

Análisis de Fragmentación del Bosque Seco Tropical de la Baja Guajira

Angie Tatiana Pérez

Juan Andrés Gutierrez

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Línea de Investigación

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2022

Resumen

La Guajira es uno de los departamentos del caribe que concentra un gran potencial de bosque seco tropical, ocupando el 3,2% de este ecosistema en todo el país, sin embargo su poca representatividad lo convierte en uno de los ecosistemas más amenazados en Colombia. En esta zona, la actividad agropecuaria, la cacería, la extracción de productos forestales no maderables y la tala selectiva, han sido uno de los principales factores de degradación.

En este estudio se logra calcular la fragmentación que ha sufrido este ecosistema, tomando como base aquellas coberturas propias de este bioma, el cual se encuentra el bosque, vegetación secundaria y arbustales. Los cálculos de cobertura, tamaño y selección de los fragmentos se llevaron a cabo por análisis de imágenes recopiladas en los primeros tres meses del año 2021 del satélite Landsat 8OLI, el cual se generó un compuesto mediana con cuatro bandas (roja, NIR, SWIR1, SWIR2) para lograr una mayor interpretación y clasificación de las coberturas de interés. Se calculó el grado de fragmentación, la continuidad espacial e índice de diversidad de forma de Patton.

Los resultados obtenidos indican que aquellas zonas donde existen mayor información de píxeles se logra una clara diferenciación entre las diferentes clases de coberturas, lo que reduce la variabilidad que se presentan en los bosques estacionarios. Para el caso del cálculo de fragmentación se indica que la clase o cobertura de arbustal es la que menor fragmentación presenta respecto a la vegetación secundaria y bosque natural y se ve incrementada en más de cinco puntos.

Palabras clave: Fragmentación, Bosque seco tropical, Baja Guajira, coempuesto mediana, procesamiento digital de imágenes, enmascaramiento, combinación de bandas.

Abstract

La Guajira is one of the Caribbean departments that concentrates a great potential of tropical dry forest, occupying 3.2% of this ecosystem throughout the country, however its low representativeness makes it one of the most threatened ecosystems in Colombia. In this area, agricultural activity, hunting, the extraction of non-timber forest products and selective logging have been one of the main factors of degradation.

In this study, it is possible to calculate the fragmentation that this ecosystem has suffered, based on the coverage of this biome, which includes the forest, secondary vegetation and shrubs. The calculations of coverage, size and selection of the fragments were carried out by analysis of images collected in the first three months of the year 2021 from the Landsat 8OLI satellite, which generated a median composite with four bands (red, NIR, SWIR1, SWIR2) to achieve a better interpretation and classification of the hedges of interest. The degree of fragmentation, spatial continuity and Patton's shape diversity index were calculated.

The results obtained indicate that those areas where there is more pixel information, a clear differentiation between the different classes of coverage is achieved, which reduces the variability that occurs in stationary forests. In the case of the fragmentation calculation, it is indicated that the bush class or cover is the one with the least fragmentation with respect to secondary vegetation and natural forest and is increased by more than five points.

Keywords: Fragmentation, Tropical dry forest, Baja Guajira, median composite, digital image processing, masking, band combination.

Contenido

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN.....	9
1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA.....	9
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	11
1.3 JUSTIFICACIÓN	11
2. OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3. ANTECEDENTES.....	14
3.1 BOSQUE SECO TROPICAL	14
3.2 CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITE	15
3.3 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.....	16
3.4 ANÁLISIS DE FRAGMENTACIÓN.....	17
4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL	19
5. REFERENTE TEÓRICO.....	21
5.1 COBERTURA DE LA TIERRA	21
5.2 ECOSISTEMA	22
5.3 PAISAJE	22
5.4 ECOLOGÍA DEL PAISAJE	23
5.5 BOSQUE SECO TROPICAL	24
5.6 CORREDOR BIOLÓGICO.....	25
5.7 ÁREAS PRIORITARIAS DE CONSERVACIÓN.....	25
5.8 FRAGMENTACIÓN	26
5.9 CLASIFICACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES SATELITALES	26
5.10 ENMASCARAMIENTO DE NUBES Y SOMBRAS DE NUBES.....	27
5.11 APILAMIENTO DE LAS BANDAS	28
5.12 OBTENCIÓN DE LOS COMPUESTOS DE IMÁGENES	28
6. METODOLOGÍA.....	30
6.1 ÁREA DE ESTUDIO	30
6.2 ENFOQUE METODOLÓGICO	31

6.3	TIPO DE ESTUDIO	32
6.4	PROCEDIMIENTO.....	32
6.4.1	<i>Identificación de la zona potencial de bosque seco tropical (BsT) en la baja Guajira</i> 32	
6.4.2	<i>Selección y descarga de imágenes de satélite</i>	33
6.4.3	<i>Pre-procesamiento</i>	35
6.4.4	<i>Procesamiento</i>	37
6.4.5	<i>Edición y depuración de la capa de coberuras</i>	41
6.4.6	<i>Análisis de fragmentación</i>	42
6.4.7	<i>Índice de fragmentación</i>	44
7.	RESULTADOS	45
7.1	PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES	45
7.2	ANÁLISIS DE FRAGMENTACIÓN.....	47
7.2.1	<i>Distancia euclidiana al vecino más cercano o “Euclidean Nearest-Neighbor Distance” (ENN)</i>	48
7.2.2	<i>Área media del parche o “Mean patch area” (AREA_MN)</i>	49
7.2.3	<i>Número de teselas o “Patch Number” (NP)</i>	49
7.2.4	<i>Compacidad media de los fragmentos o “Mean Compaction” (GYRATE_MN)</i>	50
7.2.5	<i>Índice de forma medio o “Mean Shape Index” (SHAPE_MN)</i>	50
7.2.6	<i>Índice de dimensión fractal o “Fractal Dimension Index” (FRAC)</i>	51
7.3	ÍNDICE DE FRAGMENTACIÓN.....	51
8.	CONCLUSIONES	53
9.	RECOMENDACIONES	55
10.	REFERENCIAS	56

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1	Regiones geográficas de La Guajira..... 30
Figura 2	Mapa de bosque seco tropical en La Guajira..... 33
Figura 3	Correccion atmoferica y radiométrica de las imagenes..... 34
Figura 4	Comparación de la imagen sin enmascarar y enmascarada..... 36
Figura 5	Proceso para generación del Compuesto Mediana de la Baja Guajira 38
Figura 6	Clasificación de coberturas en la baja Guajira 40
Figura 7	Edición de la imagen 41
Figura 8	Compuesto mediana en la Baja Guajira 45
Figura 9	Mapa de coberturas asociadas al bosque seco tropical en la baja Guajira 46

Lista de tablas

	Pág.
<i>Tabla 1 Marco referencial</i>	19
<i>Tabla 2 Índices de paisaje</i>	23
<i>Tabla 3 Imágenes satelitales utilizadas</i>	35
<i>Tabla 4 Clasificación de coberturas</i>	39
<i>Tabla 5 Índices de fragmentación del bosque seco tropical en la baja Guajira</i>	48
<i>Tabla 6 Índice de fragmentación para el bosque seco tropical de la baja Guajira</i>	51

1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

1.1 Descripción del área problemática

La fragmentación es un proceso dinámico en el cual, un ecosistema se ve reducido a teselas o parches más pequeños que el ecosistema original, generando islas en una matriz diferente a la inicial, causando mayor aislamiento y disminuyendo la conectividad (Wilcolve *et al.*, 1986; Saunders *et al.*, 1991; Didham, 1997 & Arroyo-Rodriguez & Mandujano, 2009; citados por (Galvan-Guevara, Ballut-Dajut, & De La Ossa-V, 2015). El bosque seco tropical (Bs-T) se encuentra en zonas donde la altitud está entre los 0 y los 1.000 metros sobre el nivel del mar y con unos periodos de sequía muy marcados, -de hasta tres meses-, con precipitaciones anuales inferiores a 100 mm (Pizano *et al.*, 2016), representando el 42% de los bosques tropicales del mundo (Quesada, y otros, 2009) localizados principalmente en la costa caribe colombiana y venezolana, y la región noroeste de Brasil (Pennington, Lavin, & Oliveira-Filho, 2009) citados por (Vela-Vargas & Pérez-Torres, 2012). Este ecosistema se caracteriza por ser uno de los ecosistemas más amenazados y menos estudiados del mundo (Barquet, 2016).

En Colombia el bosque seco tropical se encuentra en un estado crítico de fragmentación y degradación, ocasionado principalmente por actividades de origen antrópico, donde el remanente de esta cobertura es del 3% de su estructura original (Pizano & García, 2014). Actualmente la presión sobre estos ecosistemas está dada por el ecoturismo mal manejado, la cacería, la

extracción de productos forestales no maderables, la tala selectiva, el pastoreo de ganado dentro del bosque, la tala intensiva, la agricultura, la ganadería, la infraestructura humana, los hidrocarburos, los incendios, la minería y la erosión (Pizano, y otros, 2016). Es así que una de las causas más impactante sobre la fragmentación a finales del siglo XIX fue la introducción de la raza bovina cebú debido a que esta actividad se concentró en las zonas de bosque seco tropical del Caribe y valles interandinos (Otero, Mosquera, Silva, & Guzmán, 2006).

Pizano y otros, (2016), identificaron seis áreas donde se distribuye el bosque seco tropical en el país: i) región Norandina, ii) región del valle del Cauca, iii) región del valle del Patía, iv) región del valle del río Magdalena, v) región Llanos y, vi) región Caribe, donde esta última, contiene la mayor cantidad de remanentes de este ecosistema, con el 49,69% de las áreas de bosque seco tropical identificadas en el país.

El departamento de La Guajira posee una gran extensión de áreas de bosque seco tropical siendo el 3,2% de este ecosistema en todo el país, donde el promedio de ocupación por departamento es de 1,88% (Pizano & García, 2014), distribuidas principalmente en las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta, la Serranía del Perijá – Montes de Oca, el valle del río Cesar y La Macuira.

La concentración principal del bosque seco tropical se localiza en la región biogeográfica Baja Guajira, la cual es clave en la conectividad de la riqueza del Caribe colombiano, los bosques en los llanos orientales, los bosques amazónicos y es lugar de tránsito de aves migratorias que se desplazan desde Norteamérica (Báez & Trujillo, 2014).

La presión antrópica sobre este ecosistema y su larga historia de transformación ha generado que actualmente sea uno de los ecosistemas más fragmentados en el país, donde no existen muchos estudios de análisis de fragmentación y los estudios que se han desarrollado en la Baja Guajira corresponden a la disponibilidad de hábitat total y no específicamente del bosque seco tropical.

1.2 Formulación del problema

¿Cuál es el impacto por la fragmentación del bosque seco tropical en la Baja Guajira?

La reducción del ecosistema de bosque seco tropical, trae consigo una pérdida acelerada no solo de especies del reino vegetal y animal, sino también del componente físico como el suelo y el agua, lo cual afecta drásticamente las condiciones microclimáticas al interior del hábitat (Saunders, Hobbs, & Margules, 1991). Diferentes autores coinciden en que la fragmentación de ecosistemas naturales constituye la amenaza más importante para la conservación de la biodiversidad (Turner, 1996) (Fahrig, 2003) (Crooks & Sanjayan, 2006).

1.3 Justificación

En la Baja Guajira los paisajes son utilizados de maneras intensivas para la producción agropecuaria y la explotación minera (Vásquez & Correa, 1992) (CORPOGUAJIRA, 2001).

Este tipo de actividades ejercen una presión que ocasiona detrimento y desaparición de los hábitats naturales, sin embargo, no son las únicas actividades que generan algún tipo de presión sobre estos ecosistemas.

El presente análisis de fragmentación se enfocará en la zona geográfica Baja Guajira, por ser la que mayor disponibilidad del ecosistema de bosque seco tropical posee y por constituirse como una zona de especial interés en la conectividad de la diversidad biológica de la Serranía del Perijá y la Sierra Nevada de Santa Marta (ANLA, 2018).

En un estudio realizado por Pizano *et al.*, (2016), identificaron que las actividades que mayor presión están ejerciendo sobre el bosque seco tropical en la región Caribe son el desarrollo de proyectos de infraestructura, ganadería, incendios forestales, tala intensiva y tala selectiva, lo cual propende en la fragmentación de los remanentes de los bosques naturales de esta región, coincidiendo con el panorama general del bosque seco tropical en el país, donde se estima que solo queda el 3% del ecosistema original (Garcia, Corzo, Isaacs, & Etter, 2014).

Diferentes instituciones en el país han desarrollado estrategias, que han permitido conocer los remanentes del bosque seco tropical a una escala semidetallada (1:100.000), la biodiversidad que alberga, los endemismos, y bienes y servicios que brindan; sin embargo, no existen muchos estudios que permitan conocer el estado de la fragmentación de este ecosistema en el país.

