UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales

ESTIMACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA NETA EN COBERTURAS DE BOSQUE SECO TROPICAL A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8 OLI TIRS

NELLY JOHANA MALDONADO ALBA

GLADYS MARCELA ZAMORA MORANTES

Trabajo de grado para optar al título de

Ingeniero Forestal

Director:

Orlando Riaño Melo

BOGOTÁ, D.C.

MARZO DE 2017

ESTIMACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA NETA EN COBERTURAS DE BOSQUE SECO TROPICAL A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8 OLI TIRS

CONTENIDO

RESUMEN VIII

1. INTRODUCCIÓN 1

2. JUSTIFICACIÓN 4

3. OBJETIVOS 6

3.1. Objetivo General 6

3.2. Objetivos Específicos 6

4. HIPÓTESIS 6

5. MARCO TEORICO 7

5.1. Productos Landsat y Procesamiento Digital de Imágenes 7

5.2. Características Espectrales del Dosel 14

5.3. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) 17

5.4. Productividad Primaria Neta (PPN) 20

5.4.1. Métodos directos 21

5.4.2. Métodos indirectos 22

5.5. Bosque seco tropical en Colombia....24

6. METODOLOGÍA....27

6.1. Área de estudio....27

6.2. Materiales y métodos....30

7. RESULTADOS....45

7.1. Clasificación de cobertura....45

7.2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada....46

7.3. NDVI por vereda....52

Vereda Agua Blanca....52

Vereda Pozo Azul....53

7.4. Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida....54

7.5. Eficiencia en el Uso de la Radiación y Productividad Primaria Neta foliar....58

8. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS....66

8.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada....66

8.2. Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida....70

8.3. Eficiencia en el Uso de la Radiación y Productividad Primaria Neta (PPN)....72

9. CONCLUSIONES....74

10. BIBLIOGRAFÍA....77

11.ANEXOS……..……..95

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. Climograma Estación Aeropuerto Internacional Ernesto Cortissoz. Girardot 28

Figura 2. Área de estudio 29

Figura 3. Metodología.....31

Figura 4. Fragmentos de bosque seco tropical en el área de estudio 417

Figura 5. Área de muestreo……...…. 28

Figura 6. NDVI por tipo de cobertura.....513

Figura 7. NDVI por tipo de cobertura, en la vereda Agua Blanca 535

Figura 8. NDVI por tipo de cobertura en la vereda Pozo Azul 535

Figura 9. APAR (Wh/m2) por relicto de Bosque fragmentado 588

Figura 10. Eficiencia en el uso de la radiación (g/MJ) por especie 609

Figura 11. Producción Primaria Neta Foliar por fragmento de bosque 41

Figura 12. Producción Primaria Neta Total por fragmento de bosque 41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Bandas contenidas en el Satélite Landsat 8 OLI TIRS 8

Tabla 2. Leyenda Corine Land Cover adaptada para Colombia. Categoría Bosques y Áreas Seminaturales 12

Tabla 3. Interpretación de NDVI 18

Tabla 4. Generalidades de las imágenes 33

Tabla 5 . Clases espectrales en el área de estudio 364

Tabla 6 . Interpretación del índice Kappa 385

Tabla 7. Área por fragmento boscoso 406

Tabla 8. Especies representativas e individuos muestreados 438

Tabla 9. Matriz de confusión para coberturas clasificadas 30

Tabla 10. Representatividad del NDVI (en área) para cada Cobertura 31

Tabla 11. NDVI: Test U de Mann-Whitney 514

Tabla 12. APAR: Test U de Mann-Whitney 566

Tabla 13. EUR: Análisis de Varianza 599

Tabla 14. PPN: Test U de Mann-Whitney 642

ÍNDICE DE UNIDADES, SIGLAS Y ABREVIATURAS

ADP: Adenosín Difosfato

APAR: Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (Absorbed Photosynthetic Active Radiation)

ATP: Adenosín Trifosfato

bs-T: Bosque Seco Tropical

EUR: Eficiencia en el Uso de la Radiación (Radiation Use Efficiency)

$EUR_{(Foliar)}$: Eficiencia en el Uso de la Radiación Foliar

$EUR_{(global)}$: Eficiencia en el Uso de la Radiación Global

***f*PAR:** Fracción de Energía que es Interceptada por la Vegetación

g/m^2/mes: Unidad de productividad (gramo/metro cuadrado/mes)

g/MJ: Unidad de eficiencia en el uso de la radiación (gramo/mega Jules)

GeoTIFF: Geographical Tagged Image File Format

ha: Unidad de área (Hectárea)

MJ/m^2: Unidad de irradiancia fotosintética (mega Jules/metro cuadrado)

$NADP^+$: Nicotinamida Adenina Dinucleotido Fosfato

NADPH: Nicotinamida Adenina Dinucleotido Fosfato Reducida

ND: Nivel Digital

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

NIR: Infrarrojo cercano (Near Infrared)

nm: Medida de longitud (nanómetro)

OLI: Operational Land Imager

PAR: Radicación Fotosintéticamente Activa Incidente (Photosynthetic Active Radiation)

PPB: Productividad Primaria Bruta

PPN: Productividad Primaria Neta

$PPN_{(Foliar)}$: Productividad Primaria Neta Foliar

$PPN_{(Global)}$: Productividad Primaria Neta Global

PPNA: Productividad Primaria Neta Aérea

R: Banda roja del espectro visible (Red)

TIRS: Thermal Infrared Sensor

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios ser maravilloso quien nos dio fuerza y fe en todo el proceso y culminación exitosa del proyecto de investigación. A nuestras familias por el acompañamiento en cada fase y su continuo apoyo, a quienes dedicamos el documento logro.

Nos gustaría agradecer sinceramente a nuestro asesor de tesis, el docente Orlando Riaño Melo y nuestros jurados German Hurtado Peña y Favio López Botia, por compartir sus conocimientos a disposición del logro que se buscaba, por sus consejos, esfuerzos y dedicación.

Por ultimo agradecemos a la Dirección Regional Alto Magdalena de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca y en especial el asesoramiento por parte del ingeniero forestal Enger Camilo Sánchez.

RESUMEN

La aplicabilidad de la teledetección en el seguimiento de coberturas vegetales, es producto de la particular relación entre la radiación solar y el dosel, que se resume en un claro contraste entre la banda roja del espectro visible (645 nm) y, el infrarrojo cercano (700-1300 nm), debido a que los pigmentos foliares tienden a ofrecer baja reflectividad en la banda roja y alta en el infrarrojo cercano (Chuvieco, 1995).

Dicha respuesta espectral, posibilitó la formulación de modelos en los que la Productividad Primaria Neta (PPN) está dada en función de la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (APAR) y, la Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR), variables cuantificables a partir de información satelital. Este estudio se propone estimar la PPN foliar y PPN global en siete relictos de Bosque Seco Tropical de las veredas Pozo Azul y Agua Blanca (Girardot-Cundinamarca), a partir de imágenes satelitales Landsat 8 OLI TIRS obtenidas entre Julio de 2013 y Noviembre de 2016.

Para ello, se procedió a generar un mapa de coberturas a escala 1:25.000, con cinco subunidades (de acuerdo a la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia): pasto limpio, pasto enmalezado, bosque fragmentado con pastos y cultivos, herbazal denso de tierra firme arbolado, y, tejido urbano discontinuo. Encontrándose que el Índice de Vegetación de diferencia Normalizada difiere significativamente para cada cobertura y, como es de esperarse los valores ≥0,6 corresponden al bosque fragmentado.

En los siete fragmentos de bosque identificados se calculó la PAR, que oscila entre 9,51 y 19.77 MJ/m^2, mientras la fPAR fluctúa entre 0.42 y 0.97. La APAR es significativamente diferente en

cada fragmento, sin embargo, es posible identificar tres grupos: el fragmento 1 (16.77 MJ/m^2), fragmentos 2 a 6 (en promedio 15.32 MJ/m^2) y fragmento 7 (14.02 MJ/m^2).

La estimación de la PPN se hizo a partir en dos variables: $EUR_{(Foliar)}$ y $EUR_{(Global)}$. En el caso de $EUR_{(Foliar)}$, fue necesario hacer seguimiento a seis especies representativas en el área de estudio para determinar la EUR por individuo y especie, finalmente, se estableció 0.28 g/MJ como valor característico para los siete fragmentos en el primer periodo (Mayo-Abril) y de 0.27 g/MJ en el segundo periodo (Enero-Febrero). De acuerdo a las observaciones de Monteith (1972), se acepta 1.5 g/MJ como $EUR_{(Global)}$ para éste estudio según el tipo de cobertura.

Entonces, se obtuvieron valores de $PPN_{(Foliar)}$ y $PPN_{(Global)}$ para cada una de las siete áreas de bosque fragmentado; en el primer caso el valor promedio es de 4.36 g/m^2/mes, siendo el fragmento 1 el más productivo (4,75 g/m^2/mes) como resultado de la insipiente intervención antrópica, caso contrario se registra en el fragmento 7 donde la productividad no supera los 3.97 g/m^2/mes. En cuanto a la $PPN_{(Global)}$, se tiene un promedio de 22.73 g/m^2/mes, valor que se ajusta a las estimaciones consignadas en la literatura, sin embargo, una revisión particular señala deficiencias en el fragmento 7 probablemente atribuidas a la irregularidad de la forma del fragmento y baja superficie, variables principalmente condicionadas por la topografía y el alto grado de intervención antrópica.

1. INTRODUCCIÓN

El procesamiento digital de imágenes satelitales es una herramienta eficaz en la identificación y seguimiento de fenómenos como el avance de la desertización, productividad agrícola, deforestación, distribución de plagas y enfermedades, identificación de necesidades de riego, previsión del riesgo de incendios forestales, el ordenamiento territorial, entre otras (Tucker, *at al.*, 1981; Enoki, *et al.*, 1999; Chuvieco, *et al.*, 2004; Salvo, 2015).

La caracterización del territorio a partir de imágenes satelitales, ocurre gracias a que el comportamiento reflectivo de la energía electromagnética varía de acuerdo a las características de la cobertura. En el caso de la cobertura vegetal sana, la estructura del cloroplasto (unidad fundamental en la fotosíntesis) permite la absorción de fotones provenientes del espectro de luz visible, principalmente en la longitud de onda roja; mientras que la cutícula y mesólifo tienden a difundir y dispersar la mayor parte de la radiación en la longitud de onda del infrarrojo cercano (Curtis & Barnes, 2000).

Esta firma espectral ha fundamentado la construcción de índices de vegetación: medidas cuantitativas cuyo principio fundamental es la combinación lineal de las bandas rojo (R) e infrarrojo cercano (NIR) en imágenes multiespectrales, para diferenciar coberturas y sistematizar el estado vital de la vegetación (Chuvieco, 1995).

Entre los índices más usados se encuentra el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), descrito como la relación entre la reflectancia del espectro electromagnético rojo (630 – 690 nm) e infrarrojo cercano (760 – 900 nm), para una

determinada superficie foliar (Poveda & Salazar, 2004; Gonzaga, 2014).

Éste posee un gran valor en términos ecológicos, pues está estrechamente relacionado con parámetros vitales de la vegetación tales como biomasa total, índices de verdor de la hoja, área foliar, radiación fotosintéticamente activa por tejidos verdes y Productividad Primaria Neta (PPN) (Monteith, 1981; Sellers, 1985).

De acuerdo con Monteith (1972), la PPN esta implicitamente en función del NDVI, pues existe una relación lineal entre éste ultimo y la fPAR. Con base en su modelo, la PPN de una cobertura vegetal es proporcional a la cantidad de Radiación Fotosienteticamente Activa (PAR), la fracción de esta que es interceptada por tejidos verdes (fPAR) y la eficiencia con que dicha radiación solar es transformada en materia seca a través de la fotosíntesis.

La PPN se considera una variable integradora del funcionamiento ecosistémico, ya que es capaz de generar un panorama respecto al estado funcional del ecosistema, la oferta de bienes y servicios ambientales, la biomasa animal, la producción segundaria y el ciclo de nutrientes (Salas & Infante, 2006). En este contexto, determinar la PPN es indispensable para el desarrollo de estrategias de gestión razonables, rentables y sustentables.

En Colombia el bs-T se encuentra en un deplorable estado de conservación, como resultado de la alta presión antrópica y procesos de deforestación extremadamente acelerados, impulsados por la ampliación de la frontera agrícola y ganadera (Pizano & García, 2014). Si bien es preocupante el conocimiento restringido de este ecosistema, un problema adicional es la escasa percepción del valor que para las comunidades locales tienen este tipo de formaciones vegetales (Espinosa, *et al.*, 2012).

Una de las estrategias para vincular la comunidad local en la generación de conocimiento y estrategias de conservación, es cuantificar la importancia del bosque en el desarrollo económico, social y/o espiritual a través de bienes y servicios ecosistémicos. Por ejemplo, la PPN permite visualizar la capacidad de aprovisionamiento que ofrece una cobertura, así como, seguir fenómenos de remoción en masa y perdida de suelo por erosión permite cuantificar la capacidad de regulación del bosque, por mencionar algunos.

El bs-T en Colombia manifiesta un sinnúmero de particularidades biológicas, entre las que se registran gran variedad de adaptaciones fenológicas, reproductivas y fisiológicas, además, se estima una importante diversidad: 2569 plantas vasculares de las cuales 83 son endémicas, 145 especies de aves, 60 especies de mamíferos, 58 especies de anfibios, y, 68 especies de escarabajos coprófagos, sin embargo, la mayor parte de estos datos son aproximaciones, y es importante reconocer que no contamos con datos biológicos, ecológicos y sociales que faciliten la gestión integral de este importante ecosistema (Pizano & García, 2014).

Este estudio se propone estimar la PPN foliar y PPN global en siete relictos de Bosque Seco Tropical de las veredas Pozo Azul y Agua Blanca (Girardot-Cundinamarca), a partir de imágenes satelitales Landsat 8 OLI TIRS obtenidas entre Julio de 2013 y Noviembre de 2016, con el objetivo de contribuir al conocimiento del bs-T y particularmente al estado productivo en el área de estudio.

2. JUSTIFICACIÓN

El bosque seco tropical ha recibido menos atención científica con respecto a otro tipo de coberturas vegetales (Prance, 2006; IAVH, 2012) y, actualmente se ha constituido en uno de los ecosistemas más amenazados del país dado a su estado crítico de fragmentación.

Se estima la pérdida de más del 90% del ecosistema por el cambio en el uso del suelo (Pizano & García, 2014), orientado a actividades económicas como la ganadería y la agricultura (Álvarez *et al.* 1998). Esta tendencia se ha convertido en una amenaza para la sustentabilidad en la región andina, pues, se proyecta que durante los próximos treinta años aumente en por lo menos 1 °C en la temperatura y se pierda la mayor parte de la capa arable del suelo (Alarcón & Pabón, 2013).

En Girardot (Cundinamarca) el área forestal protectora de bosque seco abarca 3064,54 ha, es decir, el 38.28% del área municipal (POT, 2000). Aunque solo el 3,3% de la población vive en el sector rural, el 13% desarrolla alguna actividad agrícola (principalmente monocultivos transitorios), el 96.8% actividades pecuarias, el 1.1% actividades piscícolas y, la mayoría de las viviendas tienen dos o tres de estas actividades (DANE, 2016).

A pesar de que la actividad económica primordial es el turismo y el comercio, se reconoce el incremento de la vivienda y población en tierras aptas para el cultivo, la deforestación y una baja calidad ambiental como escenarios que entorpecen el desarrollo municipal; en esto, se promueven proyectos de producción intensiva, conservación de forrajes, uso eficiente de los recursos y, gestión sostenible del agua (Consejo Municipal de Girardot, 2016)

De acuerdo a las políticas de desarrollo en mención, es fundamental cuantificar la incidencia de las actividades antrópicas en el funcionamiento y, oferta de bienes y servicios ambientales del bs-T. Aquí, resulta estratégico el procesamiento digital de imágenes satelitales que permitan conocer el estado actual de los recursos en mención.

En Colombia el uso de imágenes satelitales del sistema Landsat ha crecido en los últimos años con miras al estudio de los recursos naturales, entre las que se encuentran el desarrollo de alertas tempranas y el monitoreo de perdida de la cobertura forestal por el IDEAM. No obstante, el estudio del bs-T apoyado en imágenes satelitales es escaso a nulo.

En este contexto, se propone estimar la PPN foliar y PPN global en siete relictos de Bosque Seco Tropical de las veredas Pozo Azul y Agua Blanca (Girardot-Cundinamarca), a partir de imágenes satelitales Landsat 8 OLI TIRS obtenidas entre Julio de 2013 y Noviembre de 2016, con el objetivo de contribuir al conocimiento del bs-T y particularmente al estado productivo en el área de estudio.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Estimar la Productividad Primaria Neta foliar en coberturas de Bosque Seco Tropical de las veredas Agua Blanca y Pozo Azul (Girardot- Cundinamarca) a través de imágenes satelitales Landsat 8 OLI TIRS.

3.2. Objetivos Específicos

- Establecer el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en coberturas de las veredas Pozo Azul y Agua Blanca.
- Determinar la Eficiencia en el Uso de la Radiación, enfocada en la producción de hojas nuevas.
- Caracterizar la Radiación Fotosintéticamente Activa y, la Productividad Primaria Neta aérea y foliar en el área de estudio.

4. HIPÓTESIS

En las veredas Agua Blanca y Pozo Azul (Girardot, Cundinamarca) se identificaron siete fragmentos de Bosque Seco Tropical, con base en imágenes Landsat del sensor 8 OLI TIRS y escenas de Google Earth versión 7.1.7.2606 se observan variaciones en las condiciones de cada fragmento, atribuidas principalmente al área, forma, topografía y distancia del perímetro urbano. Bajo estas condiciones se presume que el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por la vegetación y la Productividad Primaria Neta son significantemente diferentes en cada fragmento.

5. MARCO TEORICO

5.1. Productos Landsat y Procesamiento Digital de Imágenes

La suposición básica en percepción remota es que cada tipo de superficie interactúa de manera característica con la radiación incidente. Dicha conducta genera una curva que representa el comportamiento del objetivo a lo largo del espectro electromagnético conocida como firma espectral, respuesta espectral o reflectancia, y, se condensa en imágenes multiespectrales (Soria & Granados, 2005).

El programa Landsat ha revolucionado la captura de información terrestre, entre otros, registra multitemporal y continuamente la superficie del planeta, ha impulsado el desarrollo de metodologías para el seguimiento y evaluación de una gran variedad de fenómenos, es una herramienta fundamental en el mapeo de recursos naturales y gestión de los mismos, además, la mayor parte de las imágenes están disponibles al público.

Dicho programa es el resultado de la alianza estratégica entre la NASA y el Servicio Geológico de Estados unidos desde el año 1972, cuando se puso en órbita el satélite *Earth Resources Technological Satellite* (ERTS) hoy reconocido como Landsat 1 y recordado como el primer programa espacial para el estudio de los recursos naturales (Soria & Granados, 2005).

Durante el año 2013 se puso en órbita la octava versión del programa, denominada "Landsat Data Continuity Mission- LDCM", un satélite compuesto de dos secciones, la primera conocida como el observatorio contiene los dos sensores de observación terrestre: Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS). La segunda, es el

sistema terrestre que permite la programación de operaciones, así como la administración y distribución de datos (United States Geological Survey, 2015).

Respecto a la misión Landsat 7 ETM+, el sensor OLI adiciona dos bandas: la banda 1, un canal profundo en el azul visible destinado específicamente a la observación de recursos hídricos e investigación de zonas costeras, y, la banda 9, un canal de infrarrojo para la detección de nubes cirrus, adicionalmente, existe una nueva banda de control de calidad capaz de brindar información de nubosidad, agua y relieve (Ariza, 2013).

A su vez, el sensor TIRS se compone de dos bandas térmicas (incluidas en los sensores TM y ETM+), útiles en la captura de temperaturas más precisas en la superficie (Ariza, 2013). Se relacionan a continuación la distribución de las bandas en el satélite Landsat 8.

Tabla 1. Bandas contenidas en el Satélite Landsat 8 OLI TIRS

Sensor	Bandas	Longitud de Onda (nm)	Resolución (m)
OLI	Banda 1: Aerosol Costero	430 – 450	30
	Banda 2: Azul	450 – 510	30
	Banda 3: Verde	530 – 590	30
	Banda 4: Rojo	640 – 670	30
	Banda 5: Infrarrojo Cercano	850 – 880	30
	Banda 6: SWIR 1	1570 – 1650	30
	Banda 7: SWIR 2	2110 – 2290	30
	Banda 8: Pancromático	500 – 680	15
	Banda 9: Cirrus	1360 – 1380	30
TIRS	Banda 10: Infrarrojo Térmico 1	10600 – 11190	100
	Banda 11: Infrarrojo Térmico 2	11500 – 12510	100

Tomado de Ariza (2013)

La mayor cantidad de productos disponibles a través del Servicio Geológico de Estados Unidos son de categoría cero (L0), que corresponden a imágenes en el formato GeoTIFF (Geographical Tagged Image File Format), con todas las trasmisiones de datos y objetos sin formato (United States Geological Survey, 2015).

