

CUANTIFICACIÓN DE LA VARIACIÓN EN LAS COBERTURAS VEGETALES EN EL MUNICIPIO DE CALAMAR (GUAVIARE) MEDIANTE EL ANÁLISIS MULTITEMPORAL CON EL INDICE NDVI



ELKIN MAURICIO ROMERO AROCA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

ESPECIALISTA EN PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO INTEGRAL DE LOS RECURSOS NATURALES

Director:

Ximena Lucia Pedraza Nájjar

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERIA

**ESPECIALIZACION EN PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO INTEGRAL DE LOS RECURSOS
NATURALES**

BOGOTÁ, 2018

CUANTIFICACIÓN DE LA VARIACIÓN EN LAS COBERTURAS VEGETALES EN EL MUNICIPIO DE CALAMAR (GUAVIARE) MEDIANTE EL ANÁLISIS MULTITEMPORAL CON EL INDICE NDVI¹

QUANTIFICATION OF VARIATION IN VEGETABLE COVERAGE IN THE MUNICIPALITY CALAMAR (GUAVIARE) THROUGH MULTITEMPORAL ANALYSIS WITH INDEX NDVI

Elkin Mauricio Romero Aroca

Ingeniero Catastral y Geodesta, Estudiante de la Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de Los Recursos Naturales, Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá DC, Colombia,
mauricio.romero83@gmail.com, u2700882@unimilitar.edu.co

ABSTRACT

The present work seeks to identify some areas within the municipality of Calamar in the department of Guaviare, where with a multi-temporal study get the changes in the coverage identified from the use of geomatics tools and the use of the normalized difference vegetation index (NDVI for its acronym in English). For this making the digital processing of the images of the Landsat 5, 7 and 8 programs. Additionally, its analysis to determine if the vegetation presented changes of improvement or deterioration in its health, in which case it can be associated with deforestation. The purpose is that a municipality can determine the dynamics of this type of phenomena, carry out local control and monitoring to promote in the community practices of conservation and recovery of dense forest areas.

Keywords: normalized difference vegetation index (NDVI), vegetal degradation, land management.

¹ Normalized Difference Vegetation Index

RESUMEN

El presente trabajo busca identificar algunas áreas dentro del municipio de Calamar en el departamento del Guaviare, donde con un estudio multitemporales se obtenga los cambios en las coberturas identificadas a partir del uso de herramientas de geomática y del uso del índice de diferenciación normalizada de vegetación (NDVI por sus siglas en inglés). Para este se realiza el procesamiento digital de las imágenes de los programas Landsat 5, 7 y 8. Adicionalmente su análisis para determinar si la vegetación presento cambios de mejoramiento o desmejoramiento en su salud, en cuyo caso puede ser asociado a la deforestación. La finalidad es la de que un municipio pueda determinar la dinámica de este tipo de fenómenos, realice control y monitoreo local para promover en la comunidad prácticas de conservación y recuperación de las áreas de bosque denso.

Palabras Claves: índice de diferenciación normalizada de vegetación (NDVI), degradación vegetal, gestión del territorio.

INTRODUCCIÓN

“El 63,2 por ciento de este territorio de la Amazonia colombiana debería ser intocable por su importancia ambiental. Sin embargo, la ganadería, la explotación de caucho y hasta los cultivos ilícitos, han afectado estos terrenos.” Así lo resalta el IGAC en su estudio general de suelos y zonificación de tierras para el departamento del Guaviare [1]. La deforestación ha venido en aumento debido a la dinámica del desarrollo humano, Geist y Lambin proponen como componentes de este fenómeno los factores próximos como infraestructura, agricultura o la extracción maderable y subyacentes como demografía, factores económicos, tecnología, cultural, política e institucional [2]. En los últimos años se ha identificado en las selvas del departamento de Guaviare una reducción considerable de la cobertura vegetal de bosques, principalmente por los incendios provocados por un sector de la población que la prensa la reconoce como mafia de la deforestación, debido a que presenta un interés por ampliar el espacio donde pueda darse usos como la ganadería y la minería sin controles del estado [3]. Además, es necesario entender las características en los procesos de deforestación como el ahuyentamiento de especies, el estado de la biodiversidad, la interacción del humano, la restauración ecológica y tipos de hábitat [4], donde se produce fragmentación presentando patrones en formas geométricas, de corredores, espina de pez, difuso, radial o isla. Adicionalmente se hace más probable la deriva genética debido al impacto que se causa a la reducción del espacio de las especies [5].

Se muestra en el artículo periodístico de EL TIEMPO “La selva del Guaviare, la otra víctima del posconflicto” un análisis de la deforestación presente en 2017. Ubica espacialmente las zonas deforestadas, además se menciona los efectos que ha tenido esta problemática en la comunidad, presentando hechos de violencia. [6], pero no se especifica la metodología usada para determinar tales áreas. También existe un análisis estadístico por la importancia de este fenómeno en los

departamentos de Caquetá y Putumayo, implementando herramientas de geomática con los productos de sensores remotos del programa Landsat para estimar la reducción de los bosques en los departamentos del Caquetá y Putumayo, donde se rebela que esta área ha sufrido una reducción del 5.2% con una tasa anual de deforestación del 0.46%, donde alarma el hecho que en Caquetá la cifra es de 0.77% [7]. Se debe entender y tomar estas dinámicas en la población como medida para organizar y promover actividades económicas y culturales para prevenir el deterioro de los componentes bióticos, abióticos y sociales. Identificando si se tiene alguno de los posibles factores de aceleración del fenómeno de deforestación, como son la usurpación de predios baldíos, el postconflicto y sus desafíos como los cambios en el uso del suelo debido a que no se encuentran actores armados en las zonas, inversiones para quemas y talas aun sobre áreas protegidas, mejoramiento de conectividad con los centros poblados, flexibilidad de las notarías para compras de tierras, intereses especulativos y por último la implementación de programas de incentivos que incentivan la deforestación [8]. De forma local, es decir, los municipios podrían tomar la metodología para hacer control y gestión de su territorio, con el fin de controlar y monitorear la calidad de la vegetación.