El análisis de la fragmentación permite tener una primera aproximación para entender el comportamiento del paisaje y cómo las actividades antrópicas ocasionan impactos sobre el mismo, lo que genera superficies aisladas y muy pequeñas que limitan las posibilidades de supervivencia de las especies que allí habitan; Conocer el estado de la fragmentación de este ecosistema permite establecer áreas que requieren ser priorizadas, como áreas de conservación donde se puedan implementar medidas de rehabilitación y/o restauración que posibiliten la conectividad entre fragmentos.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Describir el análisis de fragmentación del bosque seco tropical en la baja Guajira, La Guajira, Colombia.

2.2 Objetivos específicos

- Generar un compuesto o métrica como base para la identificación de coberturas asociadas al bosque seco tropical en la baja Guajira.
- Analizar la clasificación para el bosque seco tropical en la baja Guajira.
- Calcular e interpretar las métricas de fragmentación del bosque seco tropical de la baja Guajira.
- Realizar y analizar el índice de fragmentación en el ecosistema de bosque seco tropical de la baja Guajira.

3. Antecedentes

3.1 Bosque seco tropical

El bosque seco tropical está catalogado como el más amenazado del mundo (Fundación Natura, 2020) y en Colombia como el más fragmentado y menos conocido (Barquet, 2016).

La institución encargada del estudio de este ecosistema es el Instituto Alexander von Humboldt que ha desarrollado diferentes investigaciones en los últimos años, donde identificaron que el bosque seco tropical está distribuido en casi todo el país y fue dividido en seis áreas biogeográficas, a saber: i) región Norandina, ii) región del valle del Cauca, iii) región del valle del Patía, iv) región del valle del río Magdalena, v) región Llanos y, vi) región Caribe (Pizano, y otros, 2016), donde la suma de todas estas áreas apenas llega al 3% de la cobertura original (García, Corzo, Isaacs, & Etter, 2014) (IDEAM, y otros, 2007).

Miles *et al.*, (2006) identificaron que los bosques secos tropicales en el mundo están presionados principalmente por la expansión agrícola, la minería, el fuego y la ganadería; lo que coincide con lo desarrollado por Pizano *et al.*, (2016) en Colombia donde los principales factores de deforestación son de origen antrópico, los cuales corresponden al desarrollo de infraestructura, ganadería, plantaciones agrícolas, tala intensiva, tala selectiva, minería, incendios, ecoturismo, pastoreo y erosión; y específicamente en la Baja Guajira la presión sobre los bosques está dada por la producción agropecuaria y la explotación minera (Vásquez & Correa, 1992); no obstante, los remanentes que aún persisten están distribuidos como pequeñas islas dentro de una matriz de ecosistemas intervenidos disminuyendo la posibilidad de conectividad para las especies con desplazamientos más reducidos (Miles, y otros, 2006) (Pizano & García, 2014); lo cual coincide con lo realizado por Aizen & Feinsinger, (1994) en un bosque

seco en Argentina donde identificaron que la fragmentación del hábitat afecta los flujos genéticos de las especies residentes al aumentar la distancia entre parches, la disminución del tamaño de los fragmentos y el aumento en la generación de bordes en zonas donde antes había un bosque.

Barraza (2010) al estudiar los escarabajos coprófagos en Bahía Concha – Santa Marta (Colombia) aplicaron el concepto de bosque seco del IAvH (1998), el cual lo define basado en criterios altitudinales (0-1.000 m s.n.m.), de temperatura (> 24 °C) y de precipitación (700 – 2.000 mm/año), aunque la escala empleada para cuantificar las áreas remanentes no se especifica en el documento.

3.2 Clasificación de imágenes de satélite

De acuerdo con (Tang, 2012) las imágenes satelitales y los sistemas de información geográficos se han convertido en un insumo importante para estudiar la dinámica de las coberturas vegetales. Por otra parte este método consiste en comparar mapas temáticos derivados de imágenes satelitales y adquiridos en dos fechas diferentes, donde la clasificación de cada imagen para obtener el mapa temático se ha realizado de forma independiente (Ahlqvist, 2008), (Armenteras, 2011).

Por otro lado, (Garcia, Corzo, Isaacs, & Etter, 2014) estimaron la cobertura de BsT con mapas a escala 1:100.000. Es así como las estimaciones de la extensión de este bioma dependerán de la definición y escala utilizada (Alvarado-Solano y Otero 2015a).

3.3 Procesamiento de imágenes

Las imágenes Landsat poseen una resolución espacial de 30 m y son de Nivel 1T, esto quiere decir que su formato de salida es GeoTiff, la técnica de muestreo empleada es la convolución cúbica, poseen exactitud sistemática, radiométrica y geométrica (Miller, 2013) En cuanto al procesamiento de las imágenes (Alvarado-Solano, 2017) empleó composiciones de imágenes obtenidas por el sensor TM y TM+ , así como el uso de diferentes combinación de bandas (5-6-4 y 4-5-3) para las imágenes del sensor OLI; lo anterior con el fin de lograr una mejor interpretación de coberturas.

De acuerdo con lo planteado por (Galindo, Espejo, Rubiano, Vergara, & Cabrera, 2014) la construcción de un compuesto para detectar cambios en la cobertura del Bosque, es necesario seleccionar un método o estadístico que permita condensar la información de la serie de tal forma que el valor asignado represente el conjunto de los datos, incluida la variación por factores estacionales, permitiendo discriminar los eventos de cambios atribuibles a procesos de deforestación o regeneración.

Asi mismo (Chatfield, 2003) define una serie de tiempo como una colección de observaciones ordenadas a través del tiempo, en el caso de las imágenes satelitales dichas observaciones corresponden a valores de reflectancia de las bandas espectrales o valores derivados, tales como los índices de vegetación. De esta forma para cada pixel se tienen los datos de todas las imágenes multiespectrales disponibles en el intervalo de tiempo de la serie.

3.4 Análisis de fragmentación

Respecto a la fragmentación de los bosques en Colombia, se ha analizado por medio de la aplicación de métricas del paisaje para ecosistemas boscosos en una región de la cordillera central de los Andes colombianos (Gómez-M., 2005) .

En el departamento de Risaralda municipio de Pereira (Echeverry, 2006) el norte del departamento del Tolima (Lozano, 2011) y en la cuenca alta del río Cauca (Arcila, 2012); de manera que los estudios realizados en la región Caribe en el país son muy escasos.

Desde el enfoque florístico, se han realizado estudios comparativos de la estructura, la riqueza de especies y la diversidad de tres tipos de remanentes de bosques identificados (Bosques de galería, bosques de ladera y parches de bosque vestigial aislado) (Tarrasón, 2010) en Nicaragua, y en Colombia se destaca el estudio desarrollado por Echeverry (2006) en dos escenarios donde se identificaron tres categorías de coberturas (Bosque, sistemas Agroforestales y áreas sin árboles) y concluyeron que el área de estudio empleada presentó un paisaje fragmentado, resultado de los disturbios causados por las actividades agropecuarias y los parches de bosque existentes tienen una forma muy irregular y poca continuidad; lo cual no es alejado de la realidad de los bosques secos en el país.

En la región Caribe se destacan dos estudios principales, el primero desarrollado por López (2017) quien realizó un análisis de conectividad espacial y de fragmentación en la Ecorregión Ciénaga Grande de Santa Marta para las coberturas naturales de bosque denso (manglar), arbustales y vegetación secundaria mediante el uso de herramientas SIG, aplicando metodologías de fragmentación del paisaje y conectividad de menor costo según distancias; dicho análisis le permitió identificar que *“el área de estudio se encuentra fragmentada, y que las*

áreas núcleo para ecosistemas arbolados, no alcanzan a representar el 1% del área de estudio. Por lo tanto, se diseñaron rutas de conectividad, como primer insumo para la conectividad estructural de este ecosistema lagunar, especialmente entre fragmentos arbolados”. El segundo estudio encontrado para la región Caribe corresponde al desarrollado por Galvan-Guevara *et al.*, (2015) donde se determinó la fragmentación del bosque seco del arroyo Pechelín, Montes de María; dicho estudio también concluyó que existe una matriz en desventaja hacia el remanente de bosque seco asociado al arroyo Pechelín y que el principal factor presionante sobre el mismo es el cambio de uso del suelo a un uso productivo agropecuario.

4. Referente normativo y legal

A continuación, se relaciona el referente legal y normativo que aplica para el desarrollo del siguiente proyecto.

Tabla 1 Marco referencial

REFERENCIA	DISPOSICIÓN	APLICACIÓN
Constitución Política de Colombia	En el cual se dictan disposiciones acerca de los derechos colectivos y del medio ambiente, donde el Estado es responsable de la protección del medio ambiente Establece como deber de las personas, la protección de los recursos culturales y naturales del país.	La constitución política de Colombia como carta magna del país establece que es responsabilidad de todas las personas velar por la conservación de un ambiente sano, y este proyecto se enmarca dentro la conservación del recurso boscoso.
Ley 99 de 1993	Conforma el Sistema Nacional Ambiental, a través del cual se responsabiliza a todos y cada uno de los actores del desarrollo de la tarea de conservar y aprovechar de manera racional los recursos naturales y el ambiente.	Esta Ley define las autoridades que en materia ambiental serán las responsables de formular y verificar el cumplimiento de las políticas y normas ambientales.
CONPES 3680 de 2010	Lineamientos para la consolidación del sistema nacional de áreas protegidas (SINAP).	Las áreas del CONPES enmarcan las áreas prioritarias para la conservación nacional, dentro de las que se encuentran los bosques naturales del sur de La Guajira.
Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015	Compila las disposiciones reglamentarias del Sector Ambiente. Se reglamenta el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, las categorías de manejo que lo conforman y los procedimientos generales relacionados con éste.	El SINAP es el conjunto de las áreas protegidas, los actores sociales e institucionales y las estrategias e instrumentos de gestión que las articulen, que contribuyen como un todo el cumplimiento de los objetivos generales de conservación del país, algunos de los bosques naturales de la baja Guajira están bajo medidas de protección administradas por el SINAP.
Resolución 97 de 2017	Crea el Registro Único de Ecosistemas y Áreas Ambientales (REAA).	Los bosques secos tropicales de todo el país se encuentran dentro el Registro Único de Ecosistemas y Áreas Ambientales.

5. Referente teórico

5.1 Cobertura de la tierra

La cobertura de la tierra es definida como la cobertura biofísica que se observa sobre la superficie de la tierra (Di Gregorio & LJM, 2005), donde se incluyen todos los elementos existentes sobre la tierra, tanto los naturales (bosques, cuerpos de agua naturales, afloramientos rocosos, arbustales, entre otros) como los de origen antrópico (pastos, cultivos, cuerpos de agua artificiales, tejidos urbanos, entre otros), tal que incluye no sólo los aspectos bióticos y abióticos, sino también su interacción en un espacio determinado, donde surge como el resultados de la asociación espacio tiempo (BRC, 2005). El conocimiento de esta y del cambio de uso del suelo en un área dada, son importantes en la investigación de los recursos naturales, el desarrollo sostenible, la conservación del medio ambiente, la mitigación de los impactos de los procesos naturales o productivos y en la adaptación o prevención ante los desastres naturales, entre otros (Rincón-Romero, Jarvis, & Mulligan, 2012); además se hallan relacionadas intrínsecamente con la fisiografía y las actividades humanas de la región.

En el año 2010, en Colombia el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) adaptaron la metodología Corine Land Cover (IDEAM, 2010), la cual consiste en la fotointerpretación de imágenes satelitales, para la identificación de las coberturas terrestres en un área determinada.

5.2 Ecosistema

Rodríguez *et al.*, (2004) definen a los ecosistemas como escalas intermedias del paisaje, considerado este como “una superficie de terreno heterogénea compuesta por un conjunto de ecosistemas que se repite de forma similar en ella”, así como también afirman que son una porción del espacio geográfico definido que se identifica como la confluencia de una asociación de clima, geformas, sustratos, comunidades, biotas y usos antrópicos específicos.

Josee *et al.*, (2003), citado por Rodríguez *et al.*, (2004) describen a los ecosistemas como una unidad geográfica, o sistema funcional con entradas y salidas y con límites que pueden ser naturales o arbitrarios; por su parte el Convenio sobre Diversidad Biológica describe el término ecosistema como “un complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos en su medio no viviente que interactúan como una unidad funcional materializada en un territorio, la cual se caracteriza por presentar una homogeneidad, en sus condiciones biofísicas y antrópicas” (IAvH, 2003 citado por IDEAM *et al.*, 2007).