Debido a esta característica, es imperativo realizar la georreferenciación acompañada de la corrección radiométrica, pues, la radiación electromagnética se afecta por elementos atmosféricos como aerosoles y vapor de agua, que dispersan selectivamente la radiación transmitida entre el sensor y la superficie terrestre, esta distorsión sobrestima la radiancia y reflectancia detectadas (Chuvieco, 1995).

De acuerdo con Ariza (2013) los valores de reflectancia y/o radiancia en las bandas del sensor OLI y TIRS pueden ser re-escalados en el techo de la atmósfera, usando los coeficientes radiométricos proporcionados en el metadato de la imagen en la siguiente ecuación:

$$L_\gamma = M_L * Q_{CAL} + A_L$$

En la que L_γ es el valor de radiancia espectral en el techo de la atmósfera ((watts/m2)*srad*μm) o el valor de reflectancia planetaria sin corrección por ángulo solar; M_L es el factor multiplicativo obtenido del metadato; A_L es el factor adictivo extraído del metadato y Q_{cal} es el producto estándar cuantificado y calibrado por valores de pixel referido a cada una de las bandas de la imagen.

Tras la corrección radiométrica, es necesario hacer un ajuste de contraste a fin de visualizar simultáneamente imágenes de distintas regiones del espectro y destacar los rasgos de

interés, gracias a la información multiespectral generada por la mayoría de sensores espaciales puede obtenerse distintas composiciones de color (Chuvieco, 2008).

La elección de las bandas y el orden destinado a cada una, dependen del sensor y el objetivo de la investigación, sin embargo, la composición más frecuente es el "falso color", debido a que facilita la identificación de coberturas. En esta composición confluyen las bandas correspondientes al infrarrojo cercano, rojo y verde (Chuvieco, 1995). Como se vio anteriormente, las imágenes obtenidas del sensor Landsat 8 OLI incluye bandas adicionales respecto a sus antecesores y modificaciones en el ancho de las bandas, entonces, mientras en Landsat 5 y 7 el falso color resulta de la combinación 5-4-3, para el sensor Landsat 8 el falso color equivale a la combinación 6-5-4 (United States Geological Survey, 2016).

Finalmente se da paso a la clasificación digital, con el objetivo de obtener una nueva imagen en la que cada uno de los pixeles originales este definido por un Nivel Digital (ND) que lo identifica en una clase nominal o categórica, capaz de describir, por ejemplo, el tipo de cobertura (Chuvieco, 2008; Lira, 2010).

De acuerdo a Chuvieco (1995) la clasificación digital de imágenes consta de tres etapas, a saber:

1. Fase de entrenamiento: aborda la definición digital de las categorías temáticas definidas por el intérprete. Tradicionalmente se conocen dos métodos de clasificación: supervisado y no supervisado.

   En el primero, la clasificación requiere de cierto conocimiento previo del terreno y de los tipos de coberturas, a través de una combinación de trabajo de campo, análisis de

fotografías aéreas, mapas, informes técnicos y referencias profesionales y locales; esta información permite delimitar áreas piloto, cuyas características espectrales son utilizadas por un algoritmo de clasificación. El algoritmo calcula los parámetros estadísticos de cada banda para todas las áreas piloto, finalmente, evalúa los ND de la imagen, los compara y asigna a una clase. (Arozarena, 2016).

Por el contrario, el método de clasificación no supervisado se basa en la definición de número de clases espectrales, selección de los criterios de similitud y algoritmos de agrupación de los ND. Pero, al obtener la imagen final se tiene incertidumbre acerca de las clases de cobertura suministradas por el algoritmo, y será necesario estudiarlas después para saber que representa cada una de ellas (Arozarena, 2016).

Tras la aplicación del método de clasificación, es conveniente evaluar estadísticamente la discriminabilidad de las categorías encontradas y su representatividad. Si los resultados no son estadísticamente satisfactorios, es preciso realizar ajustes en el número de categorías y criterios de similitud/selección de áreas piloto, según el caso.

Frente a la definición de las categorías temáticas, la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia permite describir, caracterizar, clasificar y comparar diversos tipos de cobertura, interpretadas a partir de imágenes satelitales de resolución media (por ejemplo, Landsat), para la construcción de mapas de cobertura a diferentes escalas (IDEAM, 2016). Esta, ha sido estructurada de forma jerárquica, tomando en cuenta criterios fisionómicos de altura y densidad para garantizar la inclusión de nuevas unidades o la definición de nuevos niveles en el caso de estudios muy detallados (IDEAM, 2010). Se relaciona a continuación una síntesis de la leyenda para bosques y áreas seminaturales a escala 1:100.000.

Tabla 2. Leyenda Corine Land Cover adaptada para Colombia. Categoría Bosques y Áreas Seminaturales

Unidad	Subunidad	Nivel
Bosques	Bosque Denso (BD)	- BD alto de tierra firme - BD alto inundable - BD bajo de tierra firme - BD bajo inundable
	Bosque Abierto (BA)	- BA alto de tierra firme - BA alto inundable - BA bajo de tierra firme - BA bajo inundable
	Bosque Fragmentado	
	Bosque de Galería y Ripario	
	Plantación Forestal	
Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	Herbazal Denso (HD)	-HD de tierra firme no arbolado -HD de tierra firme arbolado -HD de tierra firme con arbustos -HD inundable no arbolado -HD inundable arbolado -Arracachal -Helechal
	Herbazal Abierto (HA)	-HA arenoso -HA rocoso
	Arbustal Denso	
	Arbustal Abierto	
	Vegetación secundaria o en transición	
Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	Zonas arenosas naturales	
	Afloramientos rocosos	
	Tierras desnudas y degradadas	
	Zonas quemadas	
	Zonas glaciares y nivales	

Adaptado de: IDEAM (2010)

2. Fase de asignación: asocia los pixeles de cada una de las bandas de interés (en función de los ND) a una categoría. Entre los algoritmos de clasificación más importantes se registran: el clasificador de mínima distancia, donde el pixel se asigna a la categoría

más cercana; el clasificador de paralelepípedos permite al usuario señalar umbrales de dispersión para cada categoría, y, finalmente el clasificador de máxima probabilidad o verosimilitud asigna el pixel a la categoría con la que posee mayor probabilidad de pertenencia, asumiendo que los ND en cada clase se ajustan a una distribución normal (Chuvieco, 1995).

3. Fase de comprobación y verificación de resultados: al finalizar el procesamiento se obtiene una nueva imagen con estructura y tamaño similar a las originales, sin embargo, el ND que acompaña cada pixel hace referencia a la categoría asignada. El procesamiento lleva asociado un margen de error que debe ser cuantificado, para valorar no solo la calidad del trabajo sino su aplicabilidad, por lo tanto resulta conveniente realizar una evaluación de fiabilidad temática (Chuvieco, 1995).

   Entre las técnicas de evaluación se encuentran: la comparación de la clasificación obtenida con los resultados de otras fuentes convencionales altamente confiables; la selección de áreas para verificación en campo; y, la cuantificación de acierto con la que se asignaron los pixeles a sus respectivas categorías (François, *et al.*, 2003).

   En función de la eficiencia y costos, es común evaluar la certeza de asignación de áreas, este método consta de: muestreo, evaluación de los pixeles muestreados a partir de una matriz de confusión para identificar conflictos entre categorías, y, análisis estadístico de la matriz de confusión que cuantifique la fiabilidad total del resultado gráfico (François, *et al.*, 2003).

5.2. Características Espectrales del Dosel

La interacción de la radiación electromagnética con la cobertura vegetal es compleja; la transmisión, absorbancia y reflexión de la luz diverge drásticamente de una cobertura a otra debido a características individuales como la arquitectura foliar, estado fenológico, tipo de metabolismo fotosintético, índice de área foliar, estructura de las células foliares, los contenidos de clorofila, carotenoides y agua foliar, e incluso, la presencia de plagas y enfermedades. También intervienen características exógenas tales como las propiedades del suelo que sustenta la vegetación y la geometría de la cobertura vegetal (Rojas, 2009; Tucker *et al.,* 1981; Cayón, 2001).

La radiación electromagnética emitida por el sol con incidencia sobre nuestro planeta, expresa longitudes de onda entre 200 - 4000 nm y se constituye por radiación ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja; esta onda es descompuesta por la atmósfera terrestre, la mayor parte de la radiación ultravioleta e infrarroja es absorbida por la capa de ozono y otros gases de la estratosfera (Carrasco-Ríos, 2009), permitiendo que la superficie terrestre reciba cerca de 53% de radiación infrarroja (700-1000 nm), 45% de luz visible (400-700 nm) y 2% de radiación ultravioleta (200-400 nm) (Hernández, *et al.*, 2012).

La relación que se establece entre dicha radiación incidente en la troposfera y la cobertura vegetal desencadena una serie de procesos fotobiológicos imprescindibles para el desarrollo de la vida en el planeta, tales como, el fototropismo, el fotoperiodismo, la fotomorfogénesis y la fotosíntesis (Carrasco-Ríos, 2009; Rojas, 2009). En este último, los organismos fotosintéticos capturan energía lumínica (radiación visible del espectro electromagnético) que usan para formar carbohidratos y oxigeno libre a partir de dióxido de

carbono y agua, en una compleja serie de reacciones que inicia con la energización de los pigmentos foliares gracias a los fotones que constituyen un haz de luz (Campbell & Reece, 2005).

Un pigmento es una sustancia que tiene la capacidad de absorber la luz, en el caso de las plantas la unidad estructural de la fotosíntesis es el cloroplasto dispuesto en el mesófilo de la lámina foliar dentro del parénquima de empalizada, a su vez, dentro del cloroplasto se encuentran una serie de membranas internas denominadas tilacoides, que contienen los pigmentos fotosintéticos (Curtis & Barnes, 2000).

La clorofila es el principal pigmento fotosintético, absorbe luz de la longitud de onda violeta, azul y rojo a la vez que refleja luz de la longitud de onda verde. La *clorofila a* esta presente en todos los organismos fotosintéticos y se relaciona directamente con la transformación de energía lumínica en energía química; sin embargo, existe un grupo de pigmentos accesorios que absorben energía que no es captada por la *clorofila a*, entre estos pigmentos de apoyo se encuentran la *clorofila b* (que absorbe la onda de luz azul y verde) y los *carotenoides* (que absorben la onda de luz azul y naranja). Durante la fotosíntesis la energía captada por pigmentos accesorio es conducida al centro de reacción donde el aceptor primario (*clorofila a*) puede transmitir la excitación del pigmento como energía útil en reacciones de biosíntesis (Curtis & Barnes, 2000).

Actualmente sabemos que el tilacoide contiene pares de fotosistemas llamados *fotosistema I* y *fotosistema II* trabajando de forma simultánea y continua en la transformación de la energía lumínica a energía química. Una vez la energía del fotón es absorbida por el pigmento, éste entra en un estado energético superior y la energía colectada por los

pigmentos es canalizada a un dímero de moléculas de *clorofila a* asociado con proteínas especiales en la membrana del tilacoide conocido como centro de reacción. En el *fotosistema II*, la energía conducida al centro de reacción permite que un electrón sea energizado y se transfiera a una molécula de electrones primaria, que lo conduce al *fotosistema I* a través de una cadena de transporte de electrones; los electrones perdidos por el *fotosistema II* se sustituyen con la oxidación de una molécula de agua que produce electrones libres y gas oxígeno (fotolisis) (Campbell & Reece, 2005).

El continuo transporte de electrones desde el *fotosistema II* al *fotosistema I* a través de la cadena de transportadores, permite el acoplamiento de un gradiente de protones, el cual proporciona la energía para formar ATP (Adenosín Trifosfato) con la fotofosforilación de ADP (Adenosín Difosfato). Los electrones de baja energía que abandonan el *fotosistema II* son transportados al *fotosistema I* donde son re-energizados y pasan a través de una cadena de transporte de electrones en la que se usan para reducir al transportador de electrones de $NADP^+$ (Nicotinamida Adenina Dinucleotido Fosfato) a NADPH (Nicotinamida Adenina Dinucleotido Fosfato Reducida) (Campbell & Reece, 2005).

Es de recordar que los fotosistemas actúan de forma continua y conjunta, esto quiere decir que existe producción constante de ATP y NADPH, estas moléculas son conducidas al estroma, una solución densa que rodea los tilacoides y llena el interior del cloroplasto. Allí, se lleva a cabo el ciclo de Calvin en el que la energía química almacenada en los enlaces del NADPH y ATP es usada para reducir el dióxido de carbono captado por los estomas a carbono gliceraldehído-3 fosfato, con esta reducción se da paso a la síntesis de glucosa, ácidos grasos y aminoácidos (Berg, *et al.*, 2007).

Como vimos anteriormente, la radiación del espectro infrarrojo también tiene incidencia en la troposfera y por lo tanto se relaciona con la cobertura vegetal. En este caso, la cutícula y epidermis reflectan una pequeña porción de radiación, mientras que la mayor parte es reflectada o transmitida por el mesófilo (Gómez, 2005).

En términos generales, en un individuo sano se espera una baja reflectividad del espectro visible, siendo menor en la longitud de onda roja y mayor en la longitud de onda verde como resultado del efecto absorbente de los pigmentos en las hojas; así como una elevada reflectividad del infrarrojo cercano, debido a que la estructura del mesófilo difunde y dispersa la mayor parte de esta radiación. Adicionalmente, es común registrar una drástica reducción en la reflectividad del infrarrojo medio por el efecto adsorbente del agua en esta sección del espectro (Chuvieco, 1995).

5.3. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El comportamiento espectral típico de la vegetación sana indica un claro contraste entre las bandas del espectro visible (especialmente en la longitud de onda del rojo (645 nm)), y, el infrarrojo cercano (700-1300 nm), pues, los pigmentos foliares tienden a ofrecer baja reflectividad en la banda roja del espectro visible y alta en el infrarrojo cercano. Es de esperar que el contraste permita diferenciar la vegetación de otros tipos de cobertura, a la vez que detecta su vigorosidad, ya que cualquier fuente de estrés tendrá incidencia en la estructura celular de la hoja y en su curva espectral (patrón de absorción de los pigmentos) (Chuvieco, 1995).

Este postulado teórico ha permitido la construcción de índices de vegetación, es decir, medidas cuantitativas cuyo principio fundamental es la combinación lineal de las bandas

rojo (R) e infrarrojo cercano (NIR) en imágenes multiespectrales, para diferenciar coberturas y sistematizar el estado vital de la vegetación. En lo referente a la vitalidad, alta divergencia entre los Niveles Digitales (ND) de las bandas de interés representan coberturas vegetales vigorosas, valores bajos indican vegetación enferma o senescente, y, contrastes poco significativos estarán asociados a cubiertas libres de vegetación (Chuvieco, 2008).

El índice de vegetación más empleado es el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), se obtiene de una trasformación ortogonal, en la que en la que las bandas espectrales de interés se conjugan para formar un nuevo conjunto de bandas no correlacionadas (Carreira & Niell, 1995). En NDVI está acotado entre ± 1, tiene un umbral critico cercano a 0,2 en coberturas vegetales y por lo tanto valores cercanos a 0 e inferiores se relacionan con áreas exentas de vegetación; la interpretación usual del NDVI se relaciona en la siguiente tabla.

Tabla 3. Interpretación de NDVI

NDVI	Caracterización General	Tipo de Vegetación
<0,01	Nubes, nieve, agua	Área carente de vegetación
0,1 – 0,2	Suelo Árido a Vegetación ligera. Poca vigorosidad	Vegetación dispersa, con cobertura total entre 40% y 60%. Valores de índice foliar cercano a 0,5
0,2 – 0,3	Vegetación Media. Baja Vigorosidad.	Vegetación relativamente agrupada, con cobertura de hasta 75% e índice foliar entre 0,5 y 1.
0,4 – ≥0,7	Vegetación densa. Alta vigorosidad	Vegetación densa y/o boscosa, cobertura de hasta 99% e índice de área foliar con valores cercanos a 2,5

Adaptado de: Carreira & Niell (1995), Gómez (2005), López (2007)

El amplio uso de este índice en la clasificación temática de imágenes resulta de su fácil interpretabilidad, además, permite reducir la incidencia del relieve en la caracterización

espectral debido a que la reflectividad en una zona sombreada es proporcional en todas las bandas, así, la combinación aritmética del índice resaltará el contraste espectral frente al contraste de iluminación (Chuvieco, 1995). Por otro lado, está estrechamente relacionado con parámetros vitales de la vegetación tales como biomasa total, índices de verdor de la hoja, área foliar, radiación fotosintéticamente activa por tejidos verdes y Productividad Primaria Neta Aérea (Tucker, *et al.*, 1981; Enoki, *et al.*, 1999; Paruelo, 2008).

$$NDVI = \frac{ND_{IRC} - ND_R}{ND_{IRC} + ND_R}$$ (Tucker, 1979)

De acuerdo a las características del sensor remoto el NDVI permite evaluar fenómenos multitemporales, efímeros y/o prevenir desastres, es decir, la información obtenida puede ser usada como indicador o como dispositivo de mapeo. Estas propiedades han permitido la aplicación del índice en estudios como el avance de la desertización, cuantificación de pérdidas forestales, distribución de plagas y enfermedades, seguimiento a coberturas vegetales, modelación de umbral de riesgo en seguros indexados, identificación de necesidades de riego e incluso previsión del riesgo de incendios forestales (Tucker, *at al.*, 1981; Enoki, *et al.*, 1999; Chuvieco, *et al.*, 2004; Salvo, 2015).

Es necesario destacar que la representatividad del NDVI (sobre todo en grandes extensiones) está limitado por la calidad de las imágenes fuente, condiciones de nubosidad o humedad pueden acarrear vacíos de información e interpretaciones erradas, por otro lado, la interpretación del indicador resulta valiosa cuando se vincula con otras medidas o cartografía (López, 2007).

5.4. Productividad Primaria Neta (PPN)

La Productividad Primaria Neta (PPN) es la cantidad de energía almacenada en el tejido vegetal, y está potencialmente disponible para el siguiente eslabón trófico. Se concibe como la diferencia entre la cantidad total de energía almacenada a través de la fotosíntesis, denominada Productividad Primaria Bruta (PPB), y, la energía consumida durante mantenimiento de funciones vitales como la respiración y procesos celulares (Blanco, 2013).

La PPN es considerada una variable integradora del funcionamiento ecosistémico, pues está estrechamente relacionada con la biomasa animal, la producción segundaria y el ciclo de nutrientes (Salas & Infante, 2006). En consecuencia, es fundamental para la evaluación de sustentabilidad en agroecosistemas (Di Leo, *et al.*, 2007), facilita la gestión de recursos naturales y seguimiento de cultivos en tiempo real (Instituto Plan Agropecuario, 2016).

Cuando la PPN se articula con estudios estructurales permite la valoración cuantitativa y directa de servicios ecosistémicos, como la captura de carbono y la productividad primaria ecosistémica, (Paruelo, 2008), por otra parte, los cambios de las condiciones ambientales, por ejemplo, la radiación solar, temperatura y concentración de CO_2 suelen percibirse más fácilmente a través de la PPN (Valladares, *et al.*, 2005).

Existe una gran variedad de métodos en la estimación de la PPN, estos pueden diferenciarse en dos grandes grupos: los métodos directos, en los que la cosecha manual es fundamental, y, los métodos indirectos, en los que se usa modelos de simulación a partir de información espectral. Una descripción más detallada se incluye a continuación.

5.4.1. Métodos directos

En términos prácticos la PPB no puede ser medida directamente, y la cuantificación de consumo energético durante la respiración vegetal es compleja e imprecisa, por lo que resulta conveniente abordar la PPN como el total de materia orgánica producida durante un intervalo de tiempo definido (tasa de almacenamiento de carbono). Esto implica evaluar la producción en cada uno de los componentes aéreos, como: biomasa (hojas y estructuras lignificadas), materiales reproductivos, compuestos volátiles y compuestos orgánicos lavables; en adición a la producción en los componentes subterráneos, tales como: biomasa, exudados radiculares y estructuras generadas en relaciones simbióticas (Clark, *et al.*, 2001).

Sin embargo, el estudio detallado de cada uno de los elementos en mención resulta engorroso, costoso y altamente ineficiente en áreas extensas, por ello, la estimación de la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) se ha reducido a la medición de hojarasca fina e incremento de la biomasa aérea, a su vez, la PPN subterránea se estima como una porción teórica de la sección aérea o se soslaya (Salas & Infante, 2006).

El seguimiento a la producción de hojarasca es aprobado y ampliamente utilizado en la estimación de la PPN, debido a su influencia en los niveles de acumulación de biomasa y contenido de carbono en el bosque (Quiceno & Tangarife, 2013), además, representa entre 20% a 30% de la PPN total y responde a procesos biológicos, climáticos, topográficos, etarios del bosque (Quinto, *et al.*, 2007).