El NDVI (normalized difference vegetation index) ha sido usado para investigaciones en diferentes lugares para la identificación de la diferencia que existe de cobertura vegetal entre dos épocas [9]. Este estudio implementara metodologías de geomática para identificar el área degradadas o donde se mantiene la condición inicial, al contrastar la información almacenada en imágenes satelitales del año 2010 contra imágenes del 2018 [10].

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El municipio de CALAMAR está ubicado en el departamento de Guaviare, entre aproximadamente las coordenadas en el origen Bogotá de 1.050.000 y 1.200.000 metros Este, 600.000 y 750.000 metros Norte, El municipio de Calamar es uno de los municipios con mayor índice de deforestación según el IDEAM en su informe de 2017 [8]. Dentro de este territorio se tiene el parque nacional natural de Serranía de Chiribiquete, como se muestra en la Figura 1 [11]. Se elabora este estudio entre los años 2010 y 2018, para mostrar la afectación por la degradación de la cobertura vegetal, para finalmente identificar estas áreas.

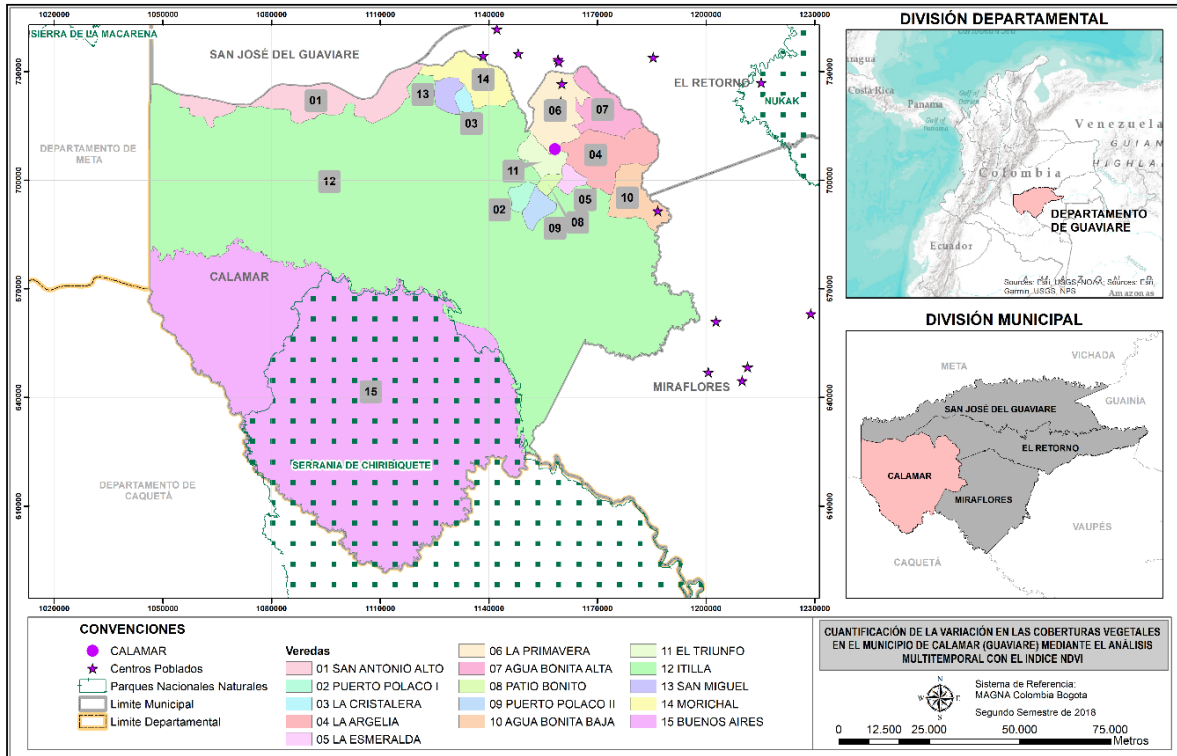


Figura 1 Localización y División Veredal del Municipio Calamar
Fuente: Elaboración propia, 2018.

Imágenes Satelitales e Inventario

Las imágenes satelitales son un arreglo bidimensional en donde cada celda o pixel contiene un valor finito de reflectancia conocidos como niveles digitales. En este caso se usan imágenes de los programas de Landsat, Este se encuentra capturando información desde julio de 1972, con su sensor MSS del programa Landsat 1, el cual se encontraba a una altura de 920 km y termino su misión en 1978. Después del Landsat 1 se producen Landsat 2, 3, 4 y 5. Este último el más exitoso y que tiene record por ser el sensor más longevo orbitando el planeta tierra, luego se encuentran el lanzamiento de Landsat 6, 7 y 8 a continuación se relaciona la línea de tiempo de estos programas.