5.3 Paisaje

La definición de paisaje incluye múltiples significados e interpretaciones, que van desde una definición netamente física, hasta un sistema ambiental o natural (Zubelzu & Allende, 2014). La morfología de la superficie terrestre determina el paisaje, el cual conforma una escena visual compuesta por la vegetación, el suelo, el agua y los diferentes desarrollos antrópicos, incluyendo entre ellos a la población. Con base en lo anterior, se considera el análisis del paisaje como una expresión visual del medio, lo que corresponde al conjunto de características del entorno en términos de los medios biótico, físico y antrópico, que sean perceptibles a la vista. El desarrollo

del análisis del paisaje fisiográfico se sustenta en la conjunción de dos aspectos principales. El primero, la fisiografía y/o geomorfología (tipo de relieve) y el segundo la cobertura vegetal, sobre la base de principios de la ecología del paisaje que permiten establecer la perspectiva visual. Lo anterior determina que la forma del terreno y las coberturas vegetales sean aspectos complementarios, que suministran un análisis del paisaje de tipo integral sobre zonas o unidades de análisis de alta homogeneidad, sobre las cuales igualmente se localizan los ecosistemas existentes.

5.4 Ecología del paisaje

La ecología del paisaje es definida como “el estudio de toda la complejidad de relaciones causa-efecto que existen entre las comunidades de seres vivos y sus condiciones ambientales en una sección específica de paisaje” (Vila, Varga, Llausás, & Ribas, 2006) y se analiza mediante tres niveles, a saber, i) fragmento, parche o tesela, ii) clase y iii) paisaje (McGarigal & Marks, 1994), estos niveles permiten evaluar el paisaje y su comportamiento en términos de estructura, funcionalidad, configuración y temporalidad. A continuación, se relacionan algunos índices de paisaje discriminados por métrica.

Tabla 2 Índices de paisaje

MÉTRICA	DESCRIPCIÓN	PRINCIPALES ÍNDICES	
Índices de área, superficie, densidad y variabilidad	Presenta la configuración y estructuración espacial del paisaje, ya que se centra en las características de dimensión y número de fragmentos que conforman el área de estudio	Área	Total Edge
		Perimeter	Edge Density
		Radius of Gyration	Total Area
		Total (Class) Area	Largest Patch Index
		Percentage of Landscape	Total Edge
Índices de forma	Exterioriza la configuración y el funcionamiento del paisaje, ya que se concentra en las características de forma de los fragmentos que constituyen un determinado paisaje	Largest Patch Index	Edge Density
		Perimeter-Area Ratio	
		Shape	
		Fractal Dimension	
		Related Circumscribing Circle	
		Contiguity	
Perimeter-Area Fractal Dimension			

MÉTRICA	DESCRIPCIÓN	PRINCIPALES ÍNDICES	
Índices de ecotono y hábitat interior	Manifiesta la relación funcional del paisaje y su estructura, expresadas en el efecto borde que se puede generar en las coberturas y su fragilidad, ya que realiza cálculos sobre la amplitud del ecotono en relación con el hábitat interior.	Perimeter-Area Fractal Dimension	
		Core Area	Number of Core Areas
Índices de distancia, vecindad y conectividad	Revela el nivel de conectividad física del paisaje y su aislamiento ya que calcula la distancia desde el hábitat de borde y ecotono de un fragmento hasta el parche más próximo al mismo tipo.	Euclidean Nearest-Neighbor Distance	Clumpiness
		Proximity	Number of Patches
Índices de diversidad del paisaje	Indica la heterogeneidad del paisaje, ya que aportan información relevante para la comprensión de los paisajes y evolución en el tiempo.	Similarity	Patch Density
		Interspersion and Juxtaposition	Landscape Division
Índices de diversidad del paisaje	Indica la heterogeneidad del paisaje, ya que aportan información relevante para la comprensión de los paisajes y evolución en el tiempo.	Percentage of Like Adjacencies	Effective Mesh Size
		Aggregation	Connectance
Índices de diversidad del paisaje	Indica la heterogeneidad del paisaje, ya que aportan información relevante para la comprensión de los paisajes y evolución en el tiempo.	Patch Richness	Contagion
		Patch Richness Density	Aggregation
Índices de diversidad del paisaje	Indica la heterogeneidad del paisaje, ya que aportan información relevante para la comprensión de los paisajes y evolución en el tiempo.	Relative Patch Richness	Modified Simpson's Diversity
		Shannon's Diversity	Shannon's Evenness
Índices de diversidad del paisaje	Indica la heterogeneidad del paisaje, ya que aportan información relevante para la comprensión de los paisajes y evolución en el tiempo.	Simpson's Diversity	Simpson's Evenness
			Modified Simpson's Evenness

Adaptado de: Pineda, 2019 (McGarigal, *et al.*, 2015)

5.5 Bosque seco tropical

El bosque seco tropical (Bs-T) es una formación vegetal caracterizada por presentar una cobertura boscosa continua (IAvH, 1997). Este ecosistema presenta una diversidad única de plantas y animales que han desarrollado una adaptación a estas condiciones, lo cual desencadena en la presencia de especies únicas que no se encuentran en ningún otro ecosistema (endemismo) (Ariza, Isaacs, & González-M, 2014).

5.6 Corredor biológico

Los corredores biológicos son áreas que brindan conectividad entre ecosistemas y permiten mantener la biodiversidad y los procesos ecológicos que se dan entre estos ecosistemas (MINAE, 2008), la cual es esencial en la resiliencia de estos (Salom-Pérez, y otros, 2021). Estas áreas generalmente tienen formas alargadas, que pueden estar asociadas principalmente a bosques de galería y/o riparios, áreas de vegetación secundaria, remanentes de bosques naturales, entre otras coberturas, sin embargo, son importantes dado que evitan el aislamiento entre poblaciones (Anderson & Jenkins, 2006). En los últimos años, los corredores biológicos han empezado a ser implementados en las políticas nacionales para el manejo del paisaje y la conversación, definiéndolas como áreas de conservación prioritarias (Ruchi, 2021).

5.7 Áreas prioritarias de conservación

Chávez *et al.* (2014), definen las áreas prioritarias de conservación de los recursos naturales como *la representación espacial del territorio, donde confluyen atributos ambientales, biofísicos, socioeconómicos, culturales o políticos específicos y óptimos para un objetivo dado; y cuya permanencia está en riesgo inminente por causas naturales, humanas o ambas.* En Colombia, el Instituto Alexander von Humboldt estableció un portafolio de áreas prioritarias de conservación, donde han identificado sitios estratégicos que han permitido avanzar en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP). Estas áreas han sido adoptadas por las Corporaciones Autónomas Regionales, y en la región Caribe estas áreas están representadas por el SIRAP Caribe.

5.8 Fragmentación

La fragmentación se refiere a los cambios de las coberturas naturales que provoca transformaciones en los diferentes niveles de estudio de los atributos de la biodiversidad, presentando un impacto notorio en el paisaje (McGarigal, Cushman, Neel, & Ene, 2002); esto conlleva a la pérdida, simplificación y descomposición de hábitats naturales y seminaturales en la superficie terrestre, las cuales actúan de manera conjunta con otros factores como la contaminación del medio y la presión directa sobre especies, y generan degradación en el estado de los ecosistemas.

La fragmentación en los ecosistemas naturales genera un cambio gradual en la configuración del paisaje; Santos & Tellería, (2006) mencionan que esta configuración puede ser definida mediante las siguientes variables paisajísticas, a saber: i) Cantidad de hábitat, ii) densidad regional, iii) número de los fragmentos de hábitat, iv) tamaño medio, v) distancia entre fragmentos, y vi) efecto de borde. La disposición de los fragmentos dentro de la matriz afectan de forma directa el desplazamiento de las especies dentro de las teselas con disponibilidad de hábitat y a su vez afecta directamente la dinámica de poblaciones, de tal manera que los patrones espaciales del paisaje se relacionan de forma directa sobre los procesos ecológicos (Gurrutxaga & Lozano, 2012).

5.9 Clasificación digital de imágenes satelitales

Borràs *et al.*, (2017) define la clasificación digital como el proceso mediante el cual se le asigna a cada unidad una categoría con base en unas áreas de entrenamiento previamente

definidas por el evaluador o usuario; estas áreas de entrenamiento o muestras de capacitación emplean la firma espectral para poder clasificar la imagen (Esri, 2021).

La clasificación de las imágenes satelitales se puede presentar de dos maneras, supervisada o no supervisada; la clasificación no supervisada es realizada mediante una interpretación automática que realiza el software, donde el usuario únicamente asigna el número de clases que se encuentran en la imagen y este define las clases basado en la firma espectral de los píxeles presentes en la imagen. Por otro lado, la clasificación supervisada tiende a ser más precisa, puesto que el usuario interpreta y define las clases, tal que cada píxel se categoriza en la clase con la cual presenta mayor probabilidad de pertenencia (Vargas-Sanabria & Campos-Vargas, 2018).

5.10 Enmascaramiento de nubes y sombras de nubes

Las imágenes de superficie de reflectancia deben ser depuradas de tal forma que cada escena conserve únicamente los píxeles que contienen información de la cobertura de la tierra, enmascarando y eliminando las áreas de nubes, bandeamiento, sombras o bruma. Para garantizar la eliminación de estos píxeles resulta apropiado combinar los resultados de las máscaras producidas con diferentes herramientas. Se recomienda el uso de la función Masking del módulo Calibrate Imagen de CLASlite, el programa de procesamiento Fmask (Zhu & Woodcock, 2012).

5.11 Apilamiento de las bandas

Una vez descargados los datos es necesario reconstruir cada imagen mediante la unión de todas las bandas, descartando las que corresponden a la longitud de onda del Infrarrojo térmico; en el caso de Landsat 8 OLI las capas de Aerosoles y Cirrus pueden también ser excluidas.

Debido a la gran cantidad de imágenes que se requiere para construir el compuesto, se recomienda buscar un mecanismo de automatización, ya sea utilizando las funciones de procesamiento en lotes de los programas especializados o desarrollando códigos de programación en herramientas como Python o R.

5.12 Obtención de los compuestos de imágenes

Con las imágenes enmascaradas se construye una serie de tiempo de cada una de las bandas por separado (Rojo, NIR, SWIR2), uniendo todas las fechas disponibles para cada banda mediante una función de apilado (Layer stack). También es necesario construir estas series de manera independiente para cada sensor Landsat 5, 7, u 8.

El compuesto de imágenes se genera para cada banda y sensor obteniendo un valor único de cada serie; se recomienda emplear la mediana de la serie, puesto que al ser una medida de tendencia central, elimina los sesgos debidos a valores extremos por cambios estacionales o ruido. En caso de tener compuestos para una misma banda de sensores diferentes, estos se promedian con el objeto de tener un único compuesto de la banda.

De esta forma al finalizar el pre-procesamiento de cada escena se obtiene un compuesto de cada banda que corresponde a la mediana de los valores de reflectancia incluidos en la serie de tiempo (Galindo, Espejo, Rubiano, Vergara, & Cabrera, 2014).

6. Metodología

6.1 Área de estudio

El departamento de La Guajira se localiza en el extremo norte de Colombia y de la llanura del Caribe; localizado entre los 10°23' y 12°28' de latitud norte y los 71°06' y 73°39' de longitud oeste, con una superficie de 2'062.989,22 hectáreas; dividida geográficamente en tres zonas diferenciadas por su clima, tipo de vegetación y economía (CORPOGUAJIRA, 2001).



Figura 1 Regiones geográficas de La Guajira

- **Alta Guajira:** Ubicada en el extremo peninsular, desde Punta Gallinas hasta el Cabo de la Vela y Matajuna (límite con Venezuela). El viento se cataloga como el principal

agente moldeador del territorio. Las actividades económicas más sobresalientes son el pastoreo de ganado caprino y la pesca.

- **Media Guajira:** Localizada en la parte central del departamento, desde el Cabo de la Vela y Matajuna (límite con Venezuela) hasta Riohacha y la cuchilla Pangrande, en los Montes de Oca. Es la zona con mayor tránsito comercial del departamento y allí se desarrollan algunas actividades agropecuarias.

- **Baja Guajira:** Ubicada al occidente de la Media Guajira, enmarcadas por las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta y por la Serranía del Perijá. Está bañada por el río Ranchería y el río Cesar, y por todos los ríos que provienen de la Sierra Nevada de Santa Marta a su desembocadura en el mar Caribe, constituyéndose como una zona donde se pueden encontrar todos los pisos térmicos. Esta zona es especialmente diferente de la alta y media Guajira, siendo esta húmeda y rica en flora y fauna, por tener un régimen pluvial más abundante y con suelos fértiles lo que la hace más diversa en cultivos, y a su vez la de mayor intervención antrópica generando fragmentación sobre los bosques naturales de la zona. En esta región se encuentran concentradas la mayoría de las actividades económicas del departamento, como son las explotaciones carboníferas del Cerrejón y la mayor actividad agropecuaria del departamento.