Esta metodología consisten colectar hojarasca durante un intervalo de tiempo (usualmente de 12 meses), haciendo uso de cestas o trampas ubicadas de acuerdo a la técnica de muestreo. La cosecha se efectúa de forma periódica a fin de evitar perdida y/o deterior del

material capturado, este pasa por un proceso de clasificación estructural (hojas, ramas pequeñas, flores, frutos, semilla y ceniza) y pesaje; las submuestras son secadas en estufa hasta obtener un peso constante. Finalmente, con la estimación de la biomasa aérea y la productividad de la hojarasca, se determina el contenido de carbono/área/tiempo (Salas & Infante, 2006; Quinto, *et al.*, 2007; Quiceno & Tangarife, 2013).

Otro método frecuente es la estimación de biomasa a través de la cosecha destructiva, éste, implica el apeo, secado y pesaje de una muestra representativa de la vegetación. Junto a la medición del diámetro a la altura del pecho, altura total, edad y volumen se obtiene la densidad de biomasa aérea a partir de la cual se estima la PPN. Este tipo de investigaciones proporcionan los elementos necesarios para crear ecuaciones de regresión de biomasa local y/o probar la valides de una ecuación existente (Salas & Infante, 2006; Quiceno & Tangarife, 2013).

5.4.2. Métodos indirectos

Las limitaciones registradas para la ejecución de métodos directos ha impulsado el desarrollo de alternativas indirectas, en esto, la teledetección permite disponer de una cobertura completa del territorio, no es necesario definir protocolos de intra o extrapolación de observaciones puntuales, además, posibilita el estudio y comparación de la PPN en distintas escalas temporo-espaciales con la única condición de usar el mismo protocolo de observación (Paruelo, 2008).

Uno de los métodos más usados, es el enunciado por Kumar y Monteith en 1981 como "Modelo de Eficiencias". En este, la PPN está directamente relacionada con la Radiación

Fotosintéticamente Activa Absorbida (APAR) y la Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR) (Paruelo, 2008), tal como se indica en la siguiente ecuación.

$$PPN = EUR * APAR$$

La APAR es una relación de la Radicación Fotosintéticamente Activa Incidente (PAR) y la fracción de energía que es interceptada por la vegetación (*f*PAR). PAR representa la radiación astronómica incidente dependiente de la latitud y puede experimentar ligeras variaciones interanuales; normalmente puede ser provista por estaciones meteorológicas locales (Rueda, *et al*, 2015).

*f*PAR representa el comportamiento de la vegetación frente a la radiación incidente, por lo tanto es dependiente de la estructura y la morfología de la cobertura vegetal. Semiempíricamente se ha establecido una relación lineal entre esta variable y el NDVI, siempre y cuando la vegetación no esté en la fase senescente, pues la intercepción de radicación se realiza pero el NDVI se reduce. Es necesario considerar que un porcentaje de cobertura demasiado alto podría saturaría la relación, y, evaluar áreas con dominancia de suelos desnudos podría dificultar la discriminación de coberturas (Quinto, *et al.*, 2007; Rueda, *et al*, 2015). .

La EUR representa la eficiencia con que la radiación interceptada es traducida en materia seca a través de la fotosíntesis, por lo tanto está fuertemente influenciada por las características propias de la especie, grupos funcionales, ecosistemas, y, en menor medida por el estado fenológico, temperatura y disponibilidad hídrica. Cuando no hay un factor que limite el crecimiento (por ejemplo, la cosecha en un cultivo), esta variable puede ser

estimada como la pendiente de la razón entre la cantidad de biomasa acumulada y la APAR (Di Leo, *et al.*, 2007).

5.5. Bosque seco tropical en Colombia

El bosque seco tropical (bs-T) es un ecosistema asociado a climas cálidos con estacionalidad marcada por las precipitaciones y meses de sequía (que varían de 2 a 6), donde la relación entre evaporación potencial y precipitación es mayor a 1, la temperatura es superior a los 17°C y la precipitación no supera los 2000 mm/año; estas condiciones adversas han dado lugar a patrones de producción de semillas, germinación, estrategias de supervivencia, desarrollo, morfología y fisiología vegetal únicas, que se observan en fragmentos de bosque ubicados en América central, América del sur, África, India, Sudeste Asiático y Australia, siendo más extensos aquellos ubicados en las zonas subtropicales del continente americano (México, Bolivia, Paraguay, Argentina) (Khurana & Singh, 2001; Gerhardt & Hytteborn, 1992).

El estado de conservación del bosque seco tropical es aproximadamente similar a nivel global, siendo considerado por múltiples autores como uno de los ecosistemas más amenazados, menos estudiados y pobremente protegidos (Gerhardt, 1993; Swaine, 1992; Bravo, 2013; Pizano & García, 2014), sin embargo, las regiones de Australia, Asia, África y América del sur ostentan una situación crítica, en la cual el bosque seco tropical es un mosaico altamente perturbado principalmente por la transformación de coberturas para el uso ganadero y agrícola (Khurana & Singh, 2001; Arcila, *et al.*, 2012; Chidumayo & Gumdo, 2010).

Estas perturbaciones suelen ser irreversibles, pues se ha registrado que la frecuencia de germinación, la viabilidad del banco de semillas y la humedad en el suelo disminuyen conforme la intensidad del disturbio, siendo fácilmente colonizable por especies de amplia distribución y rápido crecimiento (Kennard, *et al.* 2002). Se estima que a nivel mundial aún se conservan cerca de 1 millón de km^2 de los cuales el 97% es altamente susceptible a la desaparición por el cambio en el uso del suelo, el fuego y la creciente fragmentación del bosque (Pizano & García, 2014).

En Colombia, esta formación vegetal se extiende por la región Caribe, los valles interandinos del Río Cauca y el Río Magdalena, los enclaves secos del norte de los Andes, los valles del Rio Dagua y Patia, así como el piedemonte y los afloramientos rocosos de los llanos; estas áreas difieren en su génesis, edafología y las presiones de selección dando lugar a un sin número de endemismos (Pizano & García, 2014). Se estima que originalmente este tipo de bosques se extendía por cerca de 200.574 km^2, para inicios de los años 70´s se figuraba un área de 80.000 km^2 (Espinal & Montenegro, 1977).

Actualmente se desconoce la extensión de este ecosistema y la inferencia de la misma se dificulta paulatinamente conforme las matrices de transformación que rodean estas formaciones vegetales aumentan su área de influencia, no obstante, Bravo (2013) estima la permanencia de 1.200 km^2, mientras que Pizano & García (2014) sugieren la presencia de 6.400 km^2 de bosque seco tropical, de las cuales sólo el 5% se incluyen bajo alguna figura del Sistema Nacional de Áreas Protegidas – SINAP.

Como se ha mencionado, las características morfológicas y fisiológicas de la vegetación en el bs-T son variadas a fin de aumentar la tolerancia, adaptación y permanencia de las

especies a lo largo de los cambios “estacionales” y la sucesión vegetal. En términos generales, las especies vegetales caducifolias dominan el dosel, mientras que los estratos subsiguientes albergan especies de hoja persistente pero con una tasa fotosintética por unidad de masa foliar inferior a las ya mencionadas (Pizano & García, 2014; Santiago, *et al.* 2004)

Es común observar la reducción de láminas foliares a espinas cuya función principal es la reducción de la transpiración, la presencia de tallos fotosintéticos que facilitan la permanencia de las especies caducifolias durante la temporada de sequía, así como la gran variedad de especies con el metabolismo ácido de las crasulaceas (CAM) (Aguilera, Azocar, & Gonzales, 2003; Murphy & Lugo, 1986; Bravo, 2013; Cuatrecasas, 1958).

La gestión de este ecosistema aun es incipiente a nivel nacional, mientras que a nivel local los motores de degradación forestal siguen reduciendo los atributos del bosque seco, en esto, Mancino, *et al.* (2014) consideran que los cambios en la cobertura vegetal afectan la disponibilidad y distribución (temporal y espacial) de los recursos naturales, además, alteran la integralidad de los ecosistemas y por lo tanto su productividad, así, el cambio en la cobertura vegetal es considerado uno de los principales catalizadores en la pérdida de biodiversidad, resiliencia, transformación de los ciclos biogeoquímicos, la composición atmosférica y el clima.

La medición y seguimiento de dichos cambios se constituye en herramientas clave para gestionar asertivamente los recursos, focalizar las áreas de intervención y encaminar los esfuerzos de conservación locales; estas herramientas de gestión pueden obtenerse rápidamente a partir de la teledetección.

De acuerdo con Alcaraz-Segura, *et al.* (2008), la teledetección permite el análisis en términos funcionales de la vegetación, lo que resulta mucho más significativo desde la teoría de sistemas (una comunidad vegetal es dinámica y está en constante flujo de materia y energía), además, facilita la identificación rápida de perturbaciones en diferentes escalas espacio-temporales.

6. METODOLOGÍA

6.1. Área de estudio

Girardot es un municipio de Cundinamarca (Colombia), posee una altitud entre 275 y 900 m.s.n.m. (289 m.s.n.m. en la cabecera municipal), la temperatura promedio es de 27.4°C con variación de ±1.2 °C. La zona tiene un régimen bimodal, con un periodo de lluvias de marzo a mayo y otro en los meses de septiembre a noviembre, siendo de junio a agosto el periodo seco (Figura 1). La precipitación promedio anual es de 1026 mm, con humedad relativa cercana al 80% y brillo solar de 212 horas/mes en promedio (Bogotá & Velásquez, 1982).

Limita al norte con el municipio de Nariño y Tocaima, al sur con el municipio de Flandes y el Río Magdalena, al oeste con el municipio de Nariño, el río Magdalena y el municipio de Coello y al este con el municipio de Ricaurte y el Río Bogotá. Su área rural comprende 11 veredas divididas en dos corregimientos: Barzaloza y San Lorenzo, que abarcan 10.779 ha (Alcaldía de Girardot- Cundinamarca, s.f.).

Es uno de los municipios más poblados del departamento con 822.29 habitantes por kilómetro cuadrado y una población total de 103.175 habitantes. La actividad económica más dinamizada corresponde al turismo, seguida de la agricultura con cultivos de maíz,

sorgo, ajonjolí, algodón y arroz además de algunos frutales especialmente mango, limón y naranja. (Gobernación de Cundinamarca, 2014).

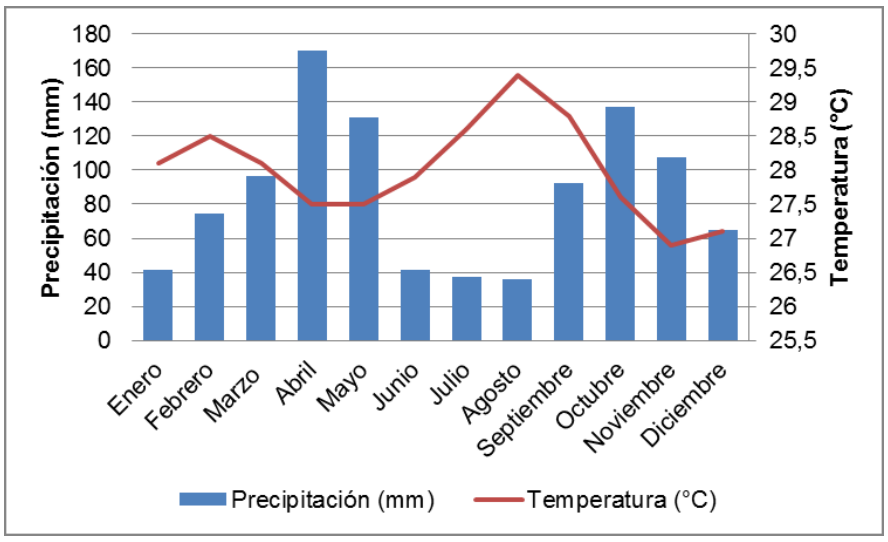
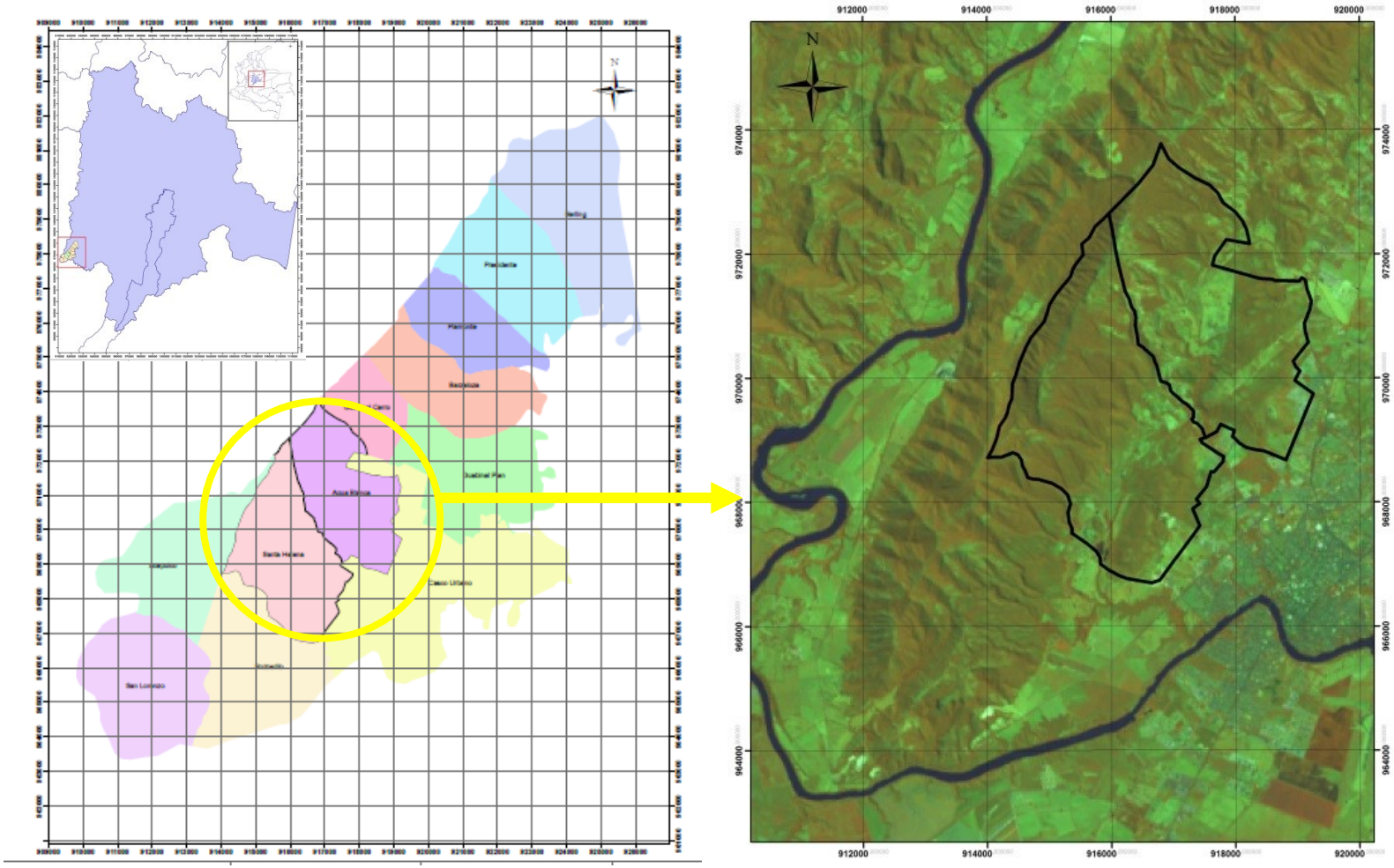


Figura 1. Climograma Estación Aeropuerto Internacional Ernesto Cortissoz. Girardot

Fuente: IDEAM, 2015.



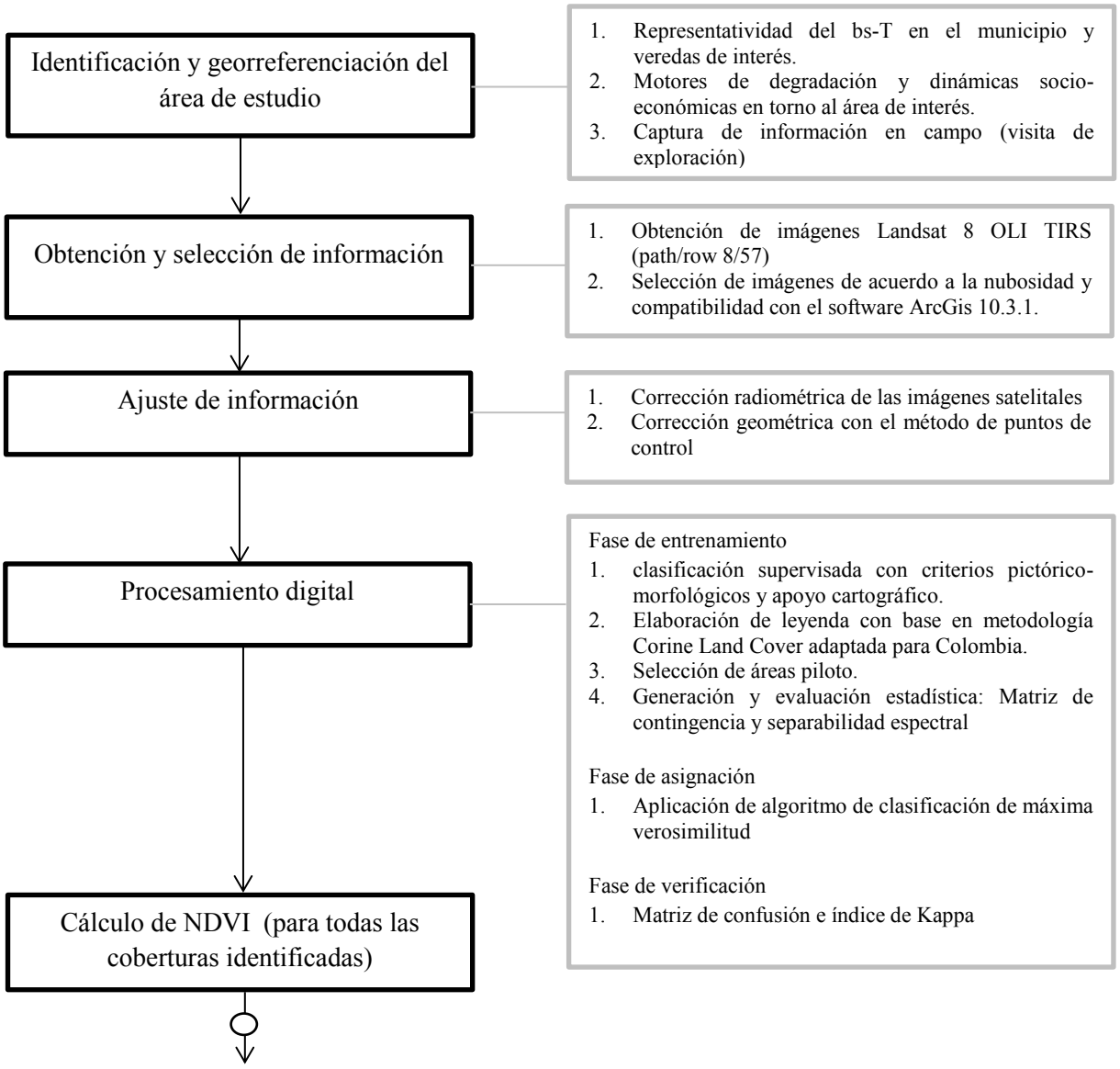
Mapa de división política de Girardot (Cundinamarca)
Escala 1: 100000
Fuente: Gobernación de Cundinamarca (2014)

Imagen Landsat 8 OLI TIRS (Febrero 2015)
Veredas Agua Blanca y Pozo Azul
Composición 5-6-4 (RGB)

Figura 2. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo las veredas Pozo Azul y Agua Blanca, ubicadas en las coordenadas 0992092 N y 0850599 W, se registra una altitud entre 350 y 670 m.s.n.m., el área total de 2033.41 ha que corresponde al 15.6% de la superficie municipal (Figura 2). Al norte limitan con la vereda Guabinal Cerro, al este con el municipio de Nariño, al oeste con la cabecera municipal de Girardot y al sur con las veredas Acapulco y Potrerillo.