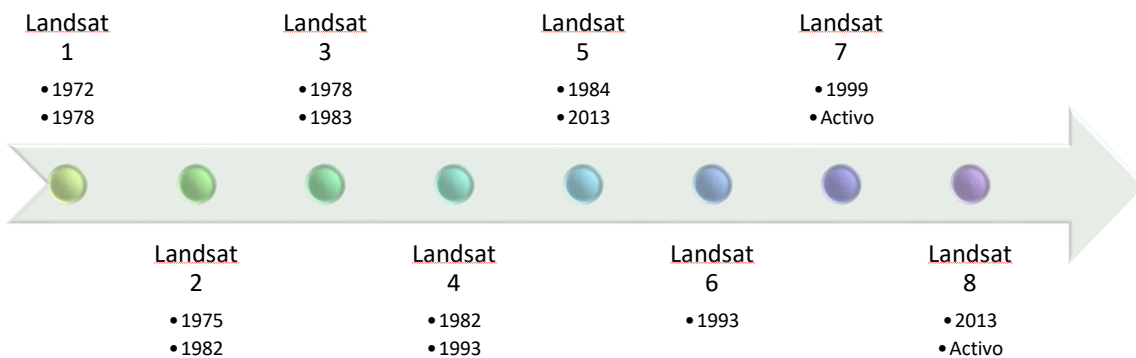


Figura 2 Línea de Tiempo de Misión Landsat [12]
Fuente: Elaboración propia a partir información de Esri, 2018.

Se relacionará un cuadro donde se expone las diferentes imágenes consultadas y con sus condiciones de resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal, en este caso son las imágenes del Programa LANDSAT, cuyas características son [13] [14]:

Tabla 1 Características de los Programas de Landsat

Misión	Landsat 5		Landsat 7		Landsat 8	
Resolución Espacial	15m - 120m		15m - 30m - 60m		15m - 30m - 100m	
Resolución Espectral (Longitudes de Onda)	Banda 1	0.45µm-0.52µm	Banda 1	0.45µm-0.515µm	Banda 1	0.433µm-0.453µm
	Banda 2	0.52µm-0.60µm	Banda 2	0.525µm-0.605µm	Banda 2	0.450µm-0.515µm
	Banda 3	0.63µm-0.69µm	Banda 3	0.63µm-0.69µm	Banda 3	0.525µm-0.60µm
	Banda 4	0.76µm-0.90µm	Banda 4	0.775µm-0.90µm	Banda 4	0.63µm-0.68µm
	Banda 5	1.55µm-1.75µm	Banda 5	1.55µm-1.75µm	Banda 5	0.845µm-0.885µm
	Banda 6	10.4µm-12.5µm	Banda 6	10.4µm-12.5µm	Banda 6	1.56µm-1.66µm
	Banda 7	2.08µm-2.35µm	Banda 7	2.08µm-2.35µm	Banda 7	2.10µm-2.30µm
			Banda 8	0.52µm-0.90µm	Banda 8	0.50µm-0.68µm
			Banda BQA	0.52µm-0.90µm	Banda 9	1.36µm-1.39µm
			Banda 6	Resampled	Banda 10	10.30µm-11.30µm
					Banda 11	11.50µm-12.50µm
Resolución Radiométrica	8 bits		8 bits		12 bits	
Resolución Temporal	16 Días		16 Días		16 Días	

Fuente: Elaboración propia a partir de información del programa Landsat. 2018.

Adicionalmente, se filtra las imágenes en earth explorer por factores como el porcentaje de nubosidad, path – row o identificador usado por los sensores remotos [15].

Tabla 2 Relación de Imágenes Seleccionadas

Temporalidad año 2010						
Imágenes Consultadas LANDSAT						
PATH	ROW	Fecha de Captura	Misión	Sensor	Nubosidad	Identificación de Imagen
006	059	24/01/2010	LANDSAT 5	TM	48%	LT05_L1TP_006059_20100124_20161017_01_T1
007	059	31/01/2010	LANDSAT 5	TM	2%	LT05_L1TP_007059_20100131_20161017_01_T1
007	058	23/01/2010	LANDSAT 7	ETM L1T	5%	LE07_L1TP_007058_20100123_20161215_01_T1
Temporalidad año 2018						
Imágenes Consultadas LANDSAT						
PATH	ROW	Fecha de Captura	Misión	Sensor	Nubosidad	Identificación de Imagen
006	059	10/08/2018	LANDSAT 8	OLI TIRS L2T	10.44%	LC08_L1TP_006059_20180810_20180815_01_T2
007	059	22/02/2018	LANDSAT 8	OLI TIRS L1T	32.92%	LC08_L1TP_007059_20180222_20180308_01_T1
007	058	22/02/2018	LANDSAT 8	OLI TIRS L1T	20.94%	LC08_L1TP_007058_20180222_20180308_01_T1

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En esta cartografía podemos observar el cubrimiento de las imágenes respecto al municipio de Calamar

