approaches for natural forest. *Journal of Biosciences*, 21(4), 535–561.
- Saatchi, S. ., Houghton, R. A., Alvalá Dos santos, R. C., Soares, J. V., & Yu, Y. (2007). Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Global Change Biology*, 13, 816–837. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01323.x>
- Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T. A., Salas, W., ... Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(24), 9899–9904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>
- Segura, M., & Andrade, H. J. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen , biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería En Las Américas*, 46, 89–96.
- Segura, M., & Kanninen, M. (2005). *Allometric Models for Tree Volume and Total Aboveground Biomass in a Tropical Humid Forest in Costa Rica*. *Biotropica* (Vol. 37). <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.02027.x>
- Seo, H. S., Phua, M. H., Ong, R., Choi, B., & Lee, J. S. (2014). Determining Aboveground Biomass of a Forest Reserve in Malaysian Borneo Using K-Nearest Neighbour Method. *Journal of Tropical Forest Science*, 26(1), 58–68.
- Sharma, V., & Chaudhry, S. (2015). An Evaluation of Existing Methods for Assessment of Above-Ground Biomass in Forests. *International Journal of Engineering Research and Science & Technology*, 4(2), 1–20.

- Shi, L., & Liu, S. (2017). Methods of Estimating Forest Biomass: A Review. In J. S. Tumuluru (Ed.), *Biomass Volume Estimation and Valorization for Energy* (pp. 23–46). InTech. <https://doi.org/10.5772/65733>
- Silleos, N. G., Alexandridis, T. K., Gitas, I. Z., & Perakis, K. (2006). Vegetation indices : Advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years. *Geocarto International*, 21(4), 21–28.
- Sinha, S., Sharma, L. K., & Nathawat, M. S. (2015). Improved Land-use/Land-cover classification of semi-arid deciduous forest landscape using thermal remote sensing. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(2), 217–233. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.09.005>
- Soenen, S. A., Peddle, D. R., & Coburn, C. A. (2005). SCS + C : A Modified Sun-Canopy-Sensor Topographic Correction in Forested Terrain. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society*, 43(9), 2148–2159.
- Steininger, M. K. (2000). Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass : data from Brazil and Bolivia. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6–7), 1139–1157.
- Suepa, T., Qi, J., Lawawirojwong, S., & Messina, J. P. (2016). Understanding spatio-temporal variation of vegetation phenology and rainfall seasonality in the monsoon Southeast Asia. *Environmental Research*, 147, 621–629. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.02.005>
- Tan, K. T., Lee, K. T., Mohamed, A. R., & Bhatia, S. (2009). Palm oil: Addressing issues and towards sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 420–427. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.001>
- Teillet, P. ., Guindon, B., & Goodenough, D. . (1982). On the Slope-Aspect Correction of Multispectral Scanner Data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8(2), 84–106. <https://doi.org/10.1080/07038992.1982.10855028>
- Teweke, A., Kappas, J., Lauer, S., & Erasmi, S. (2006). The Effect of Stratified Topographic Correction on Land Cover Classification in Tropical Mountainous Regions. *ISPRS Commission VII Symposium. Remote Sensing*, 432–437.
- Timothy, D., Onesimo, M., Cletah, S., & Adelabu, S. (2016). Remote sensing of aboveground forest biomass : A review. *Tropical Ecology*, 57(2), 125–132.

- USGS. (2016). LANDSAT 8 (L8) DATA USERS HANDBOOK - Version 2.0. Tomado de:
<https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>
- Vásquez, A., & Arellano, H. (2012). Estructura, Biomasa Aérea y Carbono Almacenado en Los Bosques del Sur y Noroccidente de Córdoba. In *Colombia Diversidad Biótica Xii. La Región Caribe De Colombia* (Código Ltd, pp. 923–962). Bogotá D.C.: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Viña, A., Gitelson, A. A., Nguy-robotson, A. L., & Peng, Y. (2011). Remote Sensing of Environment Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3468–3478. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.010>
- Wang, J., Rich, P. M., & Price, K. P. (2003). Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 24(11), 2345–2364. <https://doi.org/10.1080/01431160210154812>
- Wu, C., Shen, H., Wang, K., Shen, A., Deng, J., & Gan, M. (2016). Landsat Imagery-Based Above Ground Biomass Estimation and Change Investigation Related to Human Activities. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su8020159>
- Yepes-quintero, A., Duque-montoya, Á., Navarrete-encinales, D., Phillips-bernal, J., Cabrera-montenegro, E., Corrales-osorio, A., ... Vargas-galvis, D. (2011). Estimación de las Reservas y Pérdidas de Carbono por Deforestación en los Bosques del Departamento de Antioquia, Colombia. *Actualidades Biológicas*, 33(95), 193–208.
- Yepes, A. P., Navarrete, D. A., Duque, J. A., Phillips, J. ., Cabrera, K. R., Álvarez, E., ... Ordoñez, M. F. (2011). *Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa - carbono en Colombia*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM.
- Zheng, D., Rademacher, J., Chen, J., Crow, T., Bresee, M., Le, J., & Ryu, S. (2004). Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM + data across a managed landscape in northern Wisconsin , USA. *Remote Sensing of Environment*, 93, 402–411. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.008>
- Zhu, X., & Liu, D. (2015). Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 102, 222–231. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.014>

8. ANEXOS.

Anexos 1. Coordenadas geográficas centrales de las parcelas temporales de muestreo PTM

N° Parcela	Coordenadas		Altura
	Latitud N	Longitud W	
1	5,70731	73,45632	2.863
2	5,70788	73,45608	2.916
3	5,70851	73,45718	2.856
4	5,70700	73,45686	2.843
5	5,69990	73,45579	2.999
6	5,70017	73,45667	3.075
7	5,70109	73,4573	3.016
8	5,70225	73,45714	2.957
9	5,70178	73,45247	2.993
10	5,70081	73,45073	3.072
11	5,70127	73,44905	3110
12	5,70248	73,44692	3.078
13	5,69753	73,45461	3.077
14	5,69897	73,45407	3.023
15	5,70063	73,45408	3.221
16	5,70219	73,45563	2.926
17	5,70434	73,45663	2.905
18	5,636343	-73,502711	2366
19	5,63574	-73,50203	2557
20	5,63517	-73,50185	2544
21	5,63537	-73,50143	2520
22	5,63509	-73,50083	2583
23	5,615992	-73,505199	2939