6.2. Materiales y métodos



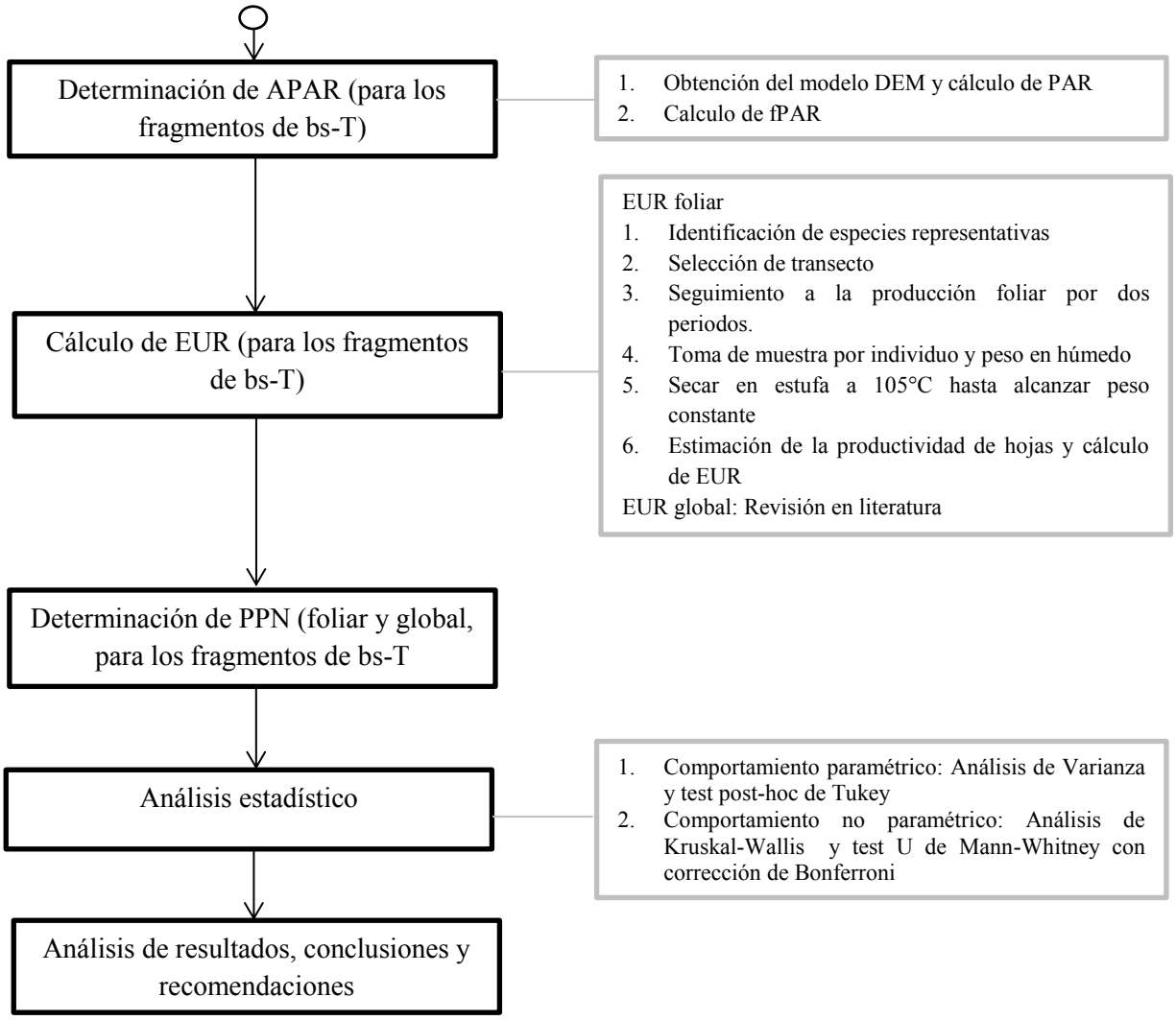


Figura 3. Metodología

- **Identificación y georreferenciación de áreas de estudio:** a partir de cartografía del municipio de Girardot elaborada durante el año 2012 por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (Regional Alto Magdalena), y, escenas de Google Earth versión 7.1.7.2606, se verifico la representatividad del bs-T en el municipio, por otro lado se observaron variaciones en las condiciones de cada superficie boscosa, atribuidas principalmente al área, forma, topografía y distancia del perímetro urbano.

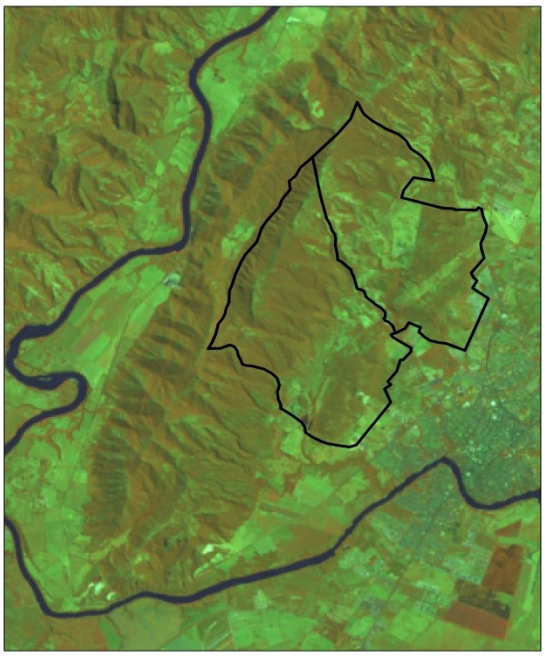
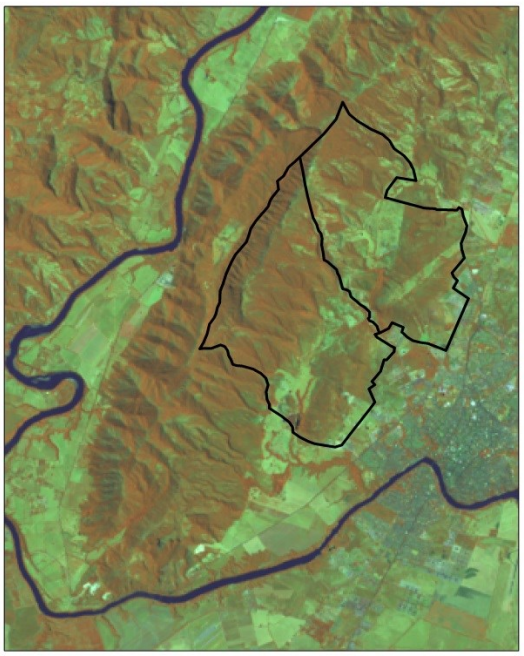
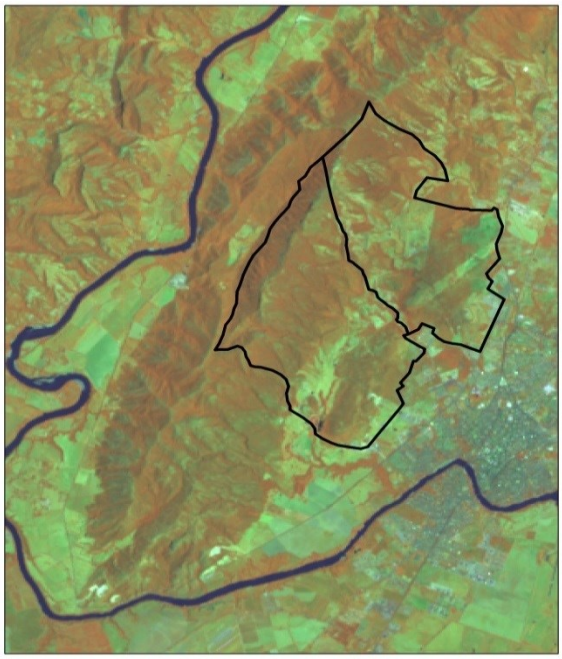
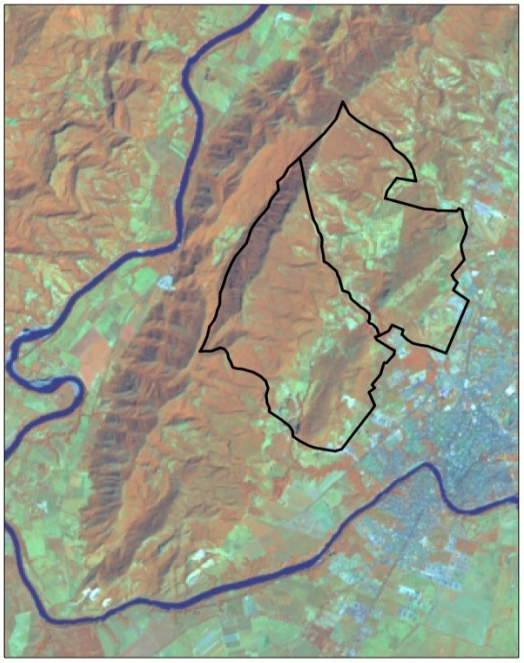
A continuación se identificaron como áreas de interés las veredas Pozo Azul y Agua blanca, georreferenciadas a partir de cartografía base de la Gobernación de Cundinamarca del 2014 y planchas cartográficas 245IVA y 2451IVC (escala 1:25.000) del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

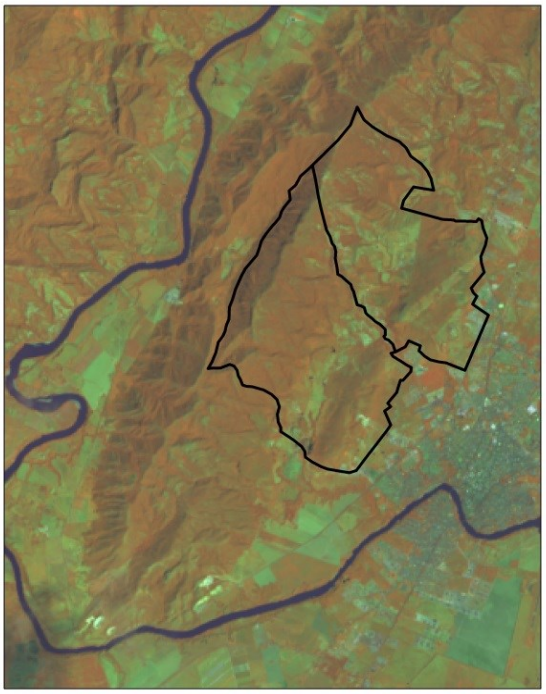
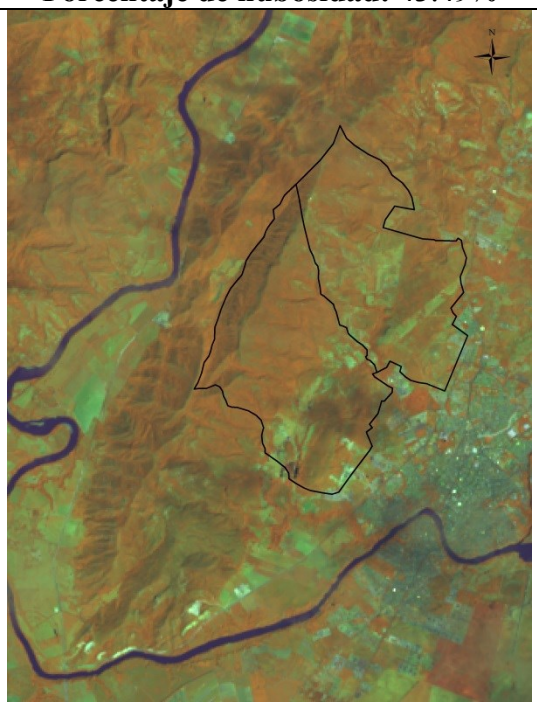
Se inició la búsqueda de información respecto a la composición, estructura y función de las áreas de interés, motores de degradación e importancia económica y social a nivel local sin arrojar resultados importantes, es decir, no existe información solida respecto a las condiciones ambientales, sociales y económicas asociadas a la formación boscosa. Finalmente, se realizó una visita exploratoria en la que se identificaron la accesibilidad y transecto representativo para la toma de muestras vegetales. Se procedió a la recolección e identificación de material vegetal

- **Obtención y selección de la información:** en el satélite Landsat, el municipio de Girardot comprende una escena dentro del path/row, 8/57, con base en esta información se dio inicio a la adquisición de imágenes multiespectrales del satélite Landsat 8 sensor OLI TIRS, desde la página web del departamento geológico de Estados Unidos (U.S. Geological Survey USGS, Earth Resources Observation and Science Center).

  Se obtuvieron en total noventa y dos imágenes captadas entre Julio de 2013 y Febrero de 2017, como criterio de selección se evalúo la pertinencia de las mismas (nula a despreciable nubosidad para el área de estudio, compatibilidad con el software ArcGis 10.3.1), resultando útiles ocho imágenes cuyas características se consignan en la siguiente tabla.

Tabla 4. Generalidades de las imágenes

	
ID de imagen: LC80080572013206LGN00	**ID de imagen:** LC80080572014209LGN00
Fecha de obtención: 25/07/2013	**Fecha de obtención:** 28/07/2014
Porcentaje de nubosidad: 34%	**Porcentaje de nubosidad:** 25%
	
ID de imagen: LC80080572014273LGN00	**ID de imagen:** LC80080572015004LGN00
Fecha de obtención: 30/09/2014	**Fecha de obtención:** 04/01/2015
Porcentaje de nubosidad: 19%	**Porcentaje de nubosidad:** 4%

	
ID de imagen: LC80080572015036LGN00	**ID de imagen:** LC80080572015212LGN00
Fecha de obtención: 05/02/2015	**Fecha de obtención:** 31/07/2015
Porcentaje de nubosidad: 31%	**Porcentaje de nubosidad:** 43.49%
	
ID de imagen: LC80080572015356LGN00	**ID de imagen:** LC80080572016311LGN00
Fecha de obtención: 22/12/2015	**Fecha de obtención:** 06/11/2016
Porcentaje de nubosidad: 20.24%	**Porcentaje de nubosidad:** 43.47%

- **Ajuste de la información:** se procede a la corrección de las imágenes satelitales al aplicar el proceso de georreferenciación mediante la técnica de puntos de control, tomando como base de referenciación las planchas cartográficas 245IVA y 245IVC escala 1:25000 provenientes del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

  Posteriormente se delimita el área de estudio definida geopolíticamente por las veredas Pozo azul y Agua Blanca, en el municipio de Girardot. Durante esta fase metodológica se hizo uso del software ArcGIS 10.3.1, teniendo como sistema de coordenadas Magna SIRGAS en proyección Transversa de Mercator.

  Las correcciones atmosféricas (Radiométrica) de reflectancia y radianza se realizaron con base al protocolo de Ortorectificación de Imágenes Satelitales Landsat (IGAC, 2013; Urbanski, 2014).

- **Procesamiento digital de imágenes:** el procesamiento se llevó a cabo en tres fases, en la primera denominada fase de entrenamiento se hizo un ajuste de contraste con la composición falso color, que resulta de la combinación 5-6-4 (RGB), pues como se vio anteriormente, las imágenes obtenidas del sensor Landsat 8 OLI incluye bandas adicionales respecto a sus antecesores y modificaciones en el ancho de las bandas, entonces, mientras en Landsat 5 y 7 el falso color resulta de la combinación 5-4-3 (RGB) para el sensor Landsat 8 el falso color equivale a la combinación 5-6-4 (RGB).

  Posteriormente se realizó una interpretación visual de las imágenes, con base en características pictórico-morfológicos (como tono-color, tamaño, forma y sitio), cartografía de apoyo y referencias en la literatura. Esta interpretación permitió determinar los tipos de cobertura presentes en el área de estudio de acuerdo a la

Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia (escala 1:100.000) y, sus respectivas áreas piloto.

Se obtuvo el mapa de cobertura a escala 1:25000, con leyenda basada en el protocolo de Estandarización de la Información de cobertura del suelo, estructura de Datos, Símbolos y Colores de la Corporación autónoma regional del Valle del Cauca (2011). Las clases espectrales finales obtenidas fueron:

Tabla 5. Clases espectrales en el área de estudio

Código	Cobertura
1.1.2.	Tejido urbano discontinuo.
2.3.1.	Pasto limpio
2.3.3.	Pasto enmalezado
3.1.3.1.	Bosque fragmentado con pastos y cultivos
3.2.1.1.1.2.	Herbazal denso de tierra firme arbolado

En la fase de asignación, se comprobó la representatividad de las áreas piloto y heterogeneidad de la muestra a partir de la función matriz de contingencia, adicionalmente, la función separabilidad espectral muestra una clara definición de los tipos de cobertura identificadas (valor de separabilidad espectral: 1960).

Para la fase de verificación de resultados, se procedió a la obtención de la matriz de confusión con un total de 377 pixeles de control seleccionados sistemáticamente. Para su construcción la comparación se hace entre los datos que se consideran reales del terreno según la información espectral de los puntos de control asumida por Arcgis

(exactitud del programa para cada clase) y el mapa clasificado (exactitud del usuario).

Se utilizó un método de matriz común, en el cual en las filas se muestran los falsos positivos, o puntos que se clasificaron como una clase cuando pertenecían a otra (comisión), así en la fila Total se muestra el número de puntos que se deben haber identificado como una clase dada, según los datos reales del terreno; mientras que en las columnas, se muestran los falsos negativos o puntos que se debieron clasificar como una clase (omisión), en la columna Total se muestra el número de puntos que se identificaron como una clase dada, según el mapa clasificado. La diagonal, muestra una visión general de las asignaciones correctas. (Arcgis 10.3. Manual del usuario).

Para dar una visión más global de la clasificación, a partir de la matriz de confusión, se calculó el grado de exactitud de la clasificación con el índice de Kappa mediante la fórmula:

$$k = \frac{N\sum_{i=1}^{r} X_{ii} - \sum_{i=1}^{r}(X_{i+} * X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^{r}(X_{i+} * X_{+i})} \quad \text{(Congalton, 1991)}$$

Donde $\boldsymbol{r}$ es el número de filas en la matriz; $\boldsymbol{X_{ii}}$ es el número de observaciones en la columna $\boldsymbol{i}$, fila $\boldsymbol{i}$ (Asignaciones correctas); la variables $\boldsymbol{X_{i+}}$ son los totales marginales para la fila $\boldsymbol{i}$ (Fila total) y $\boldsymbol{X_{+i}}$, los valores totales marginales de la columna $\boldsymbol{i}$ (Columna Total); y, $\boldsymbol{N}$ es el número total de observaciones (Puntos de control). Entonces, expresa la proporción de área correctamente clasificada (confiabilidad global) frente a la confiabilidad resultante del azar (Landis & Koch, 1977).

El índice está acotado entre 0-1, cuanto más cercano sea a 1 mayor es el grado de acierto en la clasificación, se relaciona a continuación el modelo de interpretación más usado.

Tabla 6 . Interpretación del índice Kappa

Índice de Kappa	Fuerza de Concordancia
≤0	Únicamente atribuida al azar
>0 – 0,20	Insignificante
0,21 – 0,40	Bajo
0,41 – 0,60	Moderado
0,61 – 0,80	Bueno
0,81 – 1,00	Muy bueno

Adaptado de Landis & Koch (1977)

- **Cálculo del índice de diferencia normalizada:** para este cálculo se utilizaron las bandas 4 (640 nm – 670 nm, rojo) y 5 (850 nm - 880 nm, infrarrojo cercano), la ecuación aplicada fue:

$$NDVI = \frac{ND_{IRC} - ND_R}{ND_{IRC} + ND_R}$$ (Tucker, 1979)

Donde

- ND_{IRC}: reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano, con intervalos espectrales 760-900 nm
- ND_R: reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo con intervalos espectrales 630-690 nm

El sistema de interpretación para este estudio se relaciona en la tabla 3. Como resultado, se obtuvieron mapas de vigor de la vegetación.

- **Cálculo de APAR:** la APAR es una relación de la Radicación Fotosintéticamente Activa Incidente (PAR) y la fracción de energía que es interceptada por la vegetación (*f*PAR), por lo tanto puede calcularse con la expresión:

$$APAR = fPAR * PAR$$ (Di Leo*, et al.,* 2007)

Debido a que la radiación astronómica es dependiente de la latitud y experimenta variaciones interanuales (Di Leo, et al., 2007), fue necesario emplear el Modelo Digital de Elevación (DEM) para cada una de las imágenes usadas en este estudio, a través de Áster GDEM (Aster Global Digital Elevation Model).

Áster GDEM es un proyecto de la NASA y, el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) con el que se pone a disposición pública modelos DEM con resolución espacial de 30 m y 15m en la vertical, en formato GeoTIFF. La radiación solar obtenida a través de modelos de elevación terrestre (DEM) para el área de estudio oscila entre 9,51 y 19.77 MJ/m^2

A partir de los modelos DEM, se calculó la radiación solar mediante la opción del software Arcgis 10.3.1. "Area Solar Radiation", que determina la PAR en Watts hora por metro cuadrado (Wh/m^2); los valores se multiplicaron por 0,0036 para obtener los resultados en MJ/m^2.

La fPAR es la fracción de la PAR que es absorbida por los tejidos vegetales, calculada a

partir del NDVI mediante la ecuación:

$$fPAR = -0{,}025 + 1{,}25 * NDVI$$ (Ruimy *et al.,* 1994)

fPAR fue obtenida solo para los siete fragmentos de bosque seco tropical encontrados en las veredas Agua Blanca y Pozo Azul (Figura 4) y, los ocho mapas de distribución de NDVI obtenidos entre Julio de 2013 y Noviembre de 2016.