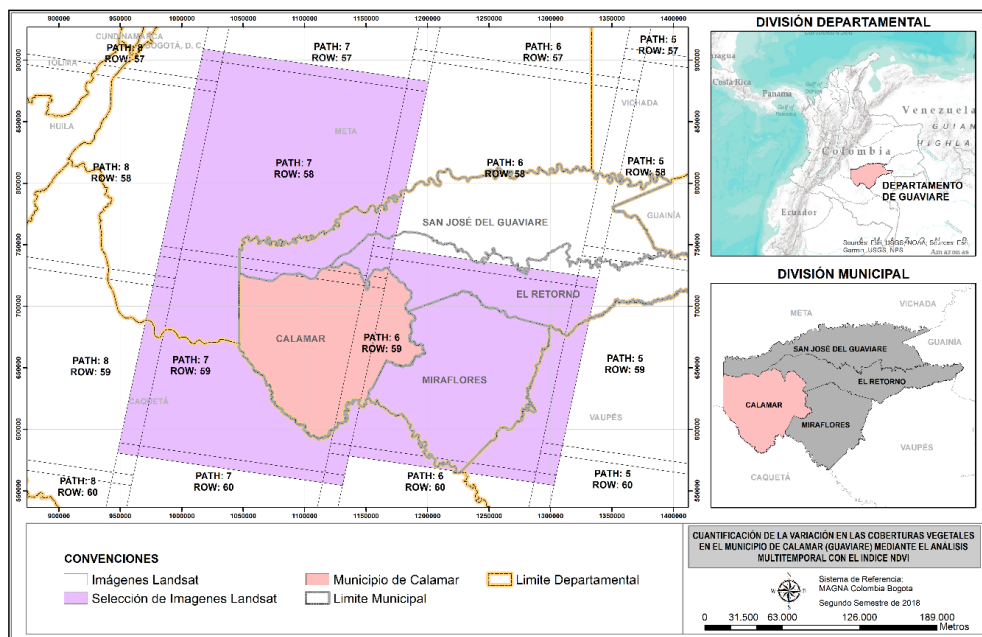


Figura 3 Cubrimiento de Imágenes Landsat al Municipio Calamar
Fuente: Elaboración propia a partir de información del programa Landsat. 2018.

Procesamiento Digital de Imágenes

Partiendo del conocimiento previo de los procesos de energía que llevan a cabo los sensores remotos se realiza [16] la clasificación de las coberturas y posteriormente el cálculo de las áreas deforestadas mediante el NDVI se tienen que realizar el procesamiento digital de las imágenes seleccionadas, donde se aplica las correcciones atmosféricas de los niveles digitales (ND), en cada uno de los sensores TM, ETM+ y OLI de Landsat. Para esto es necesario usar algunas ecuaciones y factores de escalamiento.

El primer proceso es la calibración de ND a radiancia en los sensores TM y ETM+, donde se usa la ecuación (1), reemplazando las variables por la información que viene en el metadato para cada una de las bandas de cada imagen

$$L\lambda = \left(\frac{LMax\lambda - LMin\lambda}{QCalMax - QCalMin} \right) * (ND - QCalMin) + LMin\lambda \quad (1)$$

Lo que es igual a la ecuación (2)

$$L\lambda = \left(\frac{RADIANCE_MAXIMUM_BAND_x - RADIANCE_MINIMUM_BAND_x}{255 - 1} \right) * (ND - 1) + RADIANCE_MINIMUM_BAND_x \quad (2)$$

Para la misma calibración del sensor OLI se usa la ecuación (3)

$$L\lambda = M_L * ND + A_L \quad (3)$$

Que al reemplazarlo es igual a la ecuación (4)

$$L\lambda = RADIANCE_MULT_BAND_x * ND + RADIANCE_ADD_BAND_x \quad (4)$$

Luego de tener el resultado de estos cálculos, se pasan los valores a reflectancia mediante la siguiente ecuación (5) para el sensor TM y ETM+.

$$\rho_p = \frac{\pi * L\lambda * d^2}{ESUN_\lambda * \cos \theta_s} \quad (5)$$

Reemplazando se obtiene la ecuación (6)

$$\rho_p = \frac{3.14159 * L\lambda * d^2}{ESUN_\lambda * \cos \theta_s} \quad (6)$$

d = Distancia en unidades astronómicas por día del año ubicadas en la tabla 6 del artículo "Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors" [13]

Tabla 3 Datos ESUN para el sensor TM del Landsat 5 y ETM+ de Landsat 7

BANDA	1	2	3	4	5	7
ESUN (TM)	1983	1796	1536	1031	22	83
ESUN (ETM+)	1997	1812	1533	1039	231	85

Fuente: Elaboración propia a partir de información del programa Landsat. 2018.

θ = Se debe pasar a radianes el valor del SUN ELEVATION y luego restarlo con el ángulo de 90°.

Para el caso del sensor OLI se tiene la ecuación (7)

$$\rho\lambda' = M\rho * Qcal + A\rho \quad (7)$$

Luego reemplazamos en la ecuación (8)

$$\rho\lambda' = REFLECTANCE_MULT_BAND_x * L\lambda + REFLECTANCE_ADD_BAND_x \quad (8)$$

Finalmente tenemos la ecuación (9)

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\sin \theta} \quad (9)$$

θ = SUN ELEVATION

Estos procesamientos se realizaron mediante las herramientas del software Envi 5.1, específicamente con para el paso de los niveles digitales a Radiancia se debe usar el toolbox Corrección Radiométrica>Calibración Radiométrica luego se deben procesar el resultado del anterior proceso con el toolbox Modulo de Corrección Atmosférica>FLAASH Corrección Atmosférica.