6.2 Enfoque metodológico

El presente análisis de fragmentación se enfoca en la investigación cuantitativa ya que se generará información medible y comparable.

6.3 Tipo de estudio

El análisis de la fragmentación del ecosistema de bosque seco tropical en la Baja Guajira es un estudio de tipo descriptivo.

6.4 Procedimiento

6.4.1 Identificación de la zona potencial de bosque seco tropical (BsT) en la baja Guajira

El primer paso que se realizó en este estudio fue determinar la zona potencial de bosque seco tropical en la baja Guajira, para este caso se tomó como referencia la cartografía oficial a escala 1:100.000 de bosque seco tropical generada por el Instituto Humboldt , el cual abarca gran parte de los municipios que componen la baja Guajira.

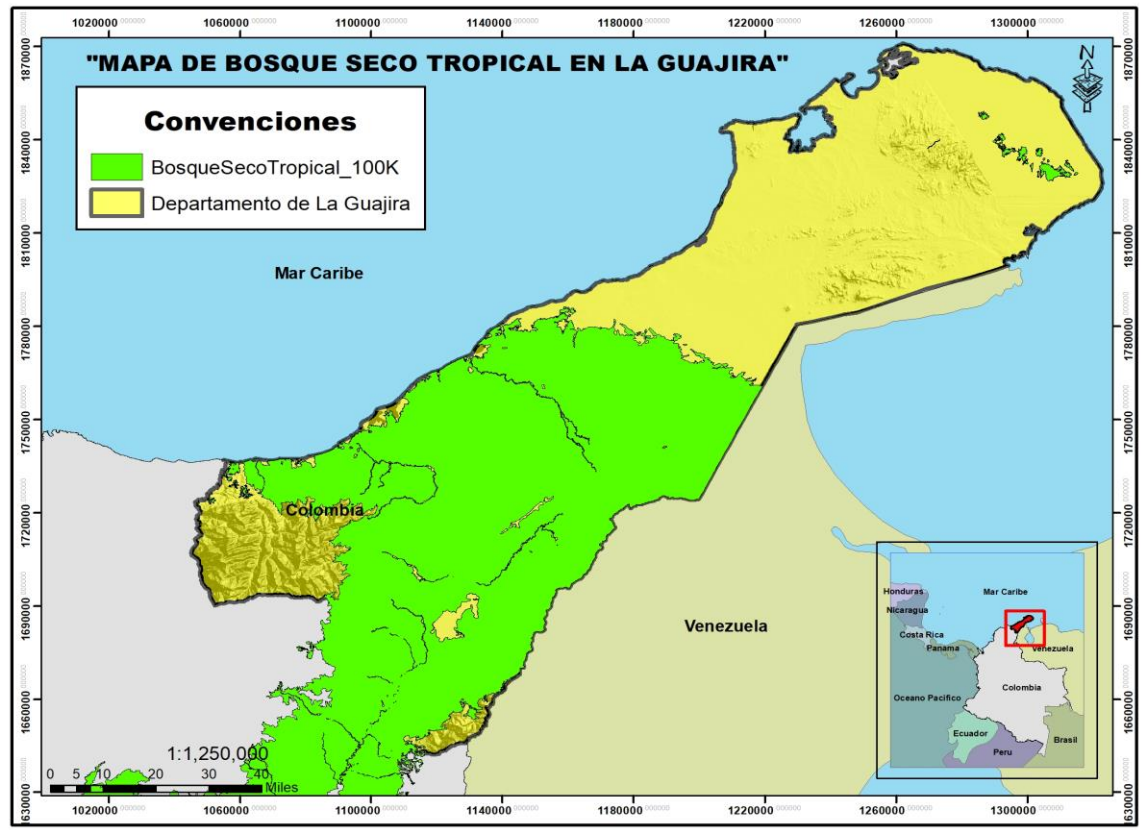


Figura 2 Mapa de bosque seco tropical en La Guajira

Para este caso se definió como cobertura de interés aquellas que por su composición forestal se encuentran asociada al ecosistema de bosque seco tropical, para este estudio se hizo énfasis sobre las siguientes: Bosque, arbustales y vegetación secundaria.

6.4.2 Selección y descarga de imágenes de satélite

Es importante resaltar que el procesamiento y obtención de la métrica utilizada para la identificación de las coberturas, se tomó como base el protocolo de procesamiento de imágenes satelitales y sensores remotos para la cuantificación de pérdida de cobertura de bosque, esto con el propósito de disminuir las variaciones en los niveles digitales de los bosques estacionarios

Para la obtención del compuesto estadístico (mediana), es necesario realizar un pre-procesamiento, por lo tanto se requiere emplear el uso de imágenes de superficie de reflectancia, el cual presenta correcciones que minimizan los errores de dispersión y absorción presentes en la atmosfera.

. Estas imagenes tienen una mayor consistencia en las respuestas radiométricas , permitiendo la aplicación de procesos y modelos estándar para todas las escenas y fechas analizadas (Galindo, Espejo, Rubiano, Vergara, & Cabrera, 2014).

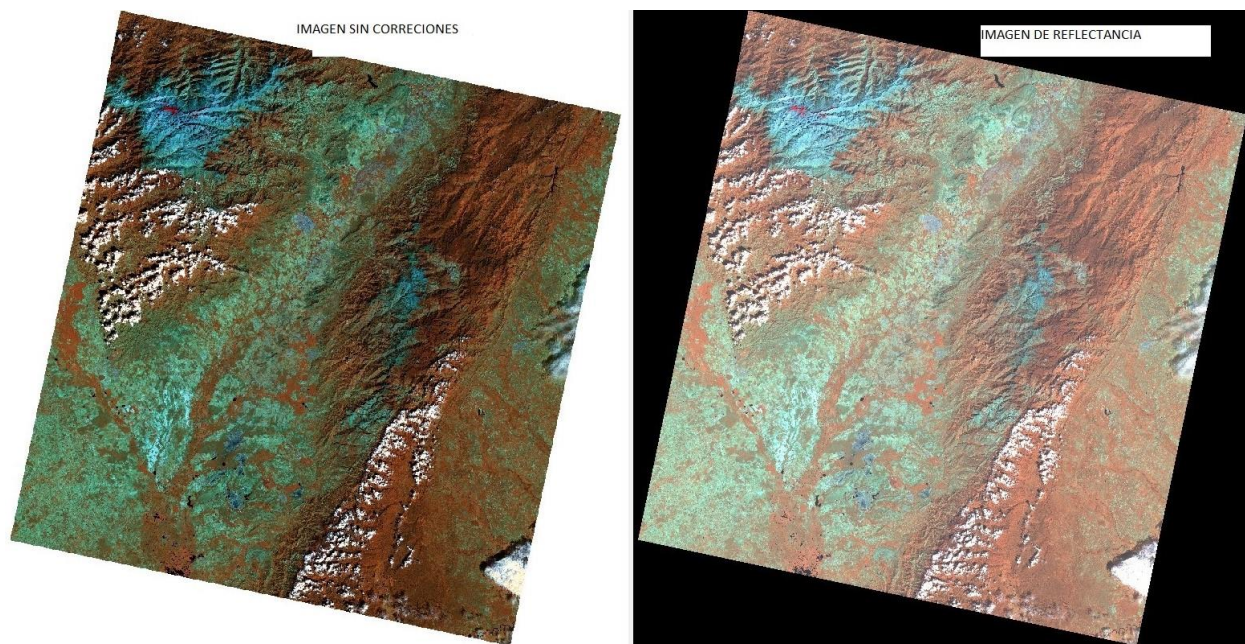


Figura 3 Correccion atmoferica y radiométrica de las imagenes

Por lo anterior, las imágenes fueron seleccionadas a través del servidor del Earth Resources Observation and Science Center - EROS del Servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS; En el aplicativo de consulta , se eligieron 7 imágenes del satélite Landsat del sensor 8OLI con fecha de toma entre el 1 de enero y 31 de abril del año 2021. Posteriormente se realizó en proceso de descarga de los productos correspondiente a la superficie de reflectancia

con el mejor nivel de procesamiento disponible, esto es Colección 1 level 2, las cuales se encuentran calibradas atmosféricamente y radiométricamente por el USGS para ser utilizadas en la generación del compuesto o métrica deseada. Este proceso se realizó a través del servidor de la NASA (Espa), con cada una de las especificaciones definidas en el protocolo de procesamiento digital de imágenes elaborado por el SMByC del Ideam.

Tabla 3 Imágenes satelitales utilizadas

IMEGENES USADAS	SATELITE	SENSOR	PAT/ROW	FECHA (AÑO/MES/DIA)	Resolución espacial	Resolución radiométrica
Landsat_8_52_210325_8OLI_Reflec_SR	Landsat	8OLI	8_52	21_03_25	30 metros	12 bits
Landsat_8_52_210221_8OLI_Reflec_SR	Landsat	8OLI	8_52	21_02_21	30 metros	12 bits
Landsat_8_52_210104_8OLI_Reflec_SR	Landsat	8OLI	8_52	21_01_04	30 metros	12 bits
Landsat_8_53_210221_8OLI_Reflec_SR	Landsat	8OLI	8_53	21_02_21	30 metros	12 bits
Landsat_8_53_210205_8OLI_Reflec_SR	Landsat	8OLI	8_53	21_02_05	30 metros	12 bits
Landsat_8_53_210120_8OLI_Reflec_SR	Landsat	8OLI	8_53	21_01_20	30 metros	12 bits
Landsat_8_53_210104_8OLI_Reflec_SR	Landsat	8OLI	8_53	21_01_04	30 metros	12 bits

6.4.3 Pre-procesamiento

Esta etapa incluye el procesamiento de las imágenes eliminando las áreas de nubes, sombras de nubes, cirrus y mejorando la calidad radiométrica para facilitar la identificación de coberturas asociadas al bosque seco tropical.

▪ Enmascaramiento de las imágenes

Una vez descargadas las imágenes de superficie de reflectancia se procedió a depurarlas de tal forma que cada escena conservara únicamente los píxeles que contienen información de la cobertura de la Tierra, enmascarando y eliminando las áreas de nubes, bandeamiento, sombras o bruma. Para optimizar la eliminación de estos píxeles se contó con una herramienta de desarrollo propio del SMByC, implementada en QGIS (Qgis Plugin CloudMasking, el programa de procesamiento Fmask).

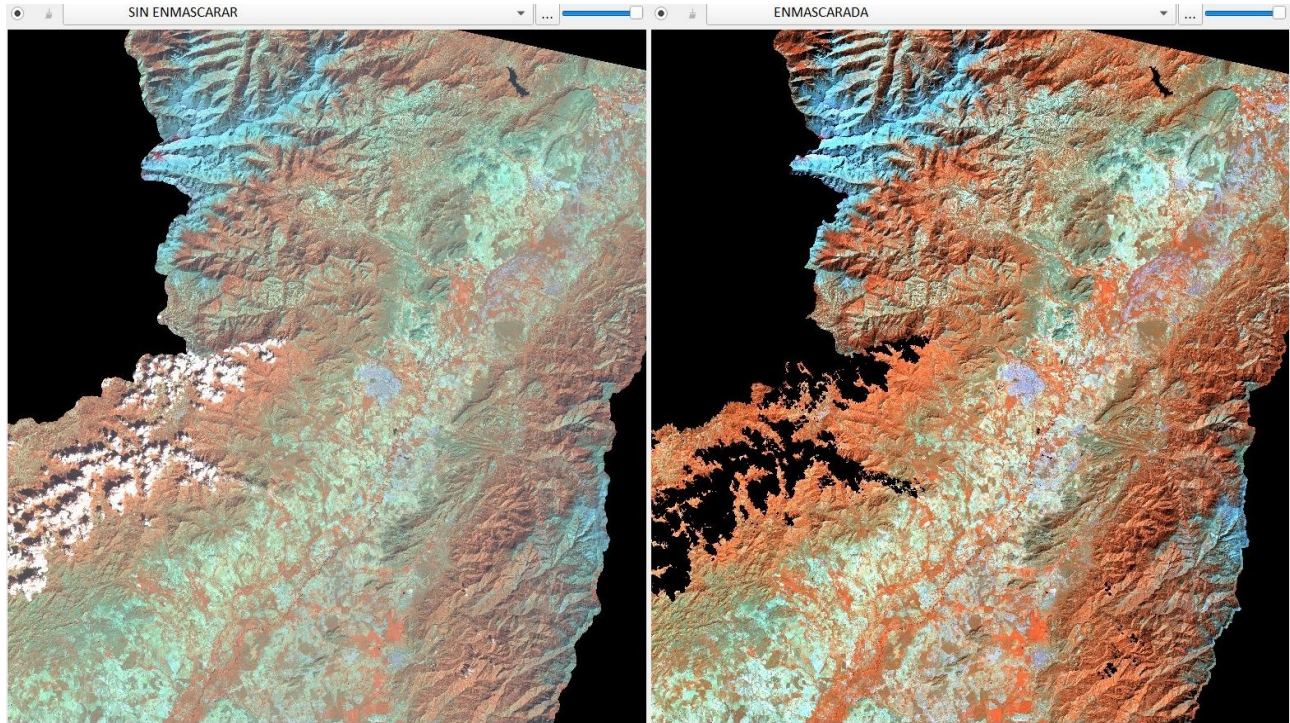


Figura 4 Comparación de la imagen sin enmascarar y enmascarada

Izquierda: Imagen Landsat Path 8- Row 53 original en combinación de infrarojo 567 vs la imagen reflectancia (Derecha) en la misma combinación de banda con enmascaramiento de las nubes (zonas en color Negro).