Tabla 7. Área por fragmento boscoso

N° de Fragmento	**Área (ha)**
1	165,91
2	415,59
3	24,59
4	55,19
5	86,46
6	188,34
7	16,05

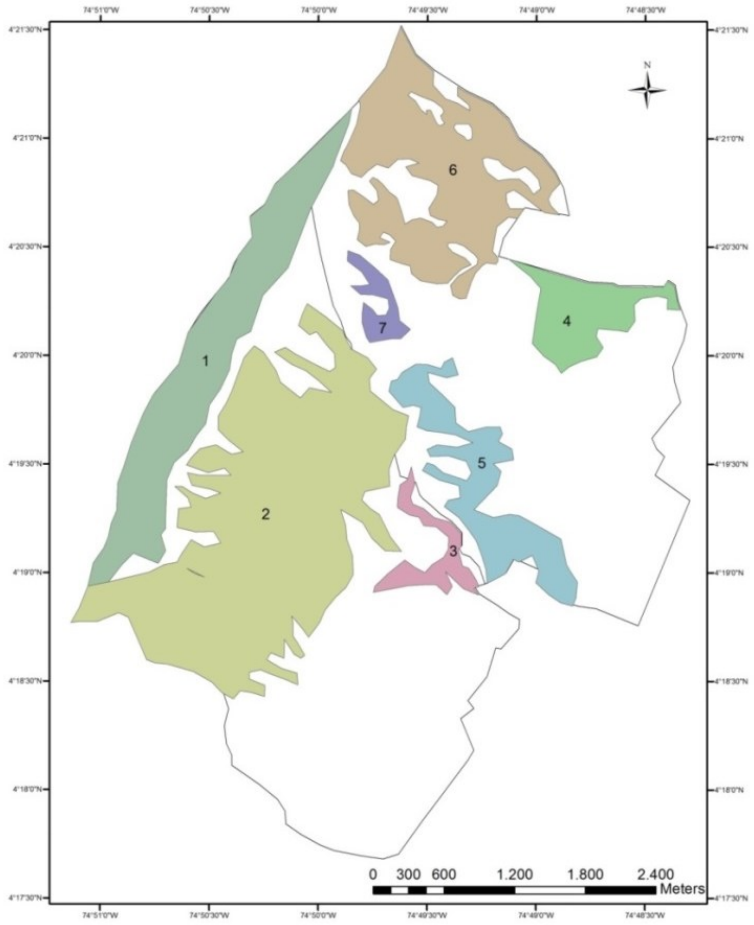


Figura 4. Fragmentos de bosque seco tropical en las veredas estudiadas

- **Estimación de la EUR y Cálculo de la PPN:** durante la visita de exploración se identificó como área de interés para la toma de muestras el sendero conocido como Pasaje al Arbolito, en la vereda Agua Blanca, debido su ubicación estratégica: se encuentra en medio de los fragmentos estudiados, limita al norte con la reserva ecoturística Serranía Alonso Vera (uno de los fragmentos del bs-T más representativos en el área de estudio), durante su recorrido es posible identificar un gradiente de conservación y, es un sector fácil acceso.

  Debido a estas características se instauro un transecto de 250 m (Figura 5), con punto de partida en el mirador de Agua Blanca en las coordenadas 0972304 N y 0916301 W.

Con base en información segundaria obtenida del POT 2011, algunos registros en literatura y, principalmente la identificación del material colectado durante la visita exploratoria en el Pasaje al Arbolito, se identificaron como especies representativas: *Abutilon petiolare* Kunth, *Acacia farnesiana* (L.) Willd, *Astronium graveolens* Jacq., *Cordia dentata* Poir., *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp. y, *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth.

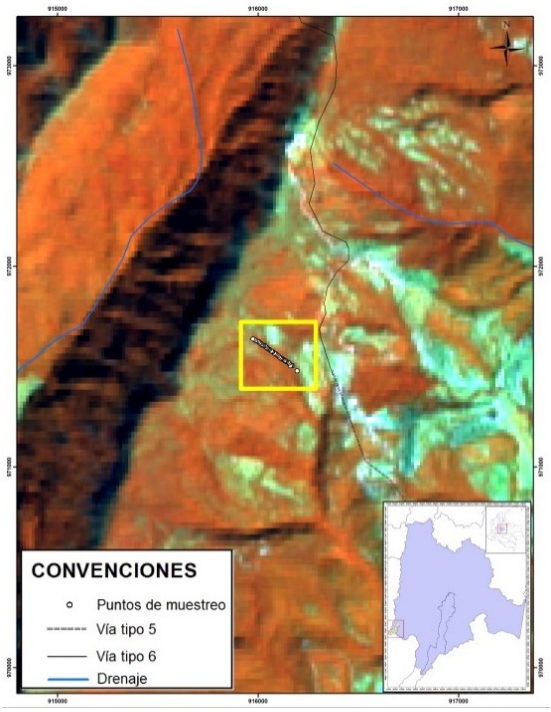


Figura 5. Área de muestreo

En el transecto se identificaron y marcaron 37 individuos de las especies representativas (véase tabla 8), en dos periodos (Periodo 1: Mayo-Abril de 2016 y Periodo 2: Enero-Febrero de 2017), se realizó el seguimiento en la producción de hoja nuevas, cuantificando hojas con área foliar menor a 1000 mm^2 e incluyendo la aparición de yemas foliares.

Tabla 8. Especies representativas e individuos muestreados

Especie	Número de individuos
Abutilon petiolare Kunth	4
Acacia farnesiana (L.) Willd	11
Astronium graveolens Jacq.	8
Cordia dentata Poir.	4
Gliricidia sepium (Jacq.) Walp.	5
Pithecellobium dulce (Roxb.) Benth.	5

Para cada uno de los 37 individuos seleccionados en cada periodo, se tomaron cuatro hojas (una por cada cuadrante de la copa), las cuales fueron secadas al horno a una temperatura de 105°C hasta alcanzar un peso constante. Se empleó una balanza analítica para tomar el peso seco, el cual se promedió para estimar la masa foliar por individuo, que multiplicado al número de hojas producidas resulta en la producción foliar por individuo.

Tomando el valor de PAR obtenido previamente, se determinó la $EUR_{(foliar)}$ por individuo el cual se promedió para estimar el valor por especie y muestra; con esto, se definió 0.28 g/MJ como valor característico para los siete fragmentos en el periodo 1 y 0,27 g/MJ para el periodo 2. De acuerdo a las observaciones de Monteith (1972), se acepta 1.5 g/MJ como $EUR_{(Global)}$ para éste estudio.

$$EUR_{foliar} = \frac{Producción\ foliar\ (g/m^2)}{PAR\ (MJ/m^2)}$$

La productividad primaria neta foliar PPN se determinó mediante el producto de la

eficiencia del uso de la radiación (foliar y global) y la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación:

$$PPN_{foliar} = EUR\ \left(\frac{g}{MJ}\right) * APAR\ (\frac{MJ}{m^2})$$

- **Análisis estadístico**: los datos obtenidos se someten a las pruebas de homogeneidad (test Kolmogorov-Smirnov) y homocedasticidad (test de Levene), así, se identifican dos tipos de datos: los de comportamiento paramétrico y aquellos de comportamiento no paramétrico.

  Los elementos de tipo paramétrico se someten al análisis de varianza ANOVA, para determinar si las diferencias que existen entre los niveles de clasificación son estadísticamente significativas, seguido del test post-hoc Tukey con el propósito de visualizar claramente los grupos diferenciales.

  En los datos de naturaleza no paramétrica, las diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de clasificación se determinan con el test Kruskal-Wallis, mientras que el peso específico de cada grupo se valora aplicando el test U de Mann-Whitney acompañado de la corrección de Bonferroni.

7. RESULTADOS

7.1. Clasificación de cobertura

Se procesaron ocho imágenes satelitales Landsat 8 OLI TIRS. La interpretación visual de las imágenes con base en rasgos pictórico-morfológicos, permitió identificar cinco tipos de cobertura en el área de estudio de acuerdo a metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, a saber: Tejido urbano discontinuo, Pasto limpio, Pasto enmalezado, Bosque Fragmentado con pastos y cultivos, Herbazal denso de tierra firme arbolado.

Se registra que el 47.6% del área de estudio corresponde a Bosque fragmentado con pastos y cultivos, el 31.2% muestra cobertura de el Pasto enmalezado, mientras el 17.53% se caracteriza como Herbazal denso de tierra firme arbolado. El resultado se presenta en el mapa de coberturas a escala 1:25.000 (Anexo 1).

La verificación de resultados se efectuó a partir de una matriz de confusión con 377 puntos de control (Tabla 9), se puede establecer que la clasificación realizada cuenta con una precisión global de 81,17%. Adicionalmente, el índice de Kappa muestra una buena concordancia inter-observador, con un valor de 0.74.

El análisis detallado permite identificar que la mejor asignación ocurre en la cobertura tejido urbano discontinuo con un acierto en la predicción del 89.6 %; seguido las coberturas pasto enmalezado y bosque fragmentado con porcentaje de predicción del 87.8 % y 87.12% respectivamente.

Tabla 9. Matriz de confusión para coberturas clasificadas

	Puntos de Control					
Clasificación de coberturas	**Pasto limpio**	**Pasto Enmalezado**	**Bosque Fragmentado con pastos y cultivos**	**Herbazal denso de tierra firme arbolado**	**Tejido urbano discontinuo**	**Total Pixeles**
Pasto limpio	23	1	1	0	1	26
Pasto Enmalezado	12	72	10	9	1	104
Bosque Fragmentado con pastos y cultivos	3	5	115	8	1	132
Herbazal denso de tierra firme arbolado	9	2	6	70	0	87
Tejido urbano discontinuo	0	2	0	0	26	28
Total puntos de control	47	82	132	87	29	377

7.2. Índice de vegetación de diferencia normalizada

El cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se realizó de manera independiente para cada una de las imágenes satelitales; los mapas generados se presentan en escala bicromática de colores, donde las tonalidades cálidas (rojo) representan los pixeles con mayor grado la vigorosidad de la vegetación o NDVI, mientras que los colores fríos (Azul) representan áreas menor vigorosidad (Anexos 2 a 9).

Se obtuvieron valores mínimos de -0,98 para el cauce principal del Rio Magdalena y, valores máximos de 0,91 para el fragmento de bosque seco en la reserva ecoturística Serranía Alonso Vera. En términos generales, en el 82% del área estudiada se presume de coberturas agrupadas a densas con vigorosidad alta (NDVI promedio >3.5).

La distribución del NDVI indica una jerarquía de vigorosidad en las coberturas presentes, siendo mayor en áreas boscosas y nula en áreas degradadas (Bosque Fragmentado con pastos y cultivos > Herbazal denso de tierra firme arbolado > Pasto enmalezado > pasto limpio > tejido urbano discontinuo). Una revisión detallada de la cartografía generada, indica que la respuesta espectral está más asociada al porcentaje de cobertura que tiene la vegetación sobre la superficie que a la vigorosidad propiamente dicha (véase Tabla 10), por otro lado, se observa que el NDVI tiende a reducir en áreas adyacentes a la cabecera municipal y asentamientos humanos, independientemente del tipo de cobertura.

Tabla 10. Representatividad del NDVI (en área-ha) para cada Cobertura

Rango NDVI	Tipo de cobertura					Fecha
	Pasto limpio	Pasto enmalezado	Bosque Fragmentado	Herbazal denso	Tejido urbano discontinuo	
< 0	0	0	0	0	0	Julio de 2013
0-0,1	0	0,02	0	0	2,12	
0,1-0,2	0,09	2,66	0	0	6,26	
0,2-0,3	0,32	16,9	0,56	0,56	6,64	
0,3-0,4	0,97	58,97	2,3	2,54	5,47	
0,4-0,5	2,16	147,29	10,31	10,76	2,12	
0,5-0,6	11,03	184,84	43,4	41,83	1,53	
0,6-0,7	25,85	145,82	177,17	151,34	0,38	
0,7-0,8	7,52	71,78	711,79	145,94	0,05	
0,8-0,9	0	0,79	13,43	0,16	0	
< 0	0	0	0	0,09	0	Julio de 2014
0-0,1	0	0,38	0	0,02	1,22	
0,1-0,2	0,09	4,32	0	0,11	6,21	
0,2-0,3	0,63	25,92	0,9	0,83	5,96	
0,3-0,4	1,89	95,94	2,72	2,59	4,68	
0,4-0,5	5,67	171,61	14,76	13,73	3,6	
0,5-0,6	11,7	158,11	58,14	63,59	2,66	
0,6-0,7	21,6	116,75	208,33	166,93	0,2	
0,7-0,8	6,35	54,52	634,37	104,22	0,02	
0,8-0,9	0	1,51	39,74	1,01	0	
< 0	0	0	0	0,09	0	Septiembre

0-0,1	0	0	0	0	0	de 2014
0,1-0,2	0	1,4	0	0,09	4,77	
0,2-0,3	10,44	14,31	0,18	0,27	7,07	
0,3-0,4	16,72	48,78	1,22	2,14	4,79	
0,4-0,5	13,16	140,6	5,31	7,97	3,51	
0,5-0,6	6,08	180,43	27,34	46,51	3,96	
0,6-0,7	1,51	172,71	170,03	209,93	0,41	
0,7-0,8	0,02	70,49	733,03	85,91	0,05	
0,8-0,9	0	0,34	21,85	0,23	0	
< 0	0	0	0	0,07	0	Enero de 2015
0-0,1	0	0	0	0	0,61	
0,1-0,2	0	1,28	0	0,09	4,21	
0,2-0,3	0,16	7,45	0,05	0,09	4,84	
0,3-0,4	0,9	20,32	0,86	2,21	3,65	
0,4-0,5	3,2	76,46	1,8	5,49	3,44	
0,5-0,6	13,21	155,14	6,44	15,71	2,79	
0,6-0,7	23,6	180,83	47,07	52,22	2,84	
0,7-0,8	6,84	159,89	425,16	242,08	2,14	
0,8-0,9	0,02	27,7	477,59	35,17	0,05	
< 0	0	0	0	0	0	Febrero de 2015
0-0,1	0	0	0	0	0	
0,1-0,2	0	0,2	0	0,05	2,52	
0,2-0,3	0,14	3,8	0	0,14	5,36	
0,3-0,4	0,2	14,27	0,52	0,81	4,05	
0,4-0,5	2,3	55,96	1,98	3,78	3,62	
0,5-0,6	15,5	208,64	28,44	29,97	3,65	
0,6-0,7	25,58	286,04	369,47	236,77	3,87	
0,7-0,8	4,21	60,14	558,54	81,61	1,49	
0,8-0,9	0	0	0	0	0	
< 0	0	0	0	0,18	0	Julio de 2015
0-0,1	0	0,18	0	0,09	1,46	
0,1-0,2	0,16	7,07	0,02	0,59	6,46	
0,2-0,3	0,52	53,10	2,36	3,06	7,29	
0,3-0,4	2,59	159,71	7,85	16,76	6,35	
0,4-0,5	12,60	164,86	39,44	58,88	2,63	
0,5-0,6	25,90	121,91	152,96	144,90	0,36	
0,6-0,7	6,12	95,67	464,02	115,74	0	
0,7-0,8	0,05	26,33	289,73	11,88	0	
0,8-0,9	0	0,23	2,54	1,06	0	
< 0	0	0	0	0	0	Diciembre de 2015
0-0,1	0	0,34	0	0,16	1,22	
0,1-0,2	0,25	3,96	0,07	0,32	5,22	
0,2-0,3	0,38	19,51	1,24	0,79	5,74	
0,3-0,4	0,90	96,80	3,78	6,66	5,99	

0,4-0,5	7,11	154,37	13,16	22,19	3,85	
0,5-0,6	18,86	156,15	58,84	65,32	1,87	
0,6-0,7	18,81	133,04	239,96	153,23	0,65	
0,7-0,8	1,40	53,10	472,59	90,00	0,02	
0,8-0,9	0,23	11,77	169,29	14,49	0	
< 0	0	0	0	0,23	0	
0-0,1	0	0,18	0	0,05	0	
0,1-0,2	0	4,64	0	0,38	3,31	
0,2-0,3	0,41	8,46	0,18	0,83	5,06	
0,3-0,4	0,38	17,71	0,81	1,69	2,63	Noviembre
0,4-0,5	1,04	42,80	2,27	2,77	3,33	de 2016
0,5-0,6	2,32	111,33	6,17	9,34	3,15	
0,6-0,7	8,15	197,66	47,90	44,44	4,52	
0,7-0,8	29,32	213,50	446,58	212,11	2,52	
0,8-0,9	6,32	32,76	455,02	81,32	0,02	

Tomando en cuenta la representatividad de cada cobertura en los ocho escenarios Landsat, se realizó la selección aleatoria y proporcional de pixeles a fin de obtener valores de NDVI característicos por escena, con un promedio se obtuvieron valores característicos para el área de interés, a partir de los cuales se llevó a cabo el análisis estadístico.

Los resultados obtenidos con el estadístico Kolmogorov-Smirnov (corrección de Lilliefors) y, el test de Levene permiten rechazar las hipótesis de normalidad y homocedasticidad ($p<0,05$), por lo tanto, se aplica la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis que indica la existencia de diferencias significativas entre los valores de NDVI asociados a cada tipo de cobertura.

Se destacan por valores de NDVI cercano a 1 el bosque fragmentado (0,35 – 0,91) y el herbazal denso (0,43 – 0,77), en contraste, el área urbana posee el menor valor registrado (0,11) pero con una amplia distribución que le lleva a tomar valores de hasta 0,5. Las áreas identificadas como pasto poseen una media aritmética particularmente similar, sin embargo,

en el pasto enmalezado existe una mayor diversidad de valores (0,33 - 0,76) que en el pasto limpio (0,52 - 0,63).

Para identificar y valorar más de cerca los grupos de cobertura sustancialmente diferentes, se procede a aplicar el test U de Mann-Whitney acompañado de la corrección de Bonferroni (Tabla 11), esto con el propósito de declarar similitud o divergencia en la distribución del NDVI por pares de tipo de cobertura, considerando la tasa de error generada durante las múltiples comparaciones (10 en total) (Álvarez, 1995); así, ha de asumirse que dos grupos difieren significativamente cuando el nivel crítico obtenido en el test U de Mann-Whitney sea inferior a 0,005.

Se ratifica que el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada ocupa rangos de valores más o menos definidos de acuerdo al tipo de cobertura, donde las únicas áreas en las cuales no hay diferencias significativas son pastos limpios y enmalezados como era de esperarse tras observar similitud en las medidas de tendencia central.

En orden descendente, se presume de una vegetación más vigorosa y densa en el bosque fragmentado, donde el 50% de los valores de NDVI se distribuyen de 0.71 a 0.73; para el herbazal denso la mayor parte de los datos se agrupan entre 0.64- 0.68; en el área de pasto enmalezado los valores entre 0.57 – 0.60 representan el 50% de los datos; en el pasto limpio la mayor parte de los datos ocurren entre 0.56 y 0.59; finalmente en las áreas de tejido urbano discontinuo el 50% de los datos acaecen entre 0.16 - 0.6 (Figura 6).

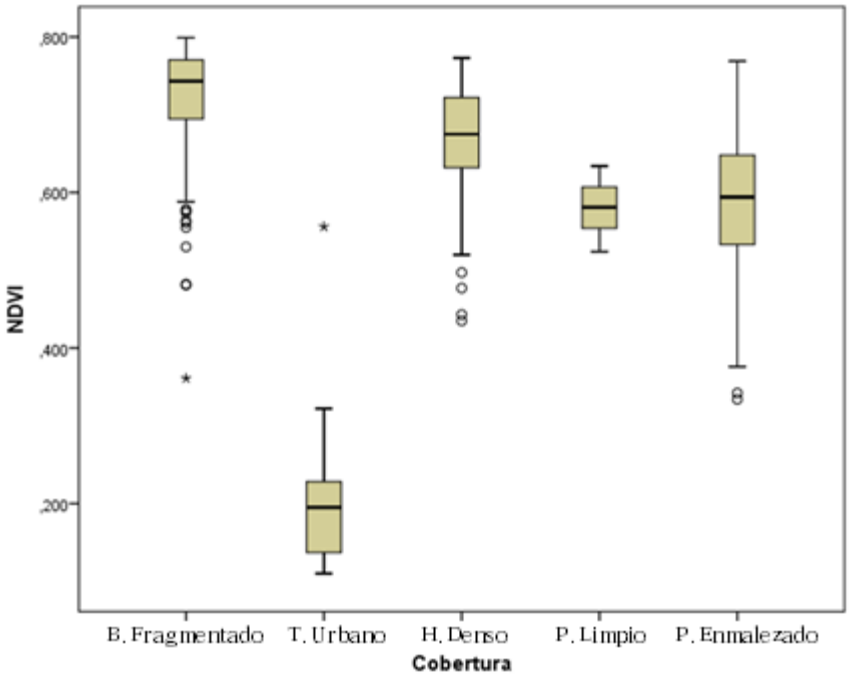


Figura 6. NDVI por tipo de cobertura

Tabla 11. NDVI: Test U de Mann-Whitney

B. Fragmentado vs. T.Urbano

	NDVI
U de Mann-Whitney	5,000
W de Wilcoxon	158,000
Z	-6,778
Sig. asintót. (bilateral)	,000

B. Fragmentado vs. H. Denso

	NDVI
U de Mann-Whitney	3491,500
W de Wilcoxon	7146,500
Z	-6,938
Sig. asintót. (bilateral)	,000

B. Fragmentado vs. P. Limpio

	NDVI
U de Mann-Whitney	150,000
W de Wilcoxon	270,000
Z	-5,688
Sig. asintót. (bilateral)	,000

B. Fragmentado vs. P. Enmalezado

	NDVI
U de Mann-Whitney	2430,500
W de Wilcoxon	11475,500
Z	-11,942
Sig. asintót. (bilateral)	,000

T. Urbano vs. H. Denso

	NDVI
U de Mann-Whitney	10,000
W de Wilcoxon	163,000
Z	-6,398
Sig. asintót. (bilateral)	,000

T. Urbano vs. P. Limpio

	NDVI
U de Mann-Whitney	4,000
W de Wilcoxon	157,000
Z	-4,665
Sig. asintót. (bilateral)	,000
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	,000[b]

T. Urbano vs. P.

H. Denso vs. P. Limpio

H. Denso vs. P. Enmalezado

Enmalezado

	NDVI
U de Mann-Whitney	47,000
W de Wilcoxon	200,000
Z	-6,429
Sig. asintót. (bilateral)	,000

	NDVI
U de Mann-Whitney	184,500
W de Wilcoxon	304,500
Z	-4,373
Sig. asintót. (bilateral)	,000

	NDVI
U de Mann-Whitney	2631,500
W de Wilcoxon	11676,500
Z	-6,704
Sig. asintót. (bilateral)	,000

P. Limpio vs. P. enmalezado

	NDVI
U de Mann-Whitney	917,500
W de Wilcoxon	1037,500
Z	-,552
Sig. asintót. (bilateral)	,581

7.3. NDVI por vereda

El test Kolmogorov-Smirnov con la corrección de significación de Lilliefors permiten rechazar la hipótesis de normalidad ($p<0,05$), en cambio, se registra homogeneidad de varianzas con lo que se advierte una gran probabilidad de que las fuentes de variación sean las mismas (Álvarez, 1995). Debido a la libre distribución de los valores, se aplica el test Kruskal-Wallis con el cual se reitera que los valores de NDVI son dependientes del tipo de cobertura, para identificar los grupos significativamente diferentes se procede con el test U de Mann-Whitney y corrección de Bonferroni.