En el caso de las imágenes Landsat 7 se tiene presencia de un error desde el 31 de mayo de 2003 en el sensor ETM+, es conocido como "SLC-off Products" donde se tiene un patrón en zig-zag donde no se captura información del terreno, estas zonas se hacen más amplia al llegar a los bordes de la imagen. Para la imagen LE07_L1TP_007058_20100123_20161215_01_T1 se considera no realizar la corrección de estos vacíos de información, ya que es común que las mismas presenten unas distorsiones de información considerables al estar en los bordes de una imagen, para este caso de estudio se debe usar el borde inferior derecho de la imagen y esta es la razón para no realizar la corrección de este problema.

Con estos resultados se puede realizar la clasificación de las coberturas y el NDVI usando el software Envi 5.1.

Clasificación de coberturas

Para la clasificación de las coberturas según CORINE LAND COVER para Colombia se usó de guía el libro elaborado por el IGAC, IDEAM, CORMAGDALENA. Donde se expone los diferentes tipos de coberturas de la tierra encontrados en la zona de las cuencas Magdalena y Cauca [17].

Calculo del NDVI

Es uno de los índices usados para identificar la cobertura vegetal mediante sensores remotos presente en un área de estudio, en este caso dentro del municipio de Calamar. Mediante la ecuación (10) se opera las bandas de los sensores remotos que son sensibles a las características de la vegetación, para obtener el índice

$$NDVI = \frac{\text{Infrarojo cercano} - \text{Rojo}}{\text{Infrarojo cercano} + \text{Rojo}} \quad (10)$$

en el caso del infrarojo cercano es sensible a las células de las plantas y al contenido de agua, mientras que por la banda del rojo es sensible a la clorofila. El resultado de este cálculo se tiene un valor único por pixeles donde se tiene un rango entre -1 y 1. Finalizado el cálculo del NDVI para cada una de las imágenes se realiza la diferencia entre la temporalidad del año 2010 y 2018 para identificar las zonas con pérdida de cobertura vegetal de bosque para identificar las zonas con presencia de degradación vegetal [18]. Este método es similar al realizado en la identificación de cambios de coberturas en la zona de la hidroeléctrica de Sogamoso, desarrollado en la clase de procesamiento digital de imágenes de la universidad distrital Francisco José de Caldas, en el año 2015, donde se usó el índice NDWI con el fin de analizar el área que había cambiado a la cobertura del embalse [19]

RESULTADOS


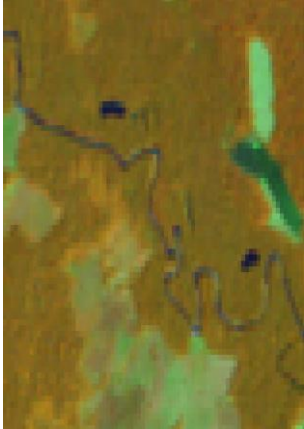


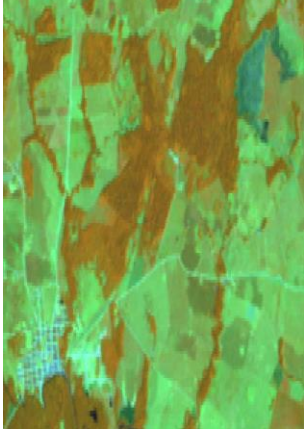
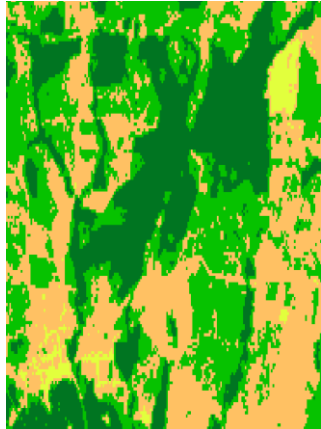
Se realiza el procesamiento digital de imágenes, los cálculos se realizaron sobre un recorte de las imágenes, sin superar los 40km², con el fin de que el resultado final del procesamiento y del índice del NDVI se obtuvieran valores congruentes, para la clasificación del NDVI se usa los intervalos de valores con rangos de 0.25 y a estos intervalos a su vez se le asigna una clasificación según la metodología de CORINE LAND COVER Colombia desarrollada por el IDEAM² y el IGAC³. Se relaciona en la (Tabla 3) combinaciones de las bandas de la imagen, donde tenemos la combinación de falso color estándar (4,3,2) lo que quiere decir que se ubica por el cañón del rojo la banda 4 o de infrarojo cerca, mientras que por el cañón del verde se agrega la banda 3 o de rojo, y para finalizar se agrega por el cañón del azul la

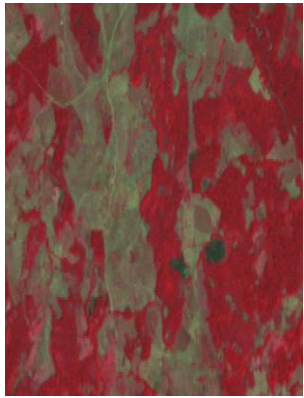
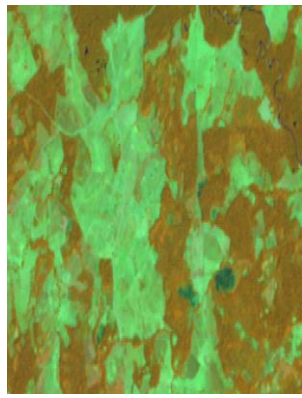
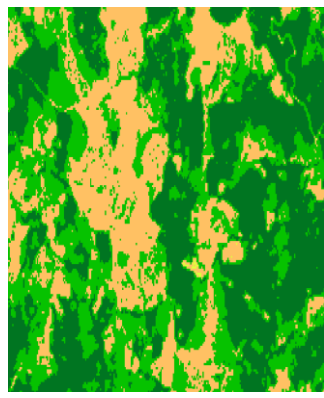