▪ Apilamiento de bandas

Luego de la creación de la máscara para cubrir las nubes, sombras de nubes y brumas, se procedió a realizar el apilamiento de las bandas, el cual consistió en unir tanto las tres bandas del infrarojo (NIR, SWIR1, SWIR2) como la banda del rojo (Rojo) del espectro visible, razón por la cual se decidió utilizar estas bandas, ya que permiten facilitar la interpretación de las coberturas de interés en este estudio. Este procedimiento se realizó con la misma herramienta utilizada en el paso anterior, el cual permite que las zonas enmascaradas tenga niveles digitales de 0 para que posteriormente puedan complementar los vacíos con información de otra imagen de la serie de tiempo que se descargaron inicialmente (Figura 4).

6.4.4 Procesamiento

En esta etapa se realizaron los diferentes procesamientos requeridos para obtener los insumos necesarios para determinar el nivel de fragmentación del bosque seco tropical

▪ **Generación del compuesto mediana para la clasificación de coberturas de la tierra**

En este proceso se emplearon todas las 7 imágenes disponibles del periodo correspondiente entre el 1 de enero y 31 de abril, de tal forma que para cada unidad de observación (pixel) se tiene una serie de tiempo con todos los datos de superficie de reflectancia válidos para ese periodo. Posteriormente, y tomando como insumo dicha serie de tiempo, para cada pixel se obtuvo un compuesto o métrica el cual representa la mediana de la serie de tiempo de cada banda espectral, estadístico que distingue fácilmente las diferentes clases de coberturas; de esta forma para cada unidad de observación se obtiene un único valor radiométrico de superficie de reflectancia en cada una de las bandas radiométricas. La construcción de este mosaico de mediana tiene dos objetivos principales:

- Control de cobertura: Al incluir todas las escenas disponibles para el periodo de estudio (aunque tengan un área muy reducida de información) se garantiza el mayor cubrimiento posible del marco estadístico definido disminuyendo al mínimo la pérdida de información, ya que cada una de las unidades de observación que tengan información (valor de reflectancia) deberán ser interpretadas y clasificadas.
- El valor de la mediana permite disminuir los efectos por cambios estacionales en los bosques que podrían confundirse con pérdidas o ganancias.

Este procedimiento se realizó a través de las herramienta de desarrollo propio del SMyC del IDEAM “**Stack Composed**”, el cual tiene como función principal generar un compuesto para cada una de las 4 bandas que se seleccionó para este estudio. Luego de tener separadas cada una de las bandas de las 7 imágenes utilizadas, se realiza la unión de las mismas para lograr finalmente el producto deseado. Para este proceso se utilizó la herramienta “Combinar” del repositorio de herramientas contenidas en el software QGIS.

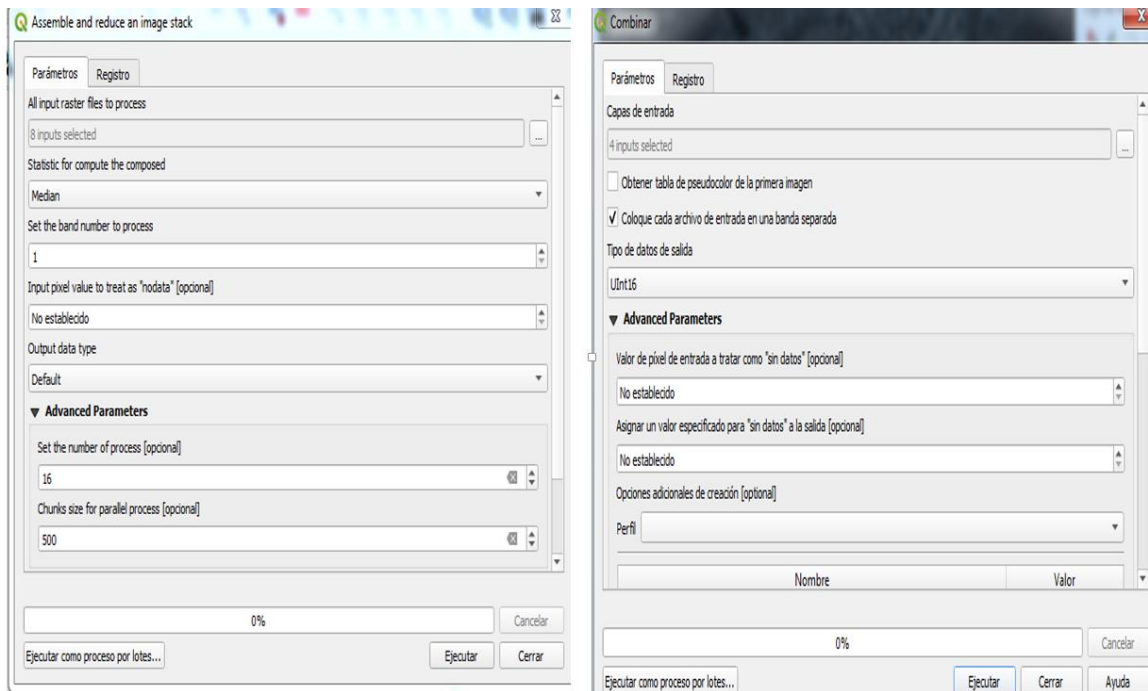


Figura 5 Proceso para generación del Compuesto Mediana de la Baja Guajira

▪ Clasificación de imágenes supervisada

Una vez generado el compuesto mediana con las cuatro bandas de interés (Rojo ,NIR, SWIR1, SWIR2), se procedió a realizar la clasificación supervisada mediante el uso de la herramienta Maximu Likelihood Classification del software ArcGIS, el cual se caracteriza por ser

uno de los algoritmos más precisos que existe, y que es de amplio uso en teledetección (Toro Espín, Gomariz-Castillo, Cánovas-García, & Alonso-Sarría, 2015).

Debido a la poca información que existe sobre de este tipo de ecosistemas, y tomando como base los estudios elaborados por el instituto Alexander von Humboldt, se seleccionó como coberturas de interés para la clasificación, aquellas que de acuerdo a su composición forestal y funciones ecológicas propias (porte bajo, leñoso) se encuentran relacionadas o asociadas al bosque seco tropical (arbustales, vegetación secundaria y bosques densos).

El primer paso para iniciar con la clasificación de coberturas , consistio en la toma de muestras a las diferentes clases presente en la imagen, en la cual se realizó varias pruebas utilizando la geometría de polígonos y puntos. Para este caso tomaron muestras representativas y homogeneas considerando la respuesta espectral de cada clase; de esta manera se clasificaron 13 tipos de coberturas con el fin de homogenizar los resultados, además de disminuir los errores de confucion entre las mismas clases(Tabla 4).

Tabla 4 Clasificación de coberturas

CODIGO	COBERTURA
1	Bosque
2	Cuerpos de Agua
3	Sin Vegetacion
4	Otros Cultivos
5	Cultivos de Palmas
6	Vegetacion Secundaria Baja
7	Arbustal
8	Herbazal
9	Zonas Urbanas
10	Zonas Minas
11	Bosque de Galeria
12	Pastos
13	Cultivo de Arroz

Luego de tener las suficientes muestras posibles, se procedio a generar la firma espectral utilizando como insumo principal el compuesto mediana generado anteriormente y las muestras tomadas para cada una de las clases. Finalmente para la obtencion del producto final de la clasificación se emplea función de estimación por máxima verosimilitud utilizando el compuesto mediana y la firma espectral generada en el paso anterior.

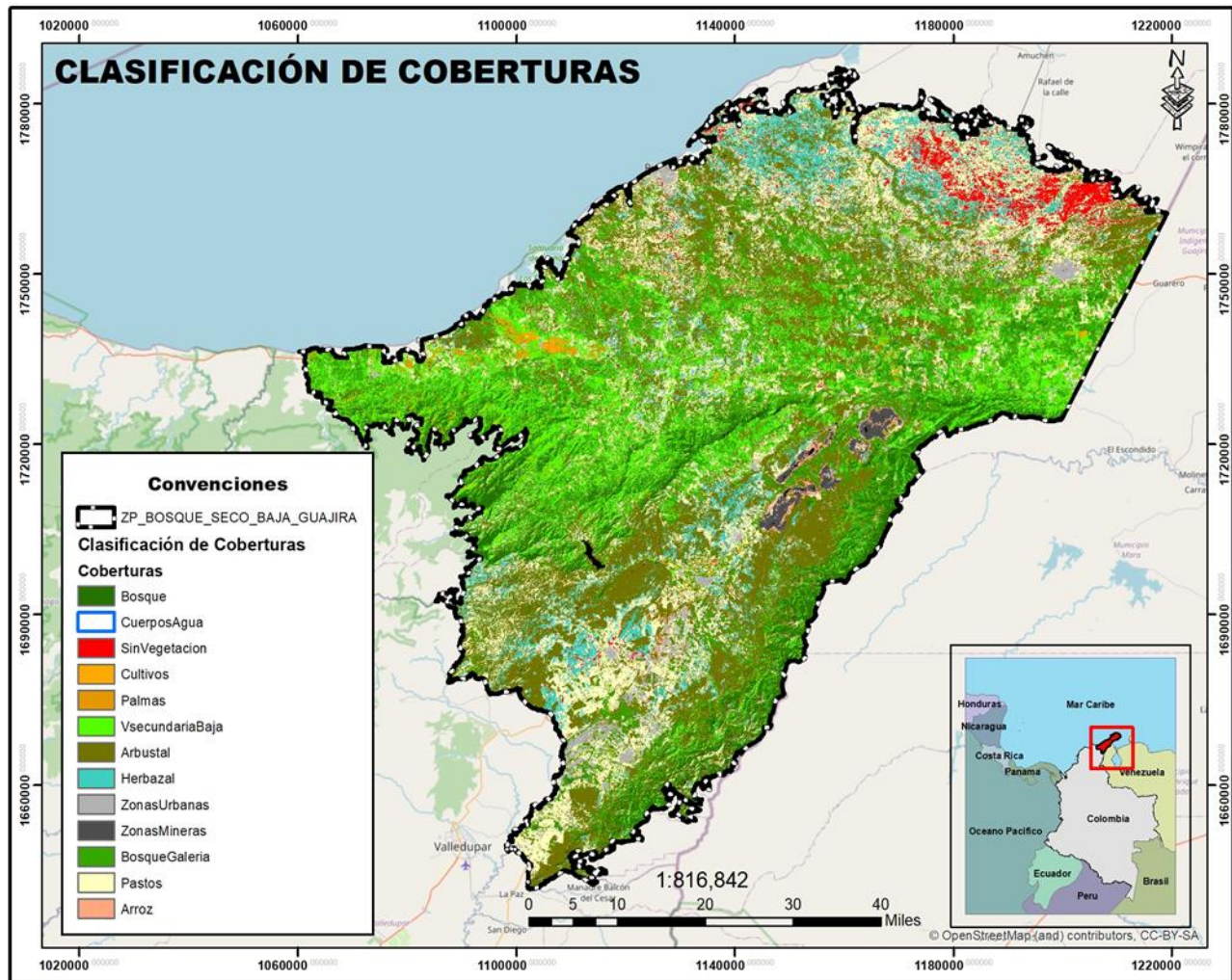


Figura 6 Clasificación de coberturas en la baja Guajira

6.4.5 Edición y depuración de la capa de coberuras

En esta etapa se realizó la depuración o edición de la capa raster clasificada, con el fin de corregir los errores de confusión con otras clases, además de homogenizar las coberturas de interés en la imagen. Para este proceso se utilizó una herramienta o algoritmo denominado ThRasE, el cual se puede descargar del repositorio de complementos de QGIS. Este algoritmo utiliza una tabla de píxeles recodificada para modificar varias clases al mismo tiempo utilizando herramientas de píxeles, líneas o polígonos. El complemento tiene una herramienta de navegación para garantizar la revisión del raster temático.