Vereda Agua Blanca

En este sector se identifica al bosque fragmentado y al herbazal denso como las coberturas con mayor probabilidad de albergar vegetación densa, vigorosa y de alta capacidad fotosintética; al igual que en el análisis global, sólo las coberturas pasto limpio y

enmalezado no muestran diferencias significativas en los valores adoptados para el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Figura 7).

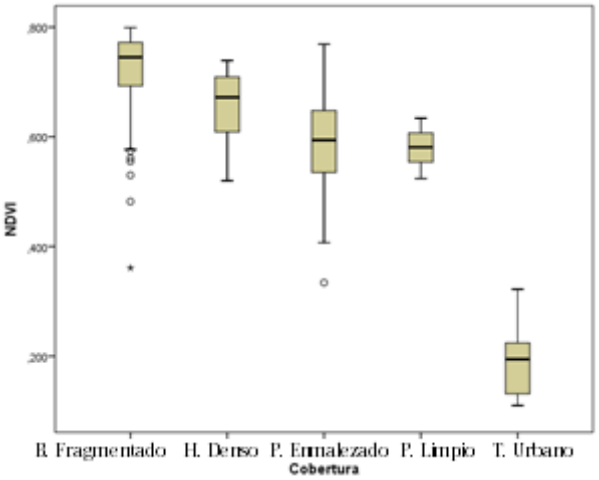


Figura 7. NDVI por tipo de cobertura, en la vereda Agua Blanca

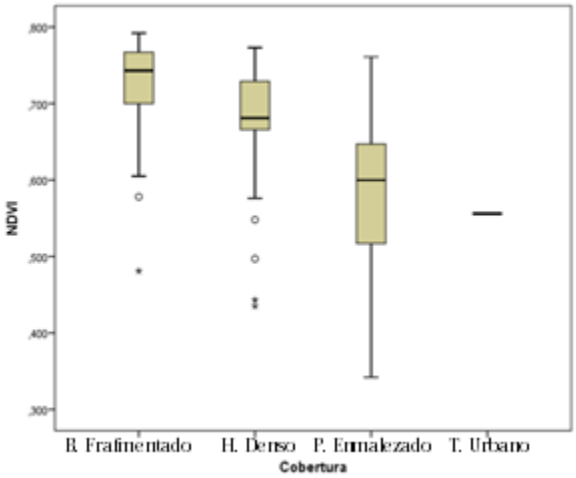


Figura 8. NDVI por tipo de cobertura en la vereda Pozo Azul

Vereda Pozo Azul

En esta vereda no hay zonas representativas de la cobertura denominada pasto limpio, adicionalmente, la cobertura de tejido urbano discontinuo se ha desestimado debido a la insipiente representatividad (menos de 2 datos susceptibles de análisis); entonces, el análisis estadístico compete únicamente a áreas de bosque fragmentado con pastos y cultivos, herbazal denso de tierra firme arbolado y pasto enmalezado.

Existen diferencias significativas en la vigorosidad y densidad de la vegetación. Se observa, que el bosque fragmentado y el herbazal denso poseen una distribución asimétrica y un rango de distribución similar (entre 0.4 y 0.8). Por otro lado, el pasto enmalezado tiene un

comportamiento aproximado a la curva de normalidad gaussiana con un rango de distribución de datos entre 0.4 y 0.7 (Figura 8).

7.4. Radiación fotosintéticamente activa absorbida

Las áreas con cobertura boscosa poseen una mayor densidad y, probablemente mayor vigorosidad y capacidad fotosintética que cualquier otro tipo de cobertura en las veredas de estudio. Conocer la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (APAR) en los fragmentos boscosos y su distribución espacial, permite la identificación de los relictos potencialmente más productivos (en términos de Productividad Primaria Neta).

Se realizó una selección aleatoria y proporcional de pixeles para los siete fragmentos de bosque identificados (3 en Pozo Azul y 4 en Agua Blanca) en cada escenario Landsat, con el objetivo de identificar los valores característicos, el promedio de estos se analizó estadísticamente.

Los estadísticos Kolmogorov-Smirnov y Levene permite rechazar la hipótesis de homocedasticidad ($p<0.05$), entonces se aplica el test Kruskal-Wallis a partir de la cual se comprueba la existencia de diferencias significativas entre los valores de APAR asociado a cada tipo de fragmento.

El bosque fragmentado expresa valores de APAR que van desde 7.63 MJ/m^2 (fragmento 5) hasta 17.25 MJ/m^2 (fragmento 1), se destacan los elevados valores del fragmento 1 (12.04 – 17.25 MJ/m^2) y 6 (11.31 – 17.19 MJ/m^2) mientras los fragmentos 5 (7.63 – 17.12 MJ/m^2) y 3 (9.93 – 16.62 MJ/m^2) registran los valores más bajos. Se observa una cercanía en las

medidas de tendencia central para los relictos 4 y 5, no obstante, este último muestra un mayor rango en la dispersión de datos.

Con el propósito de reconocer los fragmentos con valores de APAR significativamente diferenciados se aplica el test U de Mann-Whitney acompañado de la corrección de Bonferroni para 21 comparaciones, con la que se asume que dos grupos difieren significativamente cuando el nivel crítico obtenido en el test U de Mann-Whitney sea inferior a 0,002 (Tabla 12).

APAR posee un comportamiento altamente heterogéneo en cada relicto, probablemente como resultado de la diversidad en la composición, estructura y función, así como el estado fenológico de los individuos e incluso la ecología del paisaje que se manifiesta en cada fragmento.

Si bien es inconveniente definir rangos de valor APAR para cada parche de bosque fragmentado el procesamiento estadístico ha permitido identificar dos fenómenos, el primero es la completa divergencia del fragmento 1 y sus homólogos, el segundo es la paridad del fragmento 7 únicamente con el fragmento 3.

Se presume entonces de una alta probabilidad de asimilación fotosintética en el fragmento 1 (16.77 MJ/m^2), seguido del grupo conformado por los fragmentos 2 a 6 (14.65 – 16.00 MJ/m^2), mientras que el fragmento 7 muestra la menor probabilidad de asimilación (14.02 MJ/m^2) (Figura 9).

Respecto a los factores que originan los resultados descritos, existen múltiples fuentes de variación, sin embargo, es evidente es la topografía tiene una fuerte incidencia en la distribución vegetal y, accesibilidad a las zonas (que se traduce en intervención antrópica).

Tabla 12. APAR: Test U de Mann-Whitney

Fragmento 1 vs. Fragmento 2

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	404,000
W de Wilcoxon	5255,000
Z	-3,645
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 1 vs. Fragmento 3

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	63,000
W de Wilcoxon	441,000
Z	-4,176
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 1 vs. Fragmento 4

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	116,000
W de Wilcoxon	936,000
Z	-4,108
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 1 vs. Fragmento 5

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	530,000
W de Wilcoxon	16820,000
Z	-4,704
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 1 vs. Fragmento 6

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	978,000
W de Wilcoxon	24414,000
Z	-3,502
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 1 vs. Fragmento 7

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	203,000
W de Wilcoxon	7343,000
Z	-5,537
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 2 vs. Fragmento 3

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	864,000
W de Wilcoxon	1242,000
Z	-2,754
Sig. asintót. (bilateral)	,006

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 2 vs. Fragmento 4

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	1608,000
W de Wilcoxon	2428,000
Z	-1,652
Sig. asintót. (bilateral)	,098

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 2 vs. Fragmento 5

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	6620,000
W de Wilcoxon	22910,000
Z	-3,436
Sig. asintót. (bilateral)	,001

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 2 vs. Fragmento 6

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	10308,000
W de Wilcoxon	33744,000
Z	-,370
Sig. asintót. (bilateral)	,711

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 2 vs. Fragmento 7

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	2282,000
W de Wilcoxon	9422,000
Z	-7,713
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 3 vs. Fragmento 4

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	396,000
W de Wilcoxon	774,000
Z	-1,843
Sig. asintót. (bilateral)	,065

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 3 vs. Fragmento 5

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	2070,000
W de Wilcoxon	2448,000
Z	-1,241
Sig. asintót. (bilateral)	,215

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 3 vs. Fragmento 6

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	2178,000
W de Wilcoxon	2556,000
Z	-2,144
Sig. asintót. (bilateral)	,032

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 3 vs. Fragmento 7

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	1008,000
W de Wilcoxon	8148,000
Z	-3,020
Sig. asintót. (bilateral)	,003

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 4 vs. Fragmento 5

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	3260,000
W de Wilcoxon	19550,000
Z	-,934
Sig. asintót. (bilateral)	,350

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 4 vs. Fragmento 6

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	3864,000
W de Wilcoxon	4684,000
Z	-1,060
Sig. asintót. (bilateral)	,289

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 4 vs. Fragmento 7

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	952,000
W de Wilcoxon	8092,000
Z	-5,673
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 5 vs. Fragmento 6

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	16530,000
W de Wilcoxon	32820,000
Z	-2,566
Sig. asintót. (bilateral)	,010

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 5 vs. Fragmento 7

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	5985,000
W de Wilcoxon	13125,000
Z	-6,458
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a. Variable de agrupación: Fragmento

Fragmento 6 vs. Fragmento 7

Estadísticos de contraste[a]

	APAR
U de Mann-Whitney	8148,000
W de Wilcoxon	15288,000
Z	-5,546
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a. Variable de agrupación: Fragmento

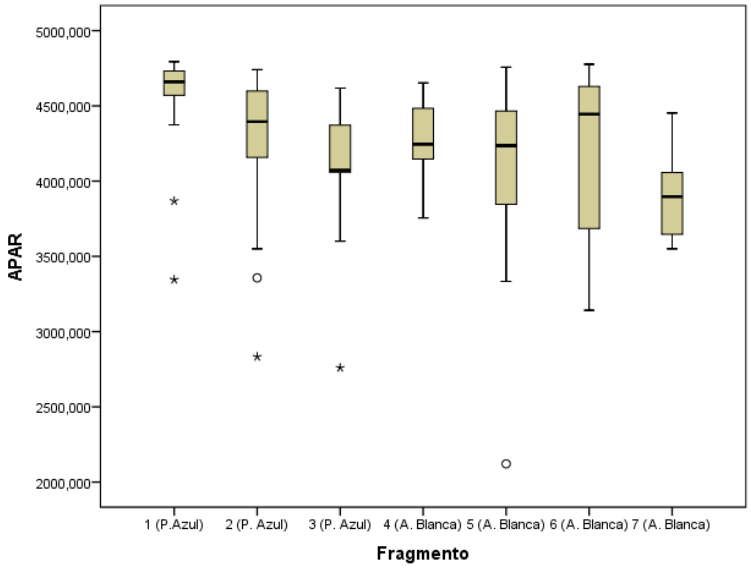


Figura 9. APAR (Wh/m2) por relicto de Bosque fragmentado

7.5. Eficiencia en el uso de la radiación y productividad primaria neta foliar

La eficiencia en el uso de la radiación, se entiende como la capacidad de fijación de CO_2 por unidad de flujo de fotones fotosintéticos, es decir, la producción de materia seca por unidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida (Sinclair & Muchow, 1999; Clark, y otros, 2001a); a pesar de la naturaleza empírica de la EUR y la gran cantidad de fuentes de variación a las que está sujeta, es sin lugar a dudas un importante parámetro ecofisiológico que permite el análisis del crecimiento vegetal (De la Casa, *et al.* 2011).

Para los valores de EUR obtenidos de las observaciones a *Abutilon petiolare* Kunth, *Acacia farnesiana* (L.) Willd, *Astronium graveolens* Jacq., *Cordia dentata* Poir., *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp.,y, *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth, el estadístico de Shapiro-Wilk señala normalidad en la distribución de los mismos, adicionalmente, el test de Levene muestra homogeneidad de varianzas. Se aplica el análisis de varianza ANOVA, el cual registra diferencias significativas de acuerdo a la especie (Tabla 13).

Tabla 13. EUR: Análisis de Varianza

EUR (g/MJ)

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	,419	5	,084	4,017	,006
Intra-grupos	,646	31	,021		
Total	1,065	36			

Las especies monitoreadas poseen valores de EUR desde 0.05 hasta 0.69 g/MJ, sin que existan rangos claramente definidos por taxón; sin embargo, *Acacia farnesiana, Pithecellobium dulce* y *Astronium graveolens* registran valores de 0.36 g/MJ, 0.35 g/MJ y 0.34 g/MJ respectivamente. En contraste, las especies *Abutilon petiolare* y *Gliricia sepium* registran valores de 0.07 y 0.12 g/MJ respectivamente, exponen un rango de distribución fuertemente comprimido y, se presume una menor eficiencia en el uso energético (Figura 10).

El test de Tukey señala diferencias estadísticamente significativas en el comportamiento de *Abutilon petiolare* y *Gliricia sepium* frente a *Acacia farnesiana,* siendo más pronunciada en *A. petiolare* de acuerdo al valor del nivel de significancia. Las especies *A. farnesiana, A. graveolens, C. dentata* y *P. dulce* muestran un comportamiento aproximadamente similar.

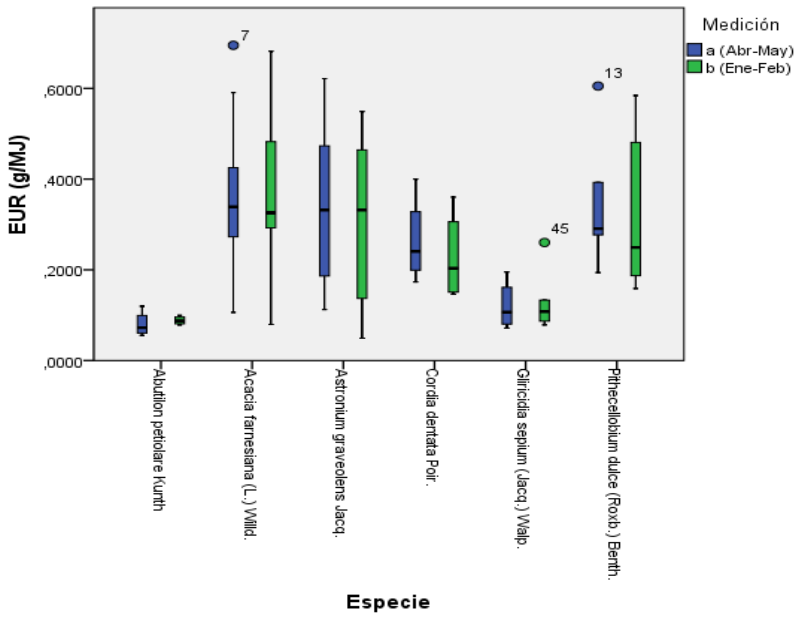


Figura 10. Eficiencia en el uso de la radiación (g/MJ) por especie

Entonces, pare este estudio se sugiere la existencia de grupos de especies de acuerdo al comportamiento frente a la eficiencia en el uso de la radiación independiente de la época evaluada; el primero, conformado por *A. farnesiana* y *P. dulce* corresponde a las especies con alta eficiencia; el segundo, constituido por *A. graveolens* y *C. dentata* expresan una eficiencia media, finalmente, existe un tercer grupo de baja eficiencia conformado por *A. petiolare* y *G. sepium.*

De acuerdo al análisis estadísticos es posible afirmar que las diferencias aquí registradas, son resultado de los rasgos fisiológicos particulares para cada taxón, pues a pesar de la alta dispersión registrada en especies como *A. farnesiana* y *A. graveolens* no existen diferencias significativas intra-grupo, por otro lado, el test de Levene concita la idea de factores ambientales con incidencia uniforme en las especies observadas.

Estimar la Producción Primaria Neta (PPN) parte de asumir que la productividad en un área e intervalo de tiempo definido, está directamente relacionado con la radiación

fotosintéticamente activa absorbida por las plantas y la eficiencia con que la energía química es usada en la producción de materia seca, esta eficiencia como elemento de cálculo es conveniente pero arbitraria (Monteith, 1972), es decir, que ante la falta de conocimiento detallado puede ser un elemento de cálculo constante abstraído de la literatura.

Así, se han procesado dos tipos de productividad primaria: la Productividad Primaria Neta Foliar (PNN foliar) donde el promedio de la EUR por especie arroja el valor de 0.28 g/MJ para el primer periodo y de 0,27 g/MJ para el segundo, como $EUR_{(foliar)}$ para los siete fragmentos de bosque y, representa únicamente la capacidad productiva del dosel y, la Productividad Primaria Neta global (PNN global) donde el valor de EUR ha sido tomado de las estimaciones de Monteith (1972), quien considera que la materia seca total (aérea y subterránea) para coberturas tropicales es de 1.5 g/MJ.

El análisis estadístico permite rechazar las hipótesis de normalidad y homocedasticidad ($p<0,05$); a partir del test Kruskal-Wallis, se comprueba la existencia de diferencias significativas en la PPN foliar y global respecto al fragmento boscoso.

La PPN foliar muestra un comportamiento análogo a la PPN global, en la que gráficamente se percibe correlación entre los fragmentos 3 a 5 y, los fragmentos 2 y 6, a la vez, que se identifica disparidad en la tendencia de los fragmentos 1 y 7 con sus homólogos.

La $PPN_{(foliar)}$, expresa valores mínimos de 2.16 g/m^2/mes (fragmento 5) y máximos de 4.89 g/m^2/mes (fragmento 1). Se destaca por su elevada productividad el fragmento 1 (4.75 g/m^2/mes); mientras los fragmentos 2 (4.48 g/m^2/mes), 3 (4.15 g/m^2/mes), 4 (4.33 g/m^2/mes) y 5 (4.32 g/m^2/mes) y 6 (4,53 g/m^2/mes) podrían definirse como un grupo de

mediana productividad. En contraste, el fragmento 7 (3.97 g/m^2/mes) expresa los valores más bajos (Figura 11).

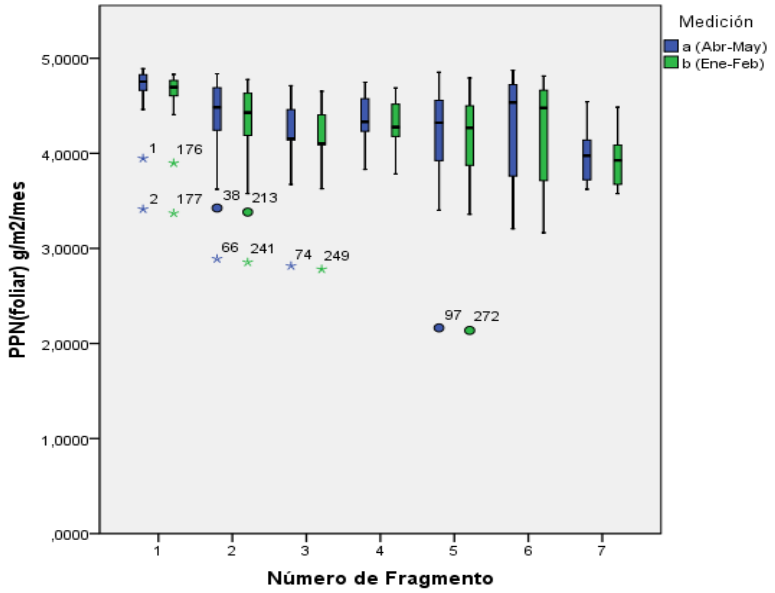


Figura 11. Producción Primaria Neta Foliar por fragmento de bosque

Con respecto a la variación de los resultados obtenidos en los dos periodos de observación, se encuentra un comportamiento variable atribuible a las condiciones climáticas en las que la temperatura, precipitación y humedad relativa inciden en la eficiencia del uso de la radiación y la productividad, encontrándose variación y disminución en el periodo 2 (Enero-Febrero) caracterizado por baja precipitación y alta temperatura frente al periodo 1 evaluado (Abril-Mayo) durante el cual se favorece la asimilación de energía lumínica para la producción foliar.