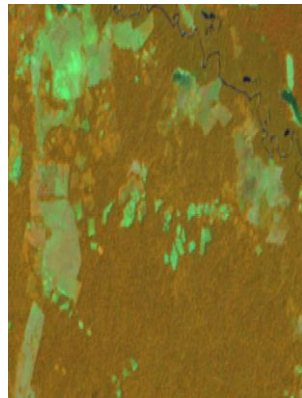
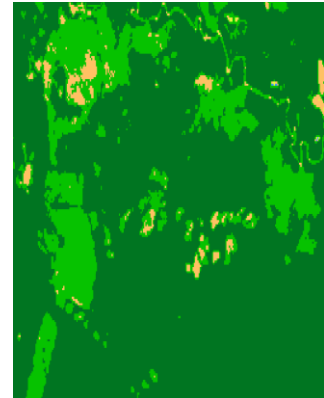
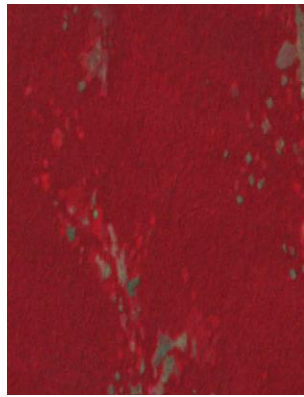
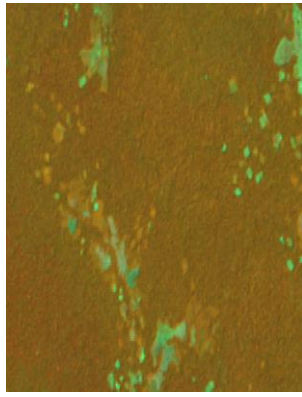
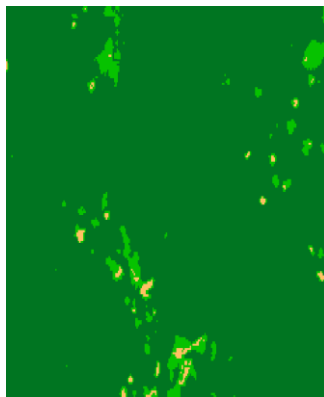
² Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

³ Instituto Geográfico Agustín Codazzi

banda 2 o de verde, esta combinación permite identificar la calidad de la vegetación. Adicionalmente para tener diferentes fuentes de información se usa la combinación (4,5,3) la cual es la usada en el documento de clasificación CORINE LAND COVER y tener el mismo punto de comparación para las unidades de las coberturas. Finalmente tenemos el resultado del NDVI asociado a un tono que se adiciona al relleno de la celda del nombre, es decir, en el caso de la clasificación de tejido urbano continuo se da el tono amarillo para identificarlo.

Tabla 4 Clasificación del NDVI en coberturas de CORINE LAND COVER Colombia

INDICE	CLASIFICACIÓN	IMAGEN (4,3,2)	IMAGEN (4,5,3)	NDVI
< 0	Embalses y cuerpos de agua			
0,25	Tejido urbano continuo y Tierras desnudas o degradadas			

0,5	Pastos limpios, Pastos arbolados y Pastos enmalezados o enrastrajados			
0,75	Arbustos, matorrales y Bosque de galería y/o ripario			
1	Bosque natural denso			

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la figura 4, se puede observar la distribución de esta clasificación dentro del área del municipio de Calamar, donde tenemos en la parte izquierda la imagen en la combinación de bandas (4,3,2) y en la parte derecha tenemos el índice de diferenciación normalizada de vegetación (NDVI en sus siglas en inglés). Realizando los geoprocesamiento en ArcGIS para obtener el NDVI con esta nueva clasificación mediante la herramienta de “Reclassify” y luego haciendo un “Clip” para obtener solo los valores que estén dentro del municipio tenemos que el área analizada para la imagen 006 – 059 es de 855,88 km², para la imagen 007 – 059 es de 1222,46 km² y en la imagen 007 - 058 es de 54,19 km² los cuales se distribuyen por cobertura como se muestra en la (Tabla 5):