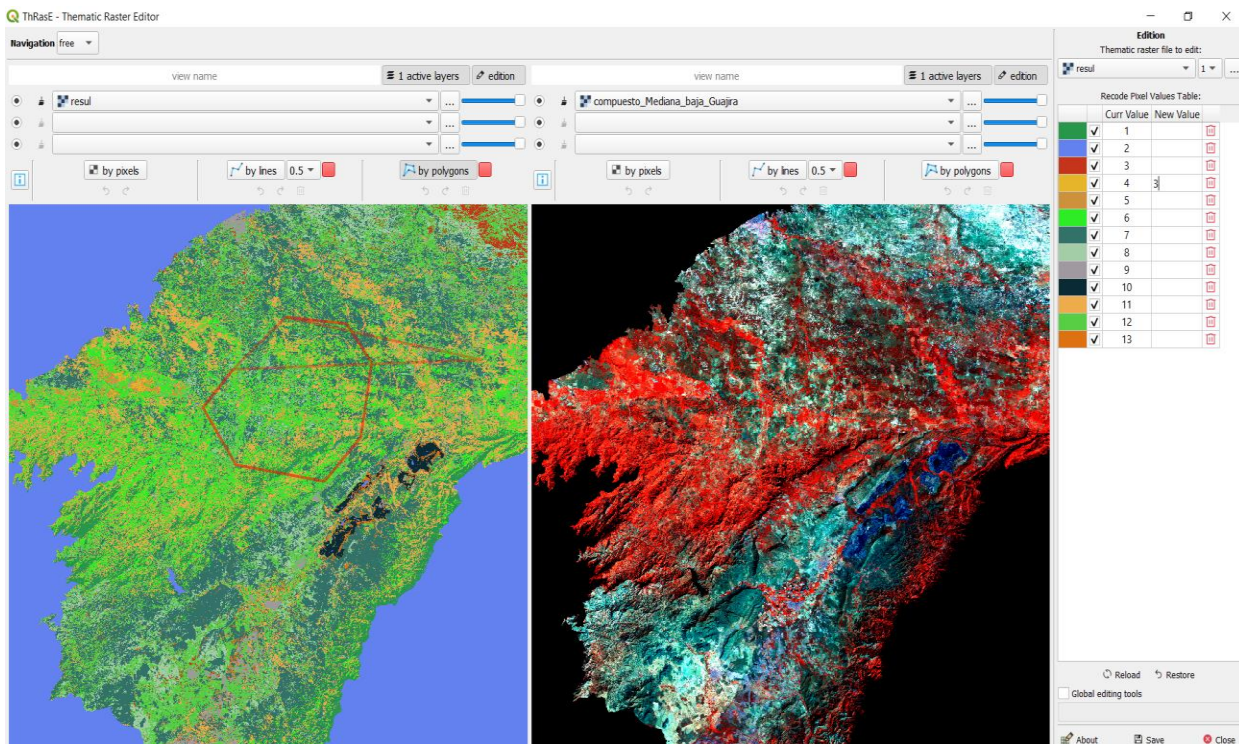


Figura 7 Edición de la imagen

6.4.6 Análisis de fragmentación

Para el análisis de los patrones de fragmentación se emplearon los softwares FRAGSTATS y ArcGIS (ArcMap 10.8), donde se realizó el análisis teniendo en cuenta cada parche (su tamaño, forma, aislamiento) y la totalidad del paisaje (proporción y arreglo espacial de los elementos que lo componen).

- **Distancia euclidiana al vecino más cercano o “*Euclidean Nearest-Neighbor Distance*” (ENN)**

Esta métrica presenta variaciones constantes de acuerdo con las transformaciones y cambios en el paisaje y los ecosistemas, estos son a través de la distancia entre teselas o fragmentos, donde inicialmente mide el aislamiento que pueda generar pérdida de conectividad estructural y funcional dentro de un área definida. ENN se acerca a 0 a medida que disminuye la distancia al vecino más cercano.

- **Área media del parche o “*Mean patch area*” (AREA_MN)**

El área total para una tesela muestra la superficie media de las manchas individuales o teselas de una cobertura o clase determinada (Cocero, Azcárate, García, Muguruza, & Santos, 2010). Junto con el NP, aporta información acerca de la fragmentación de cada cobertura, de tal forma que un incremento del NP junto a una disminución del AREA_MN revelará un incremento de la fragmentación.

- **Número de teselas o “Patch Number” (NP)**

El número de teselas permite identificar en cuántas teselas, parches o fragmentos se encuentra dividida una clase o cobertura.

- **Compacidad media de los fragmentos o “Mean Compaction” (GYRATE_MN)**

Esta métrica aporta una idea de la compacidad de los diferentes fragmentos, o en sentido inverso, de su elongación. Es la media para todos los fragmentos de una misma cobertura del valor del parámetro radio de giro (GYRATE). Este parámetro se calcula para cada fragmento como la distancia de cada píxel al centroide de dicho fragmento. Cuanto más cercanos a la forma del círculo son estos fragmentos, menores serán los valores del GYRATE y mayor será su compacidad. En sentido contrario, un mayor valor mostrará una mayor elongación de los fragmentos. Es necesario destacar que este índice se encuentra influenciado por el tamaño de los fragmentos, de tal forma que incrementos en el AREA_MN, generalmente se traducen en una mayor elongación o incremento del GYRATE_MN.

- **Índice de forma medio o “Mean Shape Index” (SHAPE_MN)**

Esta métrica permite identificar la complejidad geométrica de los fragmentos. *Mide la relación entre el perímetro de un fragmento y el perímetro que tendría el fragmento más simple de la misma área, de tal forma que mayores valores de este índice muestran un incremento de la complejidad de sus formas* (Cocero, Azcárate, García, Muguruza, & Santos, 2010). Permite medir la compacidad de las teselas.

- **Índice de dimensión fractal o “*Fractal Dimension Index*” (FRAC)**

La dimensión fractal toma valores entre 1 y 2, donde los valores próximos a uno indican formas geométricas sencillas con perímetros muy simples. Los valores que se acercan a dos pertenecen a formas más complejas (François & Sandoval, 2000). La hipótesis explicativa de la auto similitud de los fractales es que un proceso único o un mismo conjunto de procesos que organiza la forma a todas las escalas (Burel & Baudry, 2002).

6.4.7 Índice de fragmentación

Para el cálculo del índice de fragmentación, se empleó el método propuesto por (Gurrutxaga M. , 2003). La ecuación utilizada para calcular el índice de fragmentación es la siguiente:

$$F = \frac{\text{Área cobertura natural (ha)}}{\text{No. de teselas} * 2dc \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)}$$

Donde

dc distancia media desde una tesela hasta la tesela más cercana

λ densidad media de las teselas.

7. Resultados

7.1 Procesamiento digital de imágenes

El compuesto mediana generado a partir de las siete (7) imágenes seleccionadas y utilizan las cuatro (4) bandas (NIR, SWIR1, SWIR2, ROJA) con una combinación de bandas 5-6-4 para las imágenes del sensor OLI, se logró resaltar espectralmente atributos de la imagen que de otra manera no sería posible observar, tal como lo menciona (EEA 1994, Ideam 2007, 2008) ; sin embargo en aquellas zonas con poca información, debido al cubrimiento de nubes en algunos periodos, no permitió reducir la variabilidad de los valores digitales de los píxeles, principalmente en aquellos municipio de norte de La Guajira, lo cual dificulta la diferenciación y/o clasificación con otras clases temáticas.

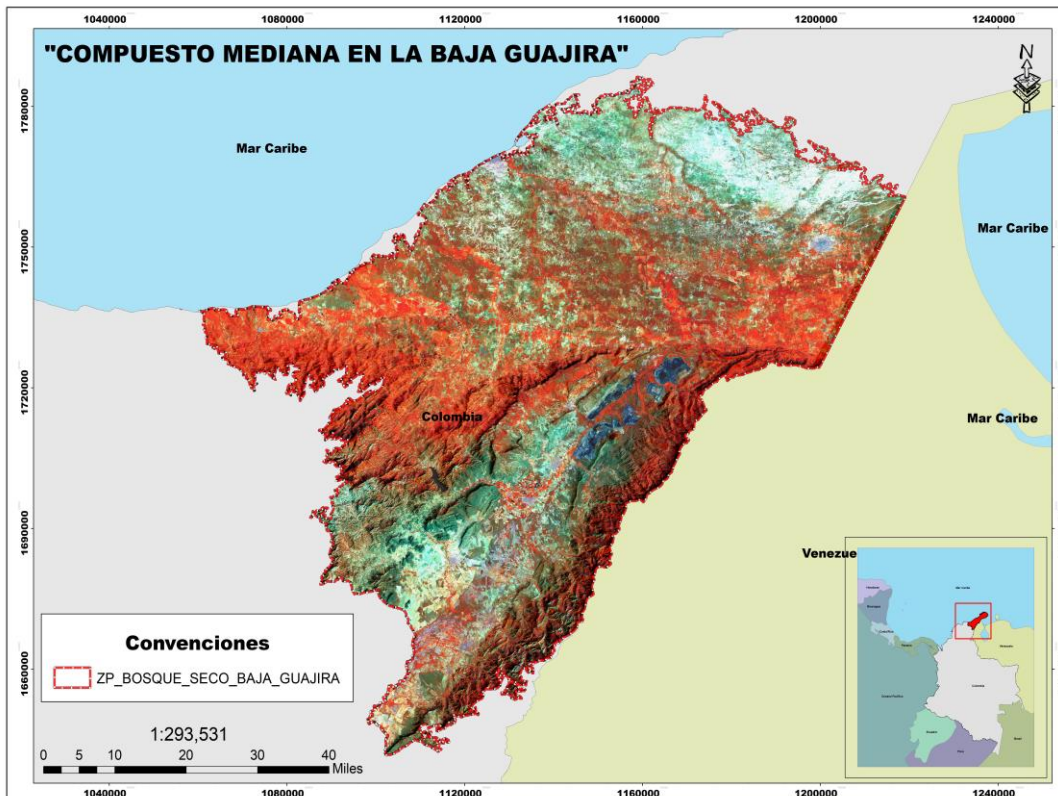


Figura 8 Compuesto mediana en la Baja Guajira

La combinación de bandas utilizando las bandas del infrarojo y la roja del espectro visible, logran mejorar la interpretación de las coberturas boscosas y arbustivas, la cual permite disminuir los errores de confusión con otras categorías o clases con similar respuesta espectral empleando el algoritmo de clasificación supervisada (*Maximum Likelihood*).

Los municipios que presentaron mayor dificultad de interpretación debido a la variabilidad que presentan los bosques estacionarios fueron aquellos localizados en el sur del departamento de la Guajira (Riohacha, Maicao y Albania) como producto de la poca información de las imágenes durante el periodo de análisis, sin embargo se apoyó con información secundaria para disminuir los errores de confusión con otras clases.