Para la Producción Primaria Global se observan valores desde 11.45 g/m^2/mes (fragmento 5) hasta 25.79 g/m^2/mes (fragmento 6); gráficamente se observa la existencia de grupos que siguen el mismo patrón registrado para la PPNfoliar, donde una alta productividad en el área de este estudio se asocia al fragmento 1 (25.16 g/m^2/mes), se distringuen con

productividad media los fragmentos 2 (23.73 g/m^2/mes), 3 (21.98 g/m^2/mes), 4 (22.92 g/m^2/mes), 5 (22.67 g/m^2/mes) y 6 (24.00 g/m^2/mes), mientras que la menor productividad ocurre en el fragmento 7 (21.04 g/m^2/mes) (Figura 12).

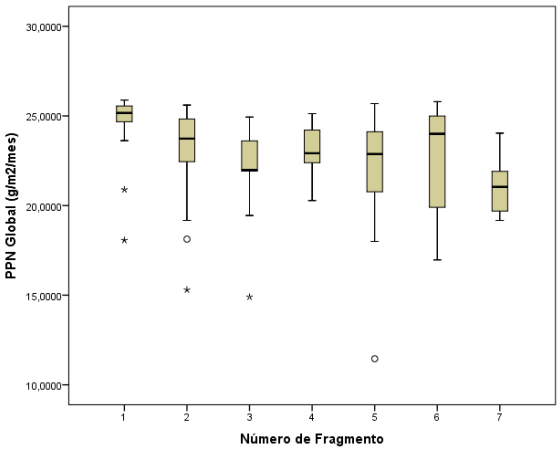


Figura 12. Producción Primaria Neta Total por fragmento de bosque

Al ejecutar el test U de Mann-Whitney acompañado de la corrección de Bonferroni para 21 comparaciones, donde el a nivel crítico es 0.002 (Tabla 14), se ratifica la percepción de los fragmentos 1 y 7 como grupos diferenciales. El fragmento 1 es estadísticamente disímil de los fragmentos 2, 5 y 7; mientras el fragmento 7 es significativamente diferente de los fragmentos 1 y 2. En este contexto, podría afirmarse la existencia de PPN foliar y global media-alta (fragmento 1-6) y baja (fragmento 7) en la zona de estudio.

Existen escenas que merecen ser profundizadas, la primera de ellas ocurre en el fragmento 1 donde se concentra la mayor PPN foliar y global, se registra baja dispersión en los datos (3.41 a 4.89 en PPN_{foliar} y 18.06 a 25.88 en PPN_{global}), a la vez que gran cercanía entre el rango intercuartílico y los limites superior e inferior, este comportamiento puede estar asociado a una masa boscosa densa, coetánea y vigorosa.

El segundo escenario ocurre en el fragmento de bosque 6, en el que hay un aporte importante en la PPN foliar y global (superado solo por el fragmento 1), existe una alta dispersión de datos (3.20 a 4.87 en PPN_{foliar} y 16.96 a 25.79 en PPN_{global}) pero el límite superior es cercano al rango intercuartílico, en este contexto se consiente la idea de una masa boscosa disetánea probablemente dispersa, una estructura más completa que en el fragmento 1, pero altamente vigorosa.

Existe un tercer escenario en el cual hay una baja PPN foliar y global que estarían en capacidad de aumentar en el futuro de acuerdo al comportamiento del límite superior (Límite superior >Límite inferior), estas características pueden asociadas a una masa boscosa disetánea dispersa y poco vigorosa, que habla de un bajo estado de conservación en el fragmento 7. Finalmente, se determina que la PPN foliar para este estudio corresponde al 15,89% de la PPN global, indistintamente en cada fragmento de bosque.

Tabla 14. PPN: Test U de Mann-Whitney

Fragmento 1 vs. Fragmento 2

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	202,000	202,000
W de Wilcoxon	1427,000	1427,000
Z	-3,381	-3,381
Sig. asintót. (bilateral)	,001	,001

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

Fragmento 1 vs. Fragmento 3

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	21,000	21,000
W de Wilcoxon	66,000	66,000
Z	-3,088	-3,088
Sig. asintót. (bilateral)	,002	,002
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	,001[b]	,001[b]

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

b. No corregidos para los empates.

Fragmento 1 vs. Fragmento 4

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	29,000	29,000
W de Wilcoxon	84,000	84,000
Z	-2,926	-2,926
Sig. asintót. (bilateral)	,003	,003
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	,003[b]	,003[b]

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

b. No corregidos para los empates.

Fragmento 1 vs. Fragmento 5

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	106,000	106,000
W de Wilcoxon	772,000	772,000
Z	-4,000	-4,000
Sig. asintót. (bilateral)	,000	,000

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

Fragmento 1 vs. Fragmento 6

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	163,000	163,000
W de Wilcoxon	829,000	829,000
Z	-2,954	-2,954
Sig. asintót. (bilateral)	,003	,003

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

Fragmento 1 vs. Fragmento 7

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	29,000	29,000
W de Wilcoxon	182,000	182,000
Z	-4,094	-4,094
Sig. asintót. (bilateral)	,000	,000
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	,000[b]	,000[b]

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

b. No corregidos para los empates.

Fragmento 2 vs. Fragmento 3

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	144,000	144,000
W de Wilcoxon	189,000	189,000
Z	-1,643	-1,643
Sig. asintót. (bilateral)	,100	,100

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

Fragmento 2 vs. Fragmento 4

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	201,000	201,000
W de Wilcoxon	256,000	256,000
Z	-,889	-,889
Sig. asintót. (bilateral)	,374	,374

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

Fragmento 2 vs. Fragmento 5

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	662,000	662,000
W de Wilcoxon	1328,000	1328,000
Z	-1,957	-1,957
Sig. asintót. (bilateral)	,050	,050

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

Fragmento 2 vs. Fragmento 6

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	859,000	859,000
W de Wilcoxon	1525,000	1525,000
Z	-,205	-,205
Sig. asintót. (bilateral)	,838	,838

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

Fragmento 2 vs. Fragmento 7

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	163,000	163,000
W de Wilcoxon	316,000	316,000
Z	-3,717	-3,717
Sig. asintót. (bilateral)	,000	,000

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

Fragmento 3 vs. Fragmento 4

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	33,000	33,000
W de Wilcoxon	78,000	78,000
Z	-,980	-,980
Sig. asintót. (bilateral)	,327	,327
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	,356[b]	,356[b]

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

b. No corregidos para los empates.

Fragmento 3 vs. Fragmento 5

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	138,000	138,000
W de Wilcoxon	183,000	183,000
Z	-,681	-,681
Sig. asintót. (bilateral)	,496	,496
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	,511[b]	,511[b]

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

b. No corregidos para los empates.

Fragmento 3 vs. Fragmento 6

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	121,000	121,000
W de Wilcoxon	166,000	166,000
Z	-1,163	-1,163
Sig. asintót. (bilateral)	,245	,245
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	,255[b]	,255[b]

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

b. No corregidos para los empates.

Fragmento 3 vs. Fragmento 7

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	48,000	48,000
W de Wilcoxon	201,000	201,000
Z	-1,536	-1,536
Sig. asintót. (bilateral)	,125	,125
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	,133[b]	,133[b]

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

b. No corregidos para los empates.

Fragmento 4 vs. Fragmento 5

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	163,000	163,000
W de Wilcoxon	829,000	829,000
Z	-,453	-,453
Sig. asintót. (bilateral)	,651	,651
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	,665[b]	,665[b]

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

b. No corregidos para los empates.

Fragmento 4 vs. Fragmento 6

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	161,000	161,000
W de Wilcoxon	216,000	216,000
Z	-,506	-,506
Sig. asintót. (bilateral)	,613	,613
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	,627[b]	,627[b]

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

b. No corregidos para los empates.

Fragmento 4 vs. Fragmento 7

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	34,000	34,000
W de Wilcoxon	187,000	187,000
Z	-2,561	-2,561
Sig. asintót. (bilateral)	,010	,010
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	,009[b]	,009[b]

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

b. No corregidos para los empates.

Fragmento 5 vs. Fragmento 6

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	551,000	551,000
W de Wilcoxon	1217,000	1217,000
Z	-1,092	-1,092
Sig. asintót. (bilateral)	,275	,275

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

Fragmento 5 vs. Fragmento 7

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	171,000	171,000
W de Wilcoxon	324,000	324,000
Z	-2,572	-2,572
Sig. asintót. (bilateral)	,010	,010

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

Fragmento 6 vs. Fragmento 7

Estadísticos de contraste[a]

	PPN Foliar (g/m2/mes)	PPN Global (g/m2/mes)
U de Mann-Whitney	194,000	194,000
W de Wilcoxon	347,000	347,000
Z	-2,134	-2,134
Sig. asintót. (bilateral)	,033	,033

a. Variable de agrupación: Número de Fragmento

8. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

8.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Según López, P. (2012) el régimen de precipitación y la humedad relativa inciden en los valores del NDVI obtenidos de imágenes satelitales, de manera tal que con precipitaciones bajas los valores de NDVI disminuyen; para este estudio, de julio del 2013 a Septiembre de 2014 se observa la misma tendencia en el comportamiento del NDVI, con disminución significativa en enero y febrero de 2015 asociado al fenómeno del niño con altas temperaturas, sin embargo en noviembre de 2016 se identifica un aumento en el índice para el rango de 0.8-0.9 favorecido por las precipitaciones.

Asociado a lo anterior, considerando la distribución del índice obtenido en la serie temporal para el mes de julio en 2013, 2014, y 2015, se obtienen rangos de valores más diferenciados en 2013 (-0,49 a 0,84) que disminuyen significativamente en 2014 (-0,65 a 0,85) demostrando el comportamiento de las coberturas según las condiciones climáticas, a saberse que las precipitaciones para julio de 2013 fueron mayores con respecto a las del 2014, y donde en 2015 se encuentra una mayor temperatura que incide en la vigorosidad de la cobertura con valores bajos para el índice que el obtenido en los dos años anteriores.

El comportamiento de los datos puede estar influenciado por el comportamiento microclimático en estos periodos y, la distribución de las precipitaciones con influencia del periodo de transición hacia el fenómeno del niño, al igual que la humedad relativa para el mes de enero del 78% y una precipitación promedio de 5 mm y 282 horas de brillo solar al mes siendo la más alta del año (IDEAM, 2014) donde la humedad es un elemento

destacado en la reflectividad de longitudes de onda largas (infrarrojo medio) (Belda, et al., 1999).

Existe una altísima dispersión en los datos que le confiere un comportamiento libre a las curvas de tendencia tanto en el análisis de NDVI a nivel global como por vereda, en este sentido, Palestina, *et al.*(2015) advierte que los valores de reflectancia obtenida de los datos Landsat es dependiente de la complejidad estructural del dosel, la expresión métrica de los atributos estructurales tales como altura, DAP, diámetro de la copa y densidad de los individuos, así como el tipo de bosque a evaluar y las especies que lo componen.

La Alcaldía Municipal de Girardot (2000) registra la presencia de este tipo de bosque en condiciones primarias y segundarias, principalmente en la cordillera Alonso Vera que recorre todo el municipio y la loma Figueroa ubicada la vereda Agua Blanca; adicionalmente, ha identificado 53 especies con la capacidad de dominar el dosel por su habito arbóreo entre las que se encuentran Algarrobo (*Hymenaea* spp.), Acacia (*Acacia glomerosa*) y Guayacan (*Bulnesia carrapo*); y 9 especies con dominancia del estrato arbustivo entre las que destaca Lulo de perro (*Solanum mammosum*), Mosquero (*Croton leptostachyus*), Uña de gato (*Machaerium* sp.) e Higuerilla (*Ricinus communis*), sin embargo, se carece de estudios que evalúen la composición y estructura del bosque seco tropical en este municipio.

Entonces, es posible que el arreglo estructural sea un factor importante en la dispersión de los datos en las coberturas vegetales heterogéneas como el bosque fragmentado y herbazal denso, a la vez que el estado fenológico puede tener incidencia en los valores de NDVI asociados a las coberturas más homogéneas como pasto enmalezado y pasto limpio, sin

embargo, existe gran incertidumbre respecto a la complejidad estructural y fenológica en las áreas de estudio.

Autores como Paz-Pellat, *et al* (2008) y Liras, *et al* (2010), indican al suelo como un factor generalmente excluido de los modelos de interpretación espectral de la vegetación pero con una gran influencia en la reflectancia total; incluso Colwell (1974) explica que áreas con cobertura de hierbas en proporciones equiparables pueden mostrar reflectancias diferentes debido al tono del suelo (los suelo claros son más reflectivos que los suelos oscuros); entonces la heterogeneidad en la composición del suelo puede generar distorsión en los datos derivados de áreas con reducida cobertura vegetal.

El área de estudio han sido cartografiadas dos unidades edáficas, existe una clara dominancia de la consociación *Entic Haplustolls* (Orden Molisol), mientras que la asociación *Typic Haplusterts* (Orden Vertisol) se expresa únicamente en una franja, que si bien tiene incidencia en ambas veredas ocupa un área mayor en Pozo Azul (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, s.f.). Acorde a los perfiles modales, el horizonte superficial muestra color en húmedo negro (10YR2/1) para la unidad de orden Molisol y pardo grisáceo oscuro (2,5YR4/2) para la unidad del orden Vertisol (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2000). Así, se desestima el efecto del suelo en la variabilidad registrada para los datos de NDVI.

Por otro lado, el análisis global frente al análisis por vereda muestra resultados divergentes respecto a la homogeneidad de varianzas, evidenciando que la modificación en la composición y estructura vegetal ocurre en diferentes magnitudes en cada vereda, esta variación también es perceptible a través de los tipos de cobertura identificados; mientras

en Pozo Azul se registra bosque fragmentado, herbazal denso y pasto enmalezado en Agua Blanca se observan coberturas adicionales denominadas pasto limpio y tierra desnuda.

Al respecto, la Alcaldía Municipal de Girardot (2000) indica un fuerte proceso de deforestación en el municipio, principalmente en la cordillera Alonso Vera en la que un gran porcentaje del bosque seco tropical secundario ha sido reemplazado por monocultivos de frutales y potreros para el aprovechamiento pecuario; a pesar de ésta fuerte intervención antrópica el NDVI registrado para las coberturas comunes en cada vereda no muestra diferencias significativas.

Finalmente, se advierte que coberturas a las que se asocia heterogeneidad en la composición como el bosque fragmentado y el herbazal denso, expresan valores de NDVI indudablemente superiores frente a las coberturas de las que se presume baja diversidad vegetal, como pasto limpio, pasto enmalezado y tierra desnuda.

Autores como Tucker (1979), Sellers (1985), Soria & Granados (2005), entre otros, indican como umbral critico valores de 0,1 para coberturas herbáceas y 0,5 para vegetación densa, donde 0,7 es un buen estimador de salud y vigorosidad, a las vez que valores inferiores a 0,2 representan áreas de suelo desnudo. Entonces, se atribuye una alta densidad y vigor al bosque fragmentado (0.71 - 0.73) y herbazal denso (0.64- 0.68); vigorosidad intermedia al pasto enmalezado (0.57 – 0.60) y pasto limpio (0.56 – 0.59); por último, una baja capacidad fotosintética en las áreas de tejido urbano discontinuo (0.16-0.26); dichos resultados son compatibles con los presentados por Gómez (2005), Martinuzzi, *et al* (2008), Pau, Guillespie, & Wolkovich (2012) y Dutrieux, *et al* (2015), donde las coberturas heterogéneas en bosques tropicales oscilan entre 0,6 y 0,8.

8.2. Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (APAR)

Las áreas de bosque fragmentado objeto de estudio muestran una amplia dispersión y datos, advirtiendo multiplicidad de factores que interviene en la absorción de radiación. De acuerdo a Gower *et al* (1999), la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida presenta una estrecha relación con el índice de área foliar y la arquitectura del dosel.

En esto, es necesario destacar que el bosque seco tropical colombiano muestra un variado comportamiento morfológico y fisiológico en los que radica su importancia biológica, ecológica y económica, sin embargo, existen características usuales como el dosel rico en especies caducifolias, sotobosque de hoja perenne con tasa fotosintética menor al dosel, reducción de láminas foliares a espinas y tallos fotosintéticos (Pizano & García, 2014; Santiago, *et al.* 2004; Aguilera, Azocar, & Gonzales, 2003; Murphy & Lugo, 1986; Bravo, 2013; Cuatrecasas, 1958).

Es necesario resaltar la alta radiación fotosintéticamente activa (PAR) a la que están expuestos los fragmentos de interés, ésta puede alcanzar valores de 18.55 MJ/m^2, mientras que la absorción de dicha energía (APAR) puede alcanzar los 16,34 MJ/m^2, representando una fracción de absorción del 88,09%. De este comportamiento se puede inferir que la vegetación optimizo el uso de las características fenológicas y/o fisiológicas para hacer más eficiente el acceso y uso de los recursos.

Indudablemente existen marcadas diferencias en la APAR por fragmento, con base en los resultados de este estudio podemos destacar como principales factores de divergencia la densidad de vegetación y el área del fragmento (ha). También se observa que la

intervención antrópica ha influenciado considerablemente la captación de energía solar, pues los fragmentos 4, 5, 6 y 7 ubicados en Agua Blanca (donde se reporta la mayor tasa de deforestación municipal) poseen formas irregulares, alta dispersión en los datos, baja APAR y menor área frente a los fragmentos ubicados en Pozo Azul

Si bien es ineludible que la composición y estado fenológico de los individuos son factores importante en la capacidad de asimilación fotosintética, el análisis estadístico indica que solamente el fragmento 1 con la mayor APAR y menor dispersión en los datos difiere completamente de las demás áreas (el fragmento 7 presenta similitud con el fragmento 3, y el fragmento 5 sólo es disímil de los fragmentos 1 y 2), así, el estado de conservación podría desempeñar un papel clave en la interpretación de los fenómenos registrados.

Clark *et al.* (2001), estima 2,73 GJ/m^2 (2,72 MJ/m^2) como valor de APAR promedio para el bosque tropical siempre verde, este valor es bastante inferior a los obtenidos en el presente estudio y se asocia principalmente a la edad de los individuos evaluados (>60 años), pues conforme aumenta la edad del individuo, aumenta la reflexión de las hojas y se reduce la capacidad de absorción de radiación fotosintéticamente activa (Heuveldop, *et al* 1986). Por otro lado, esta estimación proviene del Amazonas Colombo-Venezolano y, según indica Schuur (2003), la nubosidad de esta zona puede reducir la radiación solar que incide en el dosel.

Por su parte, Field *et al* (1995) asocia valores APAR de 7,2 a 10,8 MJ/m^2 a bosques tropicales, entonces, los valores obtenidos para los fragmentos boscosos de Agua blanca y Pozo Azul se consideran normales y superan ligeramente las estimaciones de este autor.

8.3. Eficiencia en el uso de la radiación (EUR) y productividad primaria neta (PPN)

De acuerdo a Sinclair & Muchow (1999); Scott, *et al.*, (2003) y Quiroz (2010), la capacidad de producción de biomasa aérea por unidad de energía absorbida, se asocia principalmente a la especie y su ruta fotosintética, el intercambio gaseoso y contenido de nutrientes de la hoja, disponibilidad hídrica, la presión de vapor atmosférica, la disponibilidad de nutrientes como el nitrógeno, temperatura y radiación ambiental.

Los resultados del procesamiento estadístico indican que la dispersión en los datos intra-grupos para las especies *Abutilon petiolare* Kunth, *Acacia farnesiana* (L.) Willd, *Astronium graveolens* Jacq., *Cordia dentata* Poir., *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp., *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth., es poco significativa, es decir, la eficiencia en producción de materia seca es un rasgo genético que si bien es limitado por las condiciones ambientales varía muy poco a lo largo de la vida de los individuos, siempre que los eventos no superen el umbral de resistencia del individuo; autores como Sinclair & Muchow (1999), De la Casa, *et al*, (2011) y Jarma, *et al*, (2010) registran este comportamiento para cultivos agrícolas, a la vez que Monteith (1972) lo considera un elemento importante pero arbitrario en la determinación de PPN.