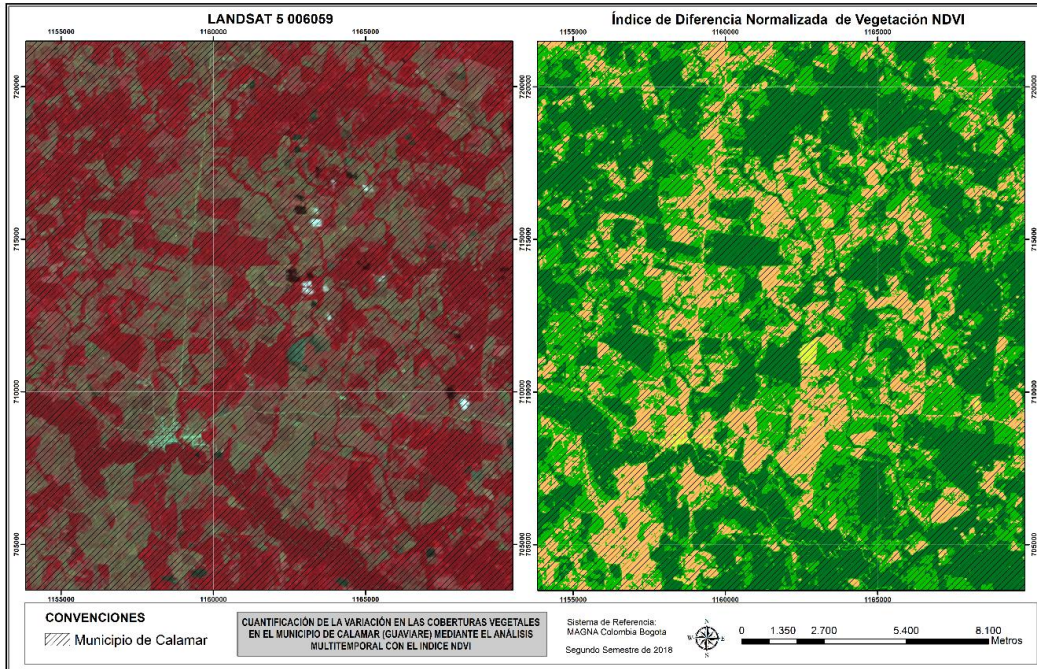


Figura 4 Clasificación Temporalidad 2010 del NDVI en Coberturas CORINE LAND COVER Colombia
Fuente: Elaboración propia, 2018.

Tabla 5 Área en Km2 y porcentaje para cada una de las coberturas para el año 2010

CORINE LAND COVER Coi	Embalses y cuerpos de agua (KM2)	Tejido urbano continuo y Tierras desnudas o degradadas (KM2)	Pastos limpios, Pastos arbolados y Pastos enmalezados o enrastrojados (KM2)	Arbustos, matorrales y Bosque de galería y/o ripario (KM2)	Bosque natural denso (KM2)	AREA TOTAL (KM2)
006-059	0.016	1.199	109.323	230.960	514.383	855.881
006-059 %	0.00%	0.14%	12.77%	26.99%	60.10%	100%
007-059	0.004	1.129	51.472	127.121	1042.734	1222.460
007-059 %	0.00%	0.09%	4.21%	10.40%	85.30%	100%
007-058	0	0.011	4.570	20.887	28.722	54.190
007-058 %	0.00%	0.02%	8.43%	38.54%	53.00%	100%
AREA TOTAL (KM2)	0.019	2.341	165.535	379.341	1587.294	2134.530
AREA TOTAL (%)	0.00%	0.11%	7.76%	17.77%	74.36%	100%

Fuente: Elaboración propia, 2018.

El mismo ejercicio fue realizado para las imágenes de la temporalidad de 2018, con el fin de tener las mismas unidades, se relaciona las áreas ocupadas por cada una de las clasificaciones según lo anteriormente expuesto. Se tiene que el área analizada corresponde a un 15% del total del territorio del municipio de Calamar, debido a que este cuenta con 14100,1 km².

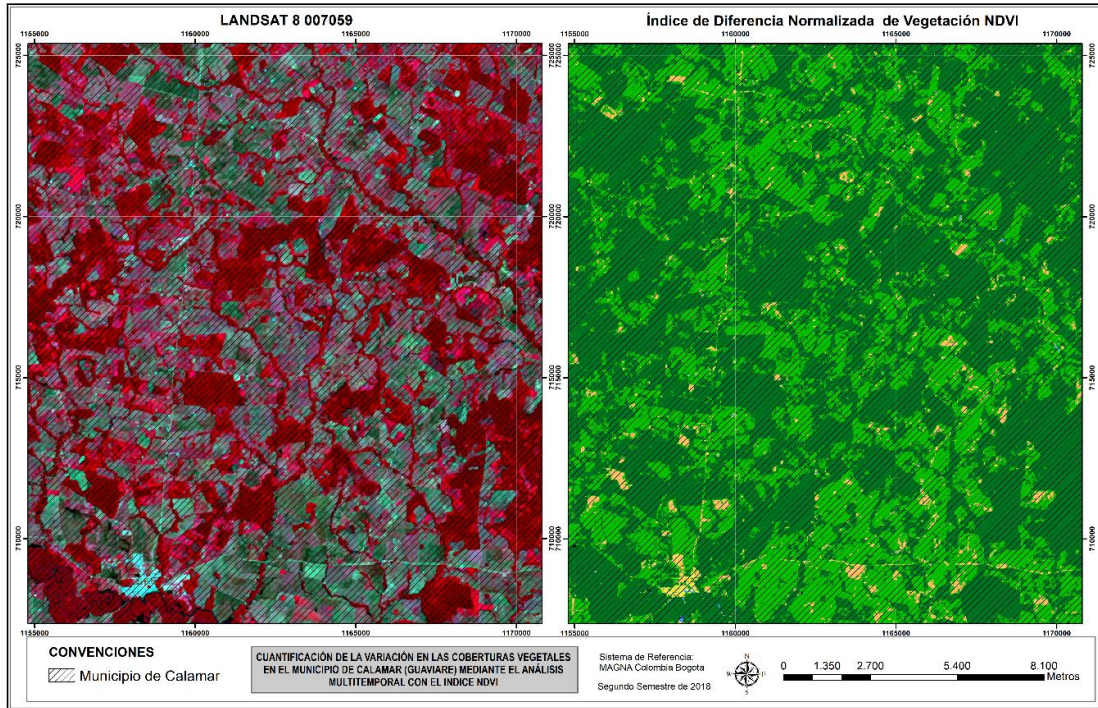


Figura 5 Clasificación Temporalidad 2018 del NDVI en Coberturas CORINE LAND COVER Colombia
Fuente: Elaboración propia, 2018.