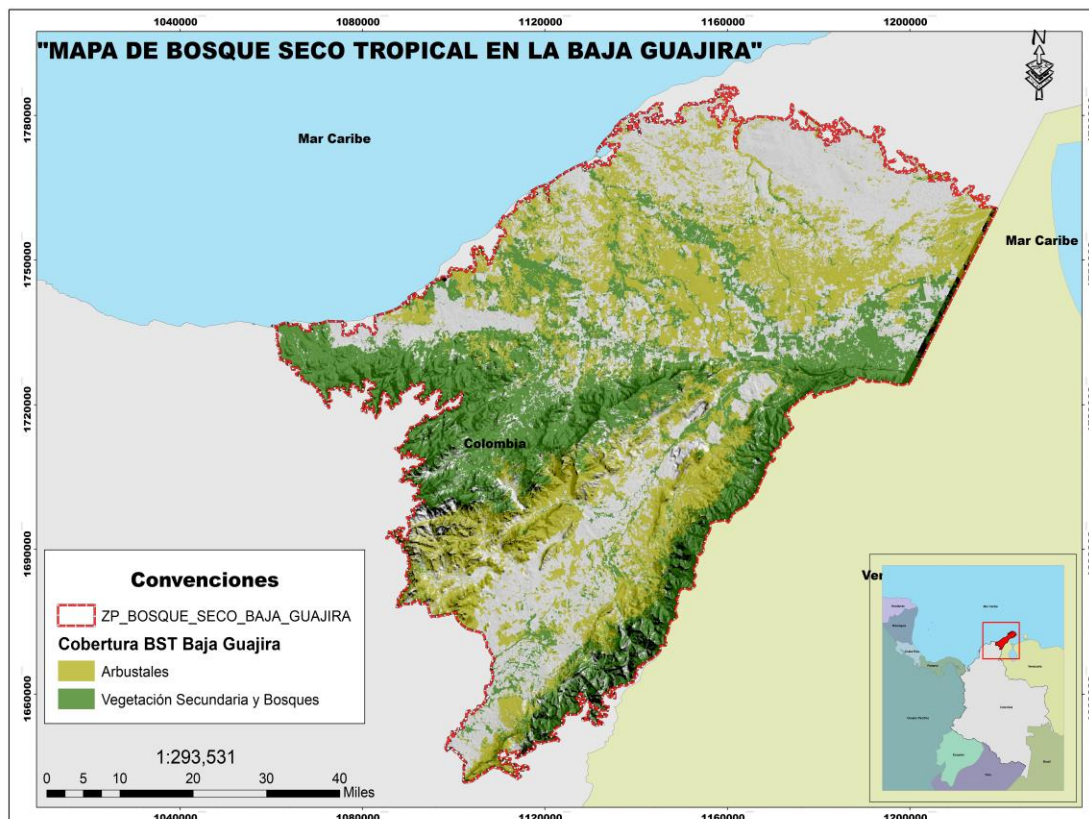


Figura 9 Mapa de coberturas asociadas al bosque seco tropical en la baja Guajira

En resultado producto de la clasificación y edición final de la capa de coberturas asociadas al bosque seco tropical en la baja Guajira, arrojó un area total de 307129,64 hectareas

Cobertura	Area (hectareas)	Porcentaje (%)
Arbustal	307129,64	49
Bosque y Vg secundaria	319627,52	5

de tipo arbustal, representando el 49% de la cobertura identificada, mientras que del bosque y la vegetación secundaria se obtuvo un total de 319627,52 hectareas , la cual representa el 51% de toda la cobertura de interés para el estudio.

En concordancia con lo manifestado por (Hesketh y Sánchez- Azofeifa 2014), respecto a reducir los problemas de variabilidad en las imágenes producto de de los bosques estacionarios, sería recomendable utilizar imágenes satelitales tanto de épocas secas como de lluvias en un mismo año para reconocer los cambios fenológicos y sucesionales, y más importante, reconocer el efecto de la fenología de la vegetación natural del bosque seco sobre la estimación del área de extensión de este bioma.

7.2 Análisis de fragmentación

Como primera mirada al análisis de la fragmentación, se realiza una clasificación general a las unidades que componen el paisaje según la situación ambiental (Phillips & Navarrete, 2009), que son:

- Coberturas no fragmentadoras: Son aquellas unidades naturales y seminaturales que existen dentro del área de estudio, las cuales permiten el flujo de la biota (Phillips & Navarrete, 2009). Sobre estas se realiza el análisis de fragmentación.

- Coberturas fragmentadoras: Son aquellas unidades transformadas que pueden alterar o impedir el flujo de la biota entre dos áreas; en estas se integran infraestructuras, cultivos y pastizales (Phillips & Navarrete, 2009).
- Superficies sin vegetación: Se incluye cuerpos de agua artificiales, ríos, tierras desnudas y zonas arenosas naturales.

Para el presente análisis se emplearon las coberturas de la tierra agrupadas de la siguiente manera: vegetación secundaria y bosques naturales con 315.119,70ha que equivale al 25,17% de la baja Guajira; y arbustales con 308.779,88ha equivalentes al 24,67%.

Tabla 5 Índices de fragmentación del bosque seco tropical en la baja Guajira

ÍNDICES DE FRAGMENTACIÓN			Vegetación secundaria y bosque natural	Arbustales
Nivel	Métrica de fragmentación	Distribución estadística		
Clase	ENN_MN (Distancia euclidiana al vecino más cercano)	Media	181,35	150,69
	NP (Número de parches)	Total	4839	6690
	AREA_MN (Área media del parche)	Media	65,46	46,21
	SHAPE_MN (Índice de forma)	Media	1,83	1,85
	FRAC_MN (Índice de dimensión fractal)	Media	1,10	1,10
	GYRATE_MN (Compacidad media de los fragmentos)	Media	135,87	129,35

7.2.1 Distancia euclidiana al vecino más cercano o “*Euclidean Nearest-Neighbor Distance*” (ENN)

Para las dos clases o coberturas evaluadas, se obtuvo que la vegetación secundaria y bosque natural presentaron un mayor distanciamiento euclidiano al vecino más cercano de 181,35m respecto al arbustal que presenta un distanciamiento de 150,69m. Los distanciamientos entre parches generar una afectación directa sobre la vida silvestre que albergan en estos

ecosistemas, donde los más afectados son los individuos de especies con movi­lidades más restringidas tales como herpetos y/o mamíferos de menor tamaño.

7.2.2 Área media del parche o “Mean patch area” (AREA_MN)

El área media del parche o tesela (AREA_MN) representa la extensión media de la clase evaluada, de manera que se obtuvo que la clase de vegetación secundaria y bosque natural cuenta con 315.119,70ha de hábitat disponible total y un área media de parche de 65,46ha, lo cual en porcentaje respecto al área total de la baja Guajira representa el 25,17%; dicho resultado no es alejado de los arbustales que tienen un área de 308.779,88ha total disponible y un área media de parche de 46,21ha que equivalen al 24,67% del área de estudio; la disminución del área media del parche y un aumento del número de teselas son una clara representación de la fragmentación en los ecosistemas naturales.

7.2.3 Número de teselas o “Patch Number” (NP)

Respecto a la métrica de fragmentación de número de parches, a pesar de no transmitir una información representativa por sí mismo, si permite presentar un análisis al compararla respecto al área total de cada una de las clases evaluadas. Se evidencia que las áreas de bosque seco tropical que se encuentran en la baja Guajira presentan valores altos respecto al área total (TA) que disponen, representando así un número de teselas de 4839 para la vegetación secundaria y bosque natural y de 6690 para los arbustales, dicho número de parches permiten inferir que los fragmentos y/o el área disponible de hábitat es pequeña respecto al área total. Los

arbustales son los que presentan un mayor número de fragmentos y un área total (TA) más baja, respecto a la clase de vegetación secundaria y bosque natural.

7.2.4 Compacidad media de los fragmentos o “*Mean Compaction*” (GYRATE_MN)

Respecto a la compacidad media de los fragmentos en el bosque seco tropical de la baja Guajira se obtuvo que para la cobertura o clase de vegetación secundaria y bosque natural el valor fue mayor respecto a los arbustales, siendo de 135,87 y 129,35 respectivamente; de manera que según con el análisis, los valores no son muy distantes entre ellos lo que permite evidenciar que las formas de los fragmentos tienden a presentar formas alargadas que se distribuyen por toda la baja Guajira; incluso la presencia de los bosques de galería y/o ripario en la clase de vegetación secundaria y bosques naturales, influye en el aumento de este índice respecto a los arbustales debido a la forma alargada típica de esta cobertura.

7.2.5 Índice de forma medio o “*Mean Shape Index*” (SHAPE_MN)

De acuerdo con el análisis realizado se obtiene como resultado que las dos clases evaluadas, correspondientes a la vegetación secundaria y bosque natural; y el arbustal presentan un SHAPE con valores cercanos a 1 siendo este de 1,83 para la vegetación secundaria y bosque natural y de 1,85 para el arbustal, lo que representa formas más deseables siendo vegetación secundaria y bosque natural el que presenta la forma más deseable.

7.2.6 Índice de dimensión fractal o “*Fractal Dimension Index*” (FRAC)

Complementando el análisis con el índice de forma, se encuentra que los cambios para este índice se muestran también para la dimensión fractal, donde la complejidad se ve disminuida para las dos clases evaluadas (vegetación secundaria y bosque natural), tomando valores de 1,10 para los dos clases superando en céntimas el índice, lo que representa una forma más compleja de este tipo de coberturas.

7.3 Índice de fragmentación

Para el cálculo del índice de fragmentación, se empleó el método propuesto por Gurrutxaga (2003), donde mediante los índices de número de parche (NP), total área (TA/CA) distancia euclidiana al vecino más cercano (ENN_MN) se obtuvo el índice de fragmentación para cada una de las teselas que componen el bosque seco tropical en la baja Guajira.

Tabla 6 Índice de fragmentación para el bosque seco tropical de la baja Guajira

CLASE	Índice de fragmentación
Vegetación secundaria y bosque natural	14,59
Arbustal	9,00

Para cada clase (vegetación secundaria y bosque natural; y arbustal), este índice se relaciona de forma inversa respecto a la fragmentación de la misma, de manera que, si el índice obtiene valores muy altos, esto significa que se presentó una disminución en el área total (TA) y que el número de parches y la distancia euclidiana aumentó. Para lo cual, los resultados obtenidos indican que la clase o cobertura de arbustal es la que menor fragmentación presenta

respecto a la vegetación secundaria y bosque natural que el índice se incrementa en más de 5 puntos.

8. Conclusiones

Con respecto al procesamiento digital de las imágenes, se logra concluir que en el caso de las áreas donde existe mayor información de píxeles en el periodo de análisis, se identifica con mayor facilidad cada una de las coberturas asociadas al bosque seco tropical; esto a su vez permite que el algoritmo utilizado para la clasificación supervisada, pueda lograr una mayor exactitud temática entre las clases de estudio, caso contrario ocurre cuando existe poca información de píxeles, lo cual no permite diferenciar entre las diferentes clases temáticas con respuesta espectral similar.

La selección de imágenes en periodo seco, no reduce los errores de variabilidad que se presentan en este tipo de ecosistemas, lo cual no debe ser una condicionante para la realización de futuros estudios relacionados.

Por otro lado, la composición de las cuatro bandas permite manejar varias combinaciones que facilitan la interpretación y clasificación de las diferentes coberturas, logrando de alguna manera disminuir los errores de confusión que se presentan en los ecosistemas de alta variabilidad estacionaria como son los bosques secos.

El bosque seco tropical en la baja Guajira está siendo sometido a procesos de fragmentación y disminución de las áreas totales disponibles (TA) debido a diferentes actividades antrópicas, especialmente agropecuarias, que están generando presión sobre los ecosistemas, lo cual se ve representado en los valores tan altos de número de teselas (NP) respecto al área media del parche (AREA_MN) donde en promedio las teselas del bosque seco tropical están representadas por polígonos con áreas entre 46,21ha y 65,46ha; y distanciados entre 150,69m y 181,35m, los cuales son el sitio de refugio, alimento y cría de gran cantidad de especies silvestres y permiten los flujos de dispersión entre parches hacia otras regiones del país

e incluso hacia Venezuela por la Serranía del Perijá; el aumento en el distanciamiento entre parches y la disminución del área media generaría que el flujo genético que existe actualmente en esta zona se vea afectado debido a que especies con distanciamientos de movilidad diaria más cortos no podrían desplazarse sobre áreas que han sido fragmentadas y transformadas en pasturas y/o cultivos. El índice de forma medio (SHAPE_MN) y el índice de dimensión fractal (FRAC_MN) presentan formas deseables en el bosque seco tropical de la baja Guajira, de manera que al presentar formas más compactas esto genera que la conformación de áreas núcleo sea mayor respecto a coberturas con formas más lineales, donde el efecto borde afecta la composición y estructura de estos ecosistemas. Los resultados obtenidos en el análisis no solo muestran la contribución en la disponibilidad del hábitat para especies de diferentes rasgos, sino también la importancia de cada tesela dentro de la red del paisaje, estos no solo proveen refugio, alimentación y cría, sino que también producen los flujos de dispersión a otras teselas de hábitat, y facilitan la dispersión entre teselas, a pesar de no ser el destino final en estos flujos de dispersión.

El índice de fragmentación permitió identificar que la clase de vegetación secundaria y bosque natural es la que presenta una mayor fragmentación respecto a los arbustales, lo cual está relacionado con los bienes y servicios que prestan estas coberturas leñosas en la zona, donde los mayores proveedores son los bosques naturales y la vegetación secundaria; no obstante, el panorama de fragmentación es el mismo para ambas clases, la expansión de la frontera agropecuaria y demás actividades antrópicas están generando presión sobre los ecosistemas naturales y el bosque seco tropical en la baja Guajira.

9. Recomendaciones

- Para la generación de coberturas asociadas al bosque seco tropical, se recomienda emplear imágenes tanto del periodo seco como del periodo lluvioso, esto con el fin de generar un compuesto mediano que disminuya los errores de variabilidad de la información que se presentan en los bosques estacionarios.
- Se recomienda realizar el proceso de normalización de las imágenes con el fin de homogenizar el compuesto o métrica utilizada para el proceso de clasificación.
- Se requiere la implementación de actividades de educación ambiental en la baja Guajira, donde se le brinde a las comunidades herramientas que les permita mantener sus ecosistemas naturales y se genere una gobernanza compartida entre las autoridades ambientales locales y los dueños de estos bosques.
- Se recomienda que las autoridades ambientales regionales generen procesos de fortalecimiento hacia los remanentes del bosque seco tropical y se genere información cartográfica que permita conocer el estado de este ecosistema en sus jurisdicciones.