Las especies observadas tienen origen natural en el continente Americano y se consideran nativas, excepto *A. farnesiana* y *G. sepium*, la primera procede del sur de Francia y costas del Mediterraneo, sin embargo, en la actualidad se distribuye ampliamente por el trópico con gran facilidad (Parrota, 1992), gracias a que prospera espontáneamente en ambientes disturbados y posee exitosas estrategias reproductivas (López, *et al*, 2012). La segunda,

tiene distribución natural en México y Centroamérica, pero ha sido introducida con éxito y naturalizada en Suramérica (CATIE, 1991).

A fin de evaluar la incidencia del área foliar, se aplica la metodología propuesta por Casierra-Posada *et al*, (2008) a datos obtenidos de Mahecha, *et al*, (2004) y UDFJC & FAMARENA (2016), obteniendo que para *A. petiolare* se estima un área foliar de 55 cm^2, para *A. farnesiana* 56 cm^2, para *A. graveolens* 412 cm^2, para *C. dentata* 45 cm^2, en *G. sepium* 240 cm^2, y, *P. dulce* 45 cm^2. Frente a la estructura del dosel, los registros cualifican las especies de interés como ovadas a ovadas irregulares (Mahecha, *et al*, 2004); (UDFJC & FAMARENA 2016). Adicionalmente, las referencias literarias confirman el metabolismo fotosintético C3 para cada especie, sin embargo, no existen registros claros respecto a la EUR o características ecofisiológicas específicas para las mismas.

Considerando que los elementos geológicos, atmosféricos y edáficos son aproximadamente iguales en el área de estudio, es factible considerar que factores extrínsecos a las especies, poseen baja incidencia en las diferencias estadísticas registradas para la EUR. En este orden de ideas, se presume como factor determinante el tiempo de asimilación de energía lumínica (en que los estomas permanecen activos), articulado a la susceptibilidad a ligeros cambios en la atmosfera, la estructura de la hoja y el estado sanitario.

En este estudio, el elemento definitivo en el comportamiento implícito de los datos (dispersión, varianza de errores, tendencia) y sus implicaciones para la PPN foliar y global, es la radiación fotosintéticamente activa absorbida (APAR). De acuerdo a Scott, *et al*, (2003), La productividad primaria neta (PPN) de una comunidad vegetal es a menudo relacionada de manera positiva y linealmente con la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por su dosel (APAR).

Así, vale la pena repasar algunas características de ambos elementos. En el fragmento 1 convergen la mayor PPN y APAR, mientras que al fragmento 7 se asocian la menor PPN y APAR, sin embargo, las diferencias significativas no son las mismas para PPN y APAR, mientras en APAR existen diferencias marcadas entre los fragmentos en la PPN estas se desvirtúan y son menos numerosas. Podemos asumir que una homogenización en el comportamiento de los fragmentos boscosos, desde la PPN, consiste en que incluye la idea de bosque como estructura biológica (con composición, estructura y función) donde las particularidades fisiológicas de cada individuo se expresan de acuerdo a condiciones ecológicas; en contraposición, la APAR considera únicamente las posibilidades espectrales de esa estructura biológica, es decir, la idea de bosque se centra en composición y estructura.

Gómez & Gallopín, (1991) estiman una productividad primaria neta 493 a 665 g/m^2/año para bosques tropicales y subtropicales con precipitación media anual inferior a 1000 mm y estado de conservación relativamente bueno, por su parte, Neiff (1996) asocia las áreas de bosque seco en América latina a una productividad anual de materia seca entre 0,5 y 6 ton/ha/año, Clark *et al.* (2001) estima una PPN de entre 1,7 a 11,8 Mg C/ha/año para los bosques secos tropicales. Entonces, los valores de PPN global determinada para los fragmentos de bosque estudiados (en promedio 22.73 g/m2/mes, equivalente a 272.76 g/m^2/año y 3.091 ton/ha/año), se ajustan a las estimaciones registradas en la literatura, sin embargo una revisión particular señala deficiencias en el fragmento 7, por lo que se aconseja incluir el estado de conservación en estudios posteriores.

9. CONCLUSIONES

Las coberturas identificadas muestran propiedades emergentes casi exclusivas, para el objeto de este estudio particularidades espectrales de los elementos que los conforman, que se evidencian en la posibilidad de jerarquizar la vigorosidad y densidad en las coberturas presentes, siendo mayor en áreas boscosas y nula en áreas degradadas (Bosque Fragmentado con pastos y cultivos > Herbazal denso de tierra firme arbolado > Pasto enmalezado > pasto limpio > Tejido Urbano discontinuo)

En los fragmentos de bs-T ubicados en Agua Blanca y Pozo Azul, la absorción de radiación fotosintéticamente activa (APAR) está fuertemente influenciada por la densidad de la vegetación, el área y forma del fragmento y la intervención antrópica. La vegetación densa en parches regulares tiende a interceptar más radiación, mientras que los fragmentos aledaños a asentamientos humanos presentan formas irregulares, con bajo NDVI y APAR.

Los fragmentos de bs-T utilizan de forma óptima la radiación incidente: se estima una fPAR de 88.09%, una productividad foliar promedio de 4.36 g/m^2/mes y global de 22.73 g/m^2/mes. Sin embargo, existen variaciones en cada fragmento atribuibles al área y forma del parche, topografía y distancia del perímetro urbano, siendo altas en el fragmento 1 con 4.63 g/m^2/mes caracterizado por ser un área conservada por la corporación con intervención antrópica baja frente al fragmento 7 con 3.98 g/m^2/mes donde se encuentra una superficie baja, forma irregular que incide en la $PPN_{(foliar)}$ de obtenida en ambos periodos.

La metodología empleada en este estudio, se puede constituir en una línea base para el monitoreo del estado de los recursos veredales e identificación de escenarios estratégicos de intervención, como ocurre en los fragmentos 5 y 6 con PPN(foliar) de 4.21 y 4.27 g/m^2/mes

respectivamente en los que dado a la superficie y forma, se esperaría una vigorosidad mayor pero dado a la intervención antrópica se ha identificado el impacto en estas áreas.

La especie *Acacia farnesiana* (L.) Willd , es una especie representativa en el aporte de productividad al área de estudio, sin embargo autores la reconocen como especie invasora mientras que su origen es incierto y su distribución se reporta natural en áreas como la evaluada, adicionalmente la entidad encargada no la considera una especie invasora, por lo que se recomienda realizar seguimiento al comportamiento fisiológico de la especie en el regional del alto magdalena y su incidencia en la productividad de especies nativas.

La implementación de métodos no destructivos para determinar la eficiencia en el uso de la radiación resulta útil cuando no se tiene la posibilidad de realizar otras aproximaciones, permitiendo caracterizar la productividad de un área. Sin embargo se recomienda integrar un análisis en distintos periodos pluviométricos que permita identificar variaciones bajo distintas condiciones climáticas, así como la implementación de métodos que involucren la medición del intercambio gaseoso mediante técnicas Eddy Covariance o cámaras cerradas IRGAS.

10. BIBLIOGRAFÍA

Aguilera, M., Azocar, A., & Gonzales, E. (2003). *Biodiversidad en Venezuela.* Venezuela: Fundación Polar.

Alcaldía de Girardot- Cundinamarca. (s.f.). *Nuesto municipio: información general*. Recuperado el 09 de Enero de 2016, de Girardot para seguir avanzando: http://girardot-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml

Alcaldía Municipal de Girardot Cundinamarca. (2000). *Acuerdo 029 de 2000.* Girardot.

Alcaraz-Segura, D., Baldi, G., Durante, P., & Garbulsky, M. (2008). Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Ecosistemas, 17 (3)*, 108-117.

Álvarez, R. (1995). *Estadística multivariante y no paramétrica con SPSS: Aplicación a las ciencias de la salud* . Madrid, España: Ediciones Diaz de Santos S.A.

Arcila, C., Valderrama, C., & Chacón, P. (2012). Estado de fragmentación del bosque seco en la cuenca alta del rio Cauca. *Biota Colombiana, 13 (2)*, 86-101.

Ariza, A. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8.* Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Arozarena, A. (20 de 11 de 2016). *Teledetección y sistemas de tratamiento digital imagenes* . Obtenido de Open Course Ware- Universidad Politécnica de Madrid: http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-cartografia-y-

geodesia/contenidos/TEMA_11_FOTOGRAMETRIA_Y_TELEDETECCION/Teledeteccion

Arcgis 10.3 (2013). Manual del Usuario.

Berg, J., Tymoczko, J., & Stryer, L. (2007). *Bioquímica. Sexta Edición.* Barcelona, España: Reverté.

Blanco, J. (2013). *Aplicaciones de modelos ecológicos a la gestión de recursos naturales.* España: OmniaScience.

Bravo, N. (2013). *Analisis de supervivencia, desarrollo y fotosintesis de tres especies forestales en plantaciones jóvenes establecidas en el bosque seco tropical (bs-T), Antioquia, Colombia [Tesis de grado para optar al titulo de Administradora ambiental y de los ReNa]*. Mdellin: Universidad Nacional de Colombia.

Campbell, N., & Reece, J. (2005). *Biología. Séptima edición.* Madrid, España: Editorial Médica Paramericana .

Carrasco-Ríos, L. (2009). Efecto de la radiación ultravioleta-B en plantas. *IDESIA, 27 (3)*, 59-76.

Carreira, J., & Niell, F. (1995). Análisis de componentes principales sobre datos multiespectrales "Landsat-TM" e interpretación de cubiertas vegetales en las sierras de Tejeda y Almijara. *Acta Botánica Malacitana, 20* , 153-164.

CATIE. (1991). *Maderero Negro (Madreado, madrecacao,...): Gliricidia sepium (Jacquin) Kunt ex Walpers, especie de árbol de uso multiple en América Central.* Turrialba, Costarica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza- CATIE.

Cayón, G. (2001). Evolución de la fotosíntesis, transpiración y clorofila durante el desarrollo de la hoja de plátano (Musa AAB Simmonds). *INFOMUSA, 10 (1)*, 12-15.

Chidumayo, E., & Gumdo, E. (2010). *The dry forest and woodlands of Africa: Managing for products and services.* London: Earthscan.

Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial. Segunda Edición.* Madrid, España: Ediciones RIALP.

Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental. Tercera Edición.* Barcelona, España: Ariel S.A.

Clark, D., Brown, S., Kicklighter, D., Chambers, J., Thomlinson, J., Ni, J. (2001). Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications, 11 (2)*, 371-384.

Colwell, J. (1974). Vegetation canopy reflectance. *Remote sensing of enviroment, 3 (3)*, 175-183.

Consejo Municipal de Girardot. (08 de Junio de 2016). Acuerdo N° 04 de 2016 Por medio del cual se adopta el Plan de Desarrollo Girardot para seguir avanzando 2016-2019.

Congalton, R. (1991). A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment, 37*, 35-46.

Cuatrecasas, J. (1958). Aspectos de la vegetación natural de Colombia. *Revista de la acdemia colombiana de ciencias exactas, fisicas y naturales, 10 (40)*, 121-264.

Curtis, H., & Barnes, N. (2000). *Biología. Sexta Edición en Español.* Madrid, España: Editorial Médica Panamericana.

DANE. (30 de Noviembre de 2016). *Perfil Girardot- Cundinamarca.* Obtenido de Boletín Censo General 2005: https://www.dane.gov.co/files/censo2005/perfiles/cundinamarca/girardot.pdf

Di Leo, N., Montico, S., Bonel, B., & Denoia, J. (2007). Estimación de la APAR y la NPP mediante sensoramiento remoto en tres sectores de la Pampa Húmeda, Argentina. *Ciencia, docencia y tecnoligía, 35*, 221-242.

Dutrieux, L., Verbesselt, J, Kooistra, L., & Herold, M. (2015). Monitoring forest cover loss using multiple data streams, a case study of a tropical dry forest in Bolivia. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* , 1-14.

Enoki, A., Castillo, E., & Merlet, H. (1999). *Sistema para el Seguimiento y Análisis de Tierras Mediante Teledetección. Bases Teóricas.* Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentacion (FAO); Pontificia Universidad Católica de Chile.

Espinal, L., & Montenegro, E. E. (1977). *Formaciones vegetales de Colombia* . Bogotá: Instituto Geográfico Agustin Codazzi (IGAC).

Espinosa, C., de la Cruz, M., Luzuriaga, A., & Escudero, A. (2012). Bosques tropicales secos de la región Pacífico Ecuatorial: diversidad, estructura, funcionamiento e implicaciones para la conservación. *Ecosistemas, 21 (1-2)*, 167-179.

Field, C., Randerson, J., & Malmström, C. (1995). Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment, 51(1)*, 74-88.

François, J., Reyes, J., & Pérez, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas, 51*, 53-72.

Gerhardt, K. (1993). Tree seedling development in tropical dry abandoned pasture and secondary forest in Costa Rica. *Journal of Vegetation Science, 4*, 95-102.

Gerhardt, K., & Hytteborn, H. (1992). Natural dynamics and regeneration methods in tropical dry forests: an introduction. *Journal of Vegetation Science, 36 (3)*, 1-4.

Gómez, M. (2005). *Índice de Vegetación en Áreas del Bosque Seco del Noroeste del Perú a Partir de Imagenes Satelitales [Tésis para optar al título de Ingeniero Industrial y de Sistemas]*. Piura, Perú: Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería .

Gower, S., Kucharik, C., & Norman, J. (1999). Direct and Indirect Estimation of Leaf Area Index, fAPAR, and Net Primary Production of Terrestrial Ecosystems . *Remote Sensing on Enviroment, 70* , 29-51.

Hernández, S., Gómez, E., & Rocha, D. (2012). Evaluación del desempeño de la radiación emitida por el sol como sistema de suministro de energía a un pico-satélite "CUBESAT" . *Revista Tecnura, 16 (31)*, 19-32.

Heuveldop, J., Pardo, J., Quirós, S., & Espinosa, L. (1986). *Agroclimatología Tropical* . San José, Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia.

IDEAM. (2010). *eyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000.* Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM. (28 de 11 de 2016). *METODOLOGÍA CORINE LAND COVER*. Obtenido de IDEAM: http://www.cambioclimatico.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-corine-land-cover

Instituto Geográfico Agustin Codazzi. (2000). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca.* Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Gobernación de Cundinamarca.

Instituto Geográfico Agustin Codazzi. (s.f.). *Geoportal: Visor de la subdirección de agrología- SIGA*. Recuperado el 2016 de Enero de 22, de Instituto Geográfico Agustin Codazzi: http://geoportal.igac.gov.co:8888/siga_sig/Agrologia.seam

Instituto Plan Agropecuario. (1 de 11 de 2016). *Monitoreo Satelital de Crecimiento de Pasturas*. Obtenido de Plan Agropecuario:

http://www.planagropecuario.org.uy/Contenido/48/Monitoreo-Satelital-de-crecimiento-de-pasturas/

Kennard, D., Gould, K., Putz, F., Fredericksen, T., & Morales, F. (2002). Effect of disturbance intensity on regeneration mechanisms in a tropical dry forest. *Forest Ecology and Management, 162* , 197-208.

Khurana, E., & Singh, J. (2001). Ecology of seed and seedling growth for conservation and restoration of tropical dry forest : a review. *Environmental Conservation, 28 (1)*, 39-52.

Landis, R., & Koch, G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics, 33 (1)*, 159-174.

Lira, J. (2010). *Tratamiento Digital de Imágenes Multiespectrales. Segunda Edición.* México: Instituto de Geofísica, UNAM.

Liras, E., Cabello, J., Alcaraz, D., & Paruelo, J. (2010). Patrones espaciales del funcionamiento de los ecosistemas: efectos del cambio en la cobertura y el uso del suelo. En E. Liras, *Funcionamiento ecosistémico: controles y patrones espacio-temporales en el SE Ibérico [Tésis doctoral]* (pág. 159). Almería, España: Universidad de Almería.

López, M. (2007). *Lineamientos conceptuales y metodológicos del Sistema de Indicadores Ambientales Amazonia en el amrco del Programa Regional de Monitoreo Ambiental.* Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI).

Mancino, G., Nolè, A., Ripullone, F., & Ferrara, A. (2014). Landsat TM imagery and NDVI differencing to detect vegetation change: assessing natural forest expansion in Basilicata, southern Italy. *iForest, 7*, 75-84.

Martinuzzi, S., Gould, W., Ramos, O., Martinez, A., Calle, P., Pérez-Buitrago, N., y otros. (2008). Mapping tropical dry forest habitats integrating Landsat NDVI, Ikonos imagery, and topographic information in the Caribbean Island of Mona. *Biología tropical, 56 (2)*, 625-639.

Monteith, J. (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Applied Ecology, 9 (3)*, 747-766.

Murphy, P., & Lugo, A. (1986). Ecology of tropical dry forest. *Anual review of ecology and systematics, 17* , 67-88.

Nagendra, H., Rocchini, D., Ghate, R., Sharma, B., & Pareeth, S. (2010). Assessing Plant Diversity in a Dry Tropical Forest: Comparing the Utility of Landsat and Ikonos Satellite Images. *Remote sensing, 2*, 478-496.

Palestina, R., Equihua, M., & Pérez-Maqueo, O. (2015). Influencia de la complejidad estructural del dosel en la reflectancia de datos Landsat TM. *Madera y bosques, 21 (1)*, 63-75.

Parrota, J. (1992). *Acacia farnesiana (L.) Willd. Aroma, huisache.* New Orleans: Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. [Online] Disponible en: http://www.rngr.net/publications/arboles-de-puerto-rico/acacia-farnesiana/.

Paruelo, J. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas, 17 (3)*, 4-22.

Pau, S., Guillespie, T., & Wolkovich, E. (2012). Dissecting NDVI–species richness relationships in Hawaiian dry forests. *Journal of Biogeography, 39*, 1678–1686.

Paz-Pellat, F., Bolaños-González, M., Palacios-Vélez, E., Palacios-Sánchez, L., Martínez-Menes, M., & Huete, A. (2008). Optimización del índice espectral de la vegetación NDVIcp. *Agrociencia, 42 (8)*, 925-937.

Pizano, C., & García, H. E. (2014). *El Bosque Seco Tropical en Colombia* . Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH).

Poveda, G., & Salazar, L. (2004). Annual and interannual (ENSO) variability of spatial scaling properties of a vegetation index (NDVI) in Amazonia. *Remote Sensing of Environment, 93*, 391-401.

Quiceno, N., & Tangarife, G. (2013). *ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE BIOMASA, FIJACIÓN DE CARBONO Y SERVICIOS AMBIENTALES, EN UN ÁREA DE BOSQUE PRIMARIO EN EL RESGUARDO INDÍGENA PIAPOCO CHIGUIRO-CHATARE DE BARRANCOMINAS, DEPARTAMENTO DEL GUAINÍA [Tesis al titulo Magister en Desarollo Sostenib.* Manizales, colombia: Universidad de Manizales, Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Quinto, H., Ramos, Y., & Abadía, D. (2007). Cuantificación de la Caída de Hojarasca como Medida de la Productividad Primaria Neta en un bosque Pluvial Tropical en

salero, Chocó, Colombia. *Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó, 26*, 28-41.

Salas, J., & Infante, A. (2006). Producción Primaria Neta Aérea en Algunos Ecosistémas y Estimaciones de Biomasa en Plantaciones Forestales. *Revista Forestal Latinoamericana, 40*, 47-70.

Santiago, L., Kitajima, K., Wright, S., & Mulkey, S. (2004). Coordinated changes in photosynthesis, water relations and leaf nutritional traits of canopy trees along a precipitation gradient in lowland tropical forest. *Oecologia, 139* , 495-502.

Schuur, E. (2003). Productivity and global climate revisited: the sensitivity of tropical forest growth to precipitation. *Ecology, 84 (5)*, 1165-1170.

Secretaria de Planeación de Cundinamarca. (2007). Mapa de capacidad de uso de la Tierra. Escala 1:350.000. Cundinamarca, República de Colombia: Gobernación de Cundinamarca.

Soria, J., & Granados, R. (2005). Relación entre los índices de vegetación obtenidos de los sensores AVHRR del satélite NOAA y TM del Landsat . *Ciencias de la tierra y de la atmosféra, 12 (2)*, 167-174.

Soria, J., & Granados, R. (2005). Relación entre los índices de vegetación obtenidos de los sensores AVHRR del satélite NOAA y TM del Landsat. *ciencias de la tierra y de la atnmosfera, 12 (2)*, 167-174.

Swaine, M. (1992). Characteristics of dry forest in West Africa and the influence of fire. *Journal of Vegetation Science, 3*, 65-74.

Tucker, C. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment, 8*, 125-150.

United States Geological Survey. (20 de Noviembre de 2015). *Landsat Missions*. Recuperado el 08 de Enero de 2016, de Landsat 8: History: http://landsat.usgs.gov//about_ldcm.php

United States Geological Survey. (23 de Noviembreq de 2015). *Landsat Missions*. Recuperado el 05 de Enero de 2016, de Landsat Missions: imagingthe earth since 1972: http://landsat.usgs.gov//about_mission_history.php

United States Geological Survey. (20 de 11 de 2016). *Frequently Asked Questions about the Landsat Missions*. Obtenido de Landsat Missions: http://landsat.usgs.gov/L8_band_combos.php