Tabla 6 Área en Km² y porcentaje para cada una de las coberturas para el año 2018

CORINE LAND COVER Col	Embalses y cuerpos de agua (KM2)	Tejido urbano continuo y Tierras desnudas o degradadas (KM2)	Pastos limpios, Pastos arbolados y Pastos enmalezados o enrastrajados (KM2)	Arbustos, matorrales y Bosque de galería y/o ripario (KM2)	Bosque natural denso (KM2)	AREA TOTAL (KM2)
006-059	0.530	0.833	20.620	219.366	614.500	855.850
006-059 %	0.06%	0.10%	2.41%	25.63%	71.80%	100%
007-059	0.435	19.055	57.546	196.826	948.598	1222.461
007-059 %	0.04%	1.56%	4.71%	16.10%	77.60%	100%
007-058	0.024	1.081	5.969	31.962	37.223	76.258
007-058 %	0.03%	1.42%	7.83%	41.91%	48.81%	100%
AREA TOTAL (KM2)	0.991	20.986	84.206	448.571	1601.814	2156.568
AREA TOTAL (%)	0.05%	0.97%	3.90%	20.80%	74.28%	100%

Fuente: Elaboración propia, 2018.

De los datos analizados para el año 2010 y los del año 2018 se dan en porcentaje para que, de un mejor entendimiento del cambio de una temporalidad a la otra, además, tiene datos que son poco significativos que son mostrados en la tabla como 0%. Por otro lado, tenemos cambios significativos como en la primera clasificación

en donde se tiene que la cobertura aumento 0.05%, en la segunda clasificación se tiene un aumento de 1.47% en la imagen 007 – 059, para la clase 3, se tiene una reducción de un 10.36%, en el caso de la cuarta clasificación las variaciones no son significativas, más sin embargo en la última y quinta clase la cual corresponde a la cobertura de bosque natural denso se tiene una reducción en la cobertura de un 7.7%. Lo que nos indica estos datos es que se ha aumentado el área de tejido urbano y tierras desnudas o degradadas, y por otro lado que las áreas de pastos y rastrojos ha sufrido la mayor reducción entre las coberturas.

Además, se debe considerar que debido a los vacíos de información de la imagen Landsat 7 del path 007 y row 058 se tienen una diferencia entre la tabla 5 y 6 de 22.06 km2.

Cambio de coberturas a partir de los datos del NDVI

Realizado el cálculo del NDVI para cada una de las imágenes se realiza la operación entre estas para estimar, las coberturas que sufrieron de reducción o ampliación, para la finalidad de mostrar las áreas en donde las coberturas vegetales fueron degradadas entre los años de 2010 y 2018.

Mediante la resta de los índices de diferenciación normalizada de vegetación (Ecuación 11), del tiempo inicial en este caso el año 2010 y el tiempo final, es decir, 2018. Luego pasando este resultado por una estandarización de los valores, se logra una clasificación estándar como se muestra en la Tabla 7 [18].

$$\Delta NDVI = NDVI_{2018} - NDVI_{2010} \quad (11)$$

Tabla 7 Clasificación estándar para la diferencia del NDVI del 2018 y 2010

disminución significativa	disminución moderada	sin cambio	aumento moderado	aumento significativo
<media-2*desviación estándar	media-2*desviación estándar <u>hasta</u> media-desviación estándar	media-desviación estándar <u>hasta</u> media + desviación estándar	Media + desviación estándar <u>hasta</u> media+2*desviación estándar	>media+2*desviación estándar

Fuente: Elaboración propia, 2018. [18].

A continuación, se observa una comparación de las imágenes satelitales del path 007 y row 058, en la primera posición, es decir la que se encuentra en la parte izquierda se tienen la imagen de 2010 en combinación (4,3,2), mientras que en el centro se encuentra la imagen de 2018 en la misma combinación de bandas, y finalmente se tiene los cambios de cobertura presente en la zona del municipio, representadas por la simbología de la tabla 7, imagen de la derecha. En esta última se identifican en tono rojo las áreas donde se tiene disminución significativa de la

cobertura vegetal o de donde se produjeron cambios en el estado de salud de la vegetación anteriormente presente, adicionalmente se tiene la clasificación disminución moderada, la que corresponde a las áreas de poca intervención, por otro lado, las zonas sin cambio, las cuales aún no han sido intervenidas y por lo tanto la vegetación presente no degradación en su salud vegetal, la siguiente clasificación es el aumento moderado y finalmente el aumento significativo, que responde a zonas en que la vegetación mejoro su condición de salud.

Dentro de esta imagen se tiene para la media el valor de 0,037 y la desviación estándar es de 0,19, los valores de los rangos para la clasificación se agregan en la Tabla 8, adicionalmente el área en kilómetros cuadrados y el porcentaje que representa dicha clasificación dentro de la escena.