10. Referencias

- Ahlqvist, O. (2008). Extending post-classification change detection using semantic similarity metrics to overcome. *Sensing of Environment*, 112: 1226–1241. DOI: 0.1016/j.
- Aizen, M. A., & Feinsinger, P. (1994). Forest Fragmentation, Pollination, and Plant Reproduction in a Chaco Dry Forest, Argentina. *Ecology*, Vol. 75, No. 2, 330-351.
- Alvarado-Solano, D. P. (2017). Áreas naturales de bosque seco tropical en el Valle del Cauca, Colombia: una oportunidad para la restauración. *Biota Colombiana 18 (Suplemento 1)*.; 9-34. DOI: 10.21068/c2017.v18s01a01.
- Anderson, A., & Jenkins, C. (2006). Applying Nature's Design: Corridors as a strategy for biodiversity conservation. *Columbia University Press*, New York, USA.
- ANLA. (2018). *Reporte de Alertas Zona Hidrográfica Caribe - Guajira*. Bogotá, Colombia.
- Arcila, A. V. (2012). Estado de fragmentación del bosque seco de la cuenca alta del río Cauca, Colombia. *Biota Colombiana*, 13(2): 86 – 101.
- Ariza, A., Isaacs, P., & González-M, R. (2014). *Memoria técnica para la validación del mapa de coberturas de bosque seco tropical en Colombia (escala 1:100.000, 2.0v)*. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos "Alexander von Humboldt" – Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Armenteras, D. N. (2011). Understanding deforestation in montane and lowland forests of the Colombian Andes. *Regional*, 11 (3): 693-705. DOI: 10.1007/.
- Báez, L., & Trujillo, F. (2014). *Biodiversidad en Cerrejón*. Colombia: Carbones de Cerrejón.
- Barquet, N. (2016). *Valoración del impacto económico ambiental del cultivo de maíz amarillo (Zea mays L.) durante la época seca en el bosque seco tropical de la provincia de Guayas, Ecuador*. Tumbes, Perú: Tesis Doctoral en Ciencias Ambientales, Universidad Nacional de Tumbes.
- Barraza, J. J. (2010). Ensamblaje de escarabajos coprófagos (Scarabaeidae) del bosque tropical seco Seco, Bahía Concha, Santa Marta (Colombia). *Revista Colombiana de Entomología*, 36 (2): 285–291.
- Borràs, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G., & Camps-Valls, G. (2017). Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2. *Revista de Teledetección*, 48 (1), 55-66.
- BRC, S. C. (2005). *Cobertura vegetal*. Obtenido de Banco de la república: http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/ciencias/cobertura_vegetal

- Burel, F., & Baudry, J. (2002). *Ecología del paisaje. Conceptos métodos y aplicaciones*. , . Madrid- Barcelona- México: Ediciones Mundi prensa. 353p.
- Chatfield, C. (2003). *The Analysis of Time Series: An Introduction*. Florida, E.E.U.U: Chapman & Hall/CRC Press.
- Chávez, H., González, M., & Hernández, P. (2014). Metodologías para identificar áreas prioritarias para conservación de ecosistemas naturales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. Vol.6 (27), 8-23.
- Cocero, D., Azcárate, M., García, F., Muguruza, C., & Santos, J. (2010). Análisis de la evolución de la estructura espacial del uso del suelo residencial en el área metropolitana madrileña. *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*, 777-787.
- CORPOGUAJIRA. (2001). *Plan de Gestión Ambiental Regional del departamento de La Guajira*. Rohacha, La Guajira.
- Crooks, K., & Sanjayan, M. (2006). *Connectivity conservation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Di Gregorio, A., & LJM, J. (2005). *Land cover classification system classification concepts and user manual software*. Rome, Italia: EaNRS. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Echeverry, M. A. (2006). Análisis de un paisaje fragmentado como herramienta para la conservación de la biodiversidad en áreas de bosque seco y subhúmedo tropical en el municipio de Pereira, Risaralda Colombia. *Scientia Et Technica*, 12(30): 405-410.
- Esri. (28 de noviembre de 2021). *¿Qué es la clasificación de imagen?* Obtenido de ArcGIS for Desktop: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/guide-books/extensions/spatial-analyst/image-classification/what-is-image-classification-.htm>
- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology. Evolution and Systematics* 34, 487-515.
- François, J., & Sandoval, C. (2000). Análisis de la fragmentación del paisaje en el área protegida "Los Petenes", Campeche, México. . *Investigaciones Geográficas. Boletín del instituto de Geografía, UNAM*. 43,, 42-59.
- Galindo, G., Espejo, J., Rubiano, O., Vergara, K., & Cabrera, E. (2014). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia*. V 2.0. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.

- Galvan-Guevara, S., Ballut-Dajut, G., & De La Ossa-V, J. (2015). Determinación de la fragmentación del bosque seco del arroyo Pechelín, Montes de María, Caribe, Colombia. *Biota Colombiana*, 149-157.
- García, H., Corzo, G., Isaacs, P., & Etter, A. (2014). Distribución y estado actual de los remanentes del bioma de bosque seco tropical en Colombia: Insumos para su gestión. En C. Pizano, & H. García, *El bosque seco tropical en Colombia* (págs. 230-253). Bogotá D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH).
- Gómez-M., A. A.-D. (2005). Análisis de fragmentación de los ecosistemas boscosos en una región de la Cordillera Central de los Andes colombianos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 4(7): 413-27.
- Gurrutxaga, M. (2003). *Índices de fragmentación y conectividad para el indicador de biodiversidad y paisaje de la CAPV*.
- Gurrutxaga, M., & Lozano, P. (2012). Efectos de la fragmentación de hábitats y pérdida de conectividad ecológica dentro de la dinámica territorial. . *Polígonos. Revista de Geografía, [S.I.]*, n. 16, 35-54.
- IAvH. (1997). *Caracterización ecológica de cuatro remanentes de Bosque seco Tropical de la región Caribe colombiana*. . Bogotá, Colombia: 13p.
- IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología Corine Land Cobert adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Bogotá, D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM, IGAC, IAvH, INVEMAR, SINCHI, & IIAP. (2007). *Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico Jhon von Neumann, Instituto de Investigaciones Científicas Sinchi*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- López, F. (2017.). *Análisis de Conectividad Espacial y Fragmentación de la Ecorregión Ciénaga Grande de Santa Marta*. Bogotá, Colombia: Trabajo de grado Especialización en Geomática, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada.
- Lozano, L. G. (2011). Estado de fragmentación de los bosques naturales en el norte del departamento del Tolima-Colombia. *Revista Tumbaga*. , 6: 125-140.
- McGarigal, K., & Marks, B. (1994). *Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure FRAGSTAT*. Oregon.

- McGarigal, K., Cushman, S. A., Neel, M. C., & Ene, E. (2002). *FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for categorical maps*.
- Miles, L., Newton, A., Defries, R., Ravilious, C., May, I., & Blyth, S. (2006). A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *J Biogeogr*, 491-505.
- Miller, H. M. (2013). *Users, Uses, and Value of Landsat Satellite Imagery—Results from the 2012 Survey of Users*. Virginia: U.S. Geological Survey Open-File Report 2013 1269. U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey.
- MINAE, C. (2008). *Decreto Ejecutivo N° 34433-MINAE. La Gaceta. Diario Oficial. San José, CR. abr. 8:2-11. (No. 68). (Reglamento a la Ley de Biodiversidad)*. San José, Costa Rica.
- Minambiente. (2021). *El bosque seco tropical*. Obtenido de Ministerio de Ambiente: <https://www.minambiente.gov.co/direccion-de-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos/bosque-seco-tropical/>
- Natura, F. (24 de septiembre de 2020). *Una aproximación al ecosistema de Bosque Seco Tropical, uno de los más transformados en Colombia*. Obtenido de Fundación Natura Colombia|: <https://natura.org.co/una-aproximacion-al-ecosistema-de-bosque-seco-tropical-uno-de-los-mas-transformados-en-colombia/>
- Otero, E., Mosquera, L., Silva, G., & Guzmán, J. (2006). *Bosque seco tropical en Colombia*. Cali, Colombia: Libros de la Colección Ecológica del Banco de Occidente.
- Pennington, R., Lavin, M., & Oliveira-Filho, A. (2009). Woody Plant Diversity, Evolution, and Ecology in the Tropics: Perspectives from Seasonally Dry Tropical Forests. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 40:437-457.
- Phillips, J., & Navarrete, D. (2009). *Análisis de fragmentación y conectividad. Plan de Manejo Ambiental. UT Rastrojo a escala humana INSAT*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.
- Pizano, C., & García, H. (2014). *El bosque seco tropical en Colombia*. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Pizano, C., González-M, R., López-Camacho, R., Jurado-B, R., Cuadros, H., Castaño-Naranjo, A., . . . García, H. (2016). El bosque seco tropical en Colombia. Distribución y estado de conservación. 10.21068/B001.2015.202.
- Quesada, M., Sanchez, A., Alvarez, M., Stoner, K., Avila, L., Calvo, J., . . . Sayago, R. (2009). Succession and management of tropical dry forests in the Americas: Review and new perspectives. *Forest Ecology and Management*, 258: 1014-1024.

- Rincón-Romero, M., Jarvis, A., & Mulligan, M. (2012). Cobertura vegetal en Colombia. *Renata*, 12-26.
- Rodríguez, N., Armenteras, D., Morales, M., & Romero, M. (2004). Ecosistemas e los Andes colombianos. *Instituto e Investigación e Recursos Biológicos Alexander von Humboldt*, Bogotá D.C.
- Ruchi, P. (2021). Paper plans and possibility: A critical analysis of landscape conservation policy in the Mesoamerican Biological Corridor. *Environmental Development. Volume 37*. ISSN 2211-4645, <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100600>.
- Salom-Pérez, R., Corrales-Gutiérrez, D., Araya-Gamboa, D., Espinoza-Muñoz, D., Finegan, B., & Petracca, L. (2021). Forest cover mediates large and medium-sized mammal occurrence in a critical link of the Mesoamerican Biological Corridor. *PLoS ONE*, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249072>.
- Santos, T., & Tellería, J. (2006). Pérdida y fragmentación del hábitat: efecto sobre la conservación de las especies. *Ecosistemas 15 (2)*, 3-12.
- Saunders, D., Hobbs, R., & Margules, C. (1991). Biological consequences of ecosystem fragmentation: A review. *Conservation Biology 5*, 18-32.
- Tang, J. K. (2012). *Multitemporal analysis of forest fragmentation in the upstream region of the Nenjiang River Basin*. Northeast, China: Ecological Indicators.
- Tarrasón, D. U. (2010). Conservation status of tropical dry forest remnants in Nicaragua: Do ecological indicators and social perception tally?. *Biodiversity and Conservation*, 19(3), 813-.
- Toro Espín, N., Gomariz-Castillo, F., Cánovas-García, F., & Alonso-Sarría, F. (2015). Comparación de métodos de clasificación de imágenes de satélite en la cuenca del río Argos (Región de Murcia). *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 67(1), 327–347. <https://doi.org/10.21138/bage.1828>.
- Turner, I. (1996). Species loss in fragments of tropical rain forest: a review of the evidence. *Journal of Applied Ecology 33*, 200-205.
- Vargas-Sanabria, D., & Campos-Vargas, C. (2018). Sistema multi-algoritmo para la clasificación de coberturas de la tierra en el bosque seco tropical del Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 31(1), 58-69.
- Vásquez, S., & Correa, H. (1992). *Los Wayuu. Geografía humana de Colombia: Nordeste indígena*. Bogotá D.C.: Instituto Colombiano de Cultura Hispánica. Colección: Quinto Centenario.

- Vela-Vargas, M., & Pérez-Torres, J. (2012). Murciélagos asociados a remanentes de bosque seco tropical en un sistema de ganadería extensiva (Colombia). *Chiroptera Neotropical* 18(1), 1089-1100.
- Vila, J., Varga, D., Llausás, A., & Ribas, A. (2006). *Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology) una interpretación desde la Geografía*. . Documents d'anàlisi Geogràfica, 48(1), : 151-166.
- Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* 118, 83–94.
- Zubelzu, S., & Allende, F. (2014). El concepto de paisaje y sus elementos constituyentes: requisitos para la adecuada gestión del recurso y adaptación de los instrumentos legales en España. DOI: <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n1.41369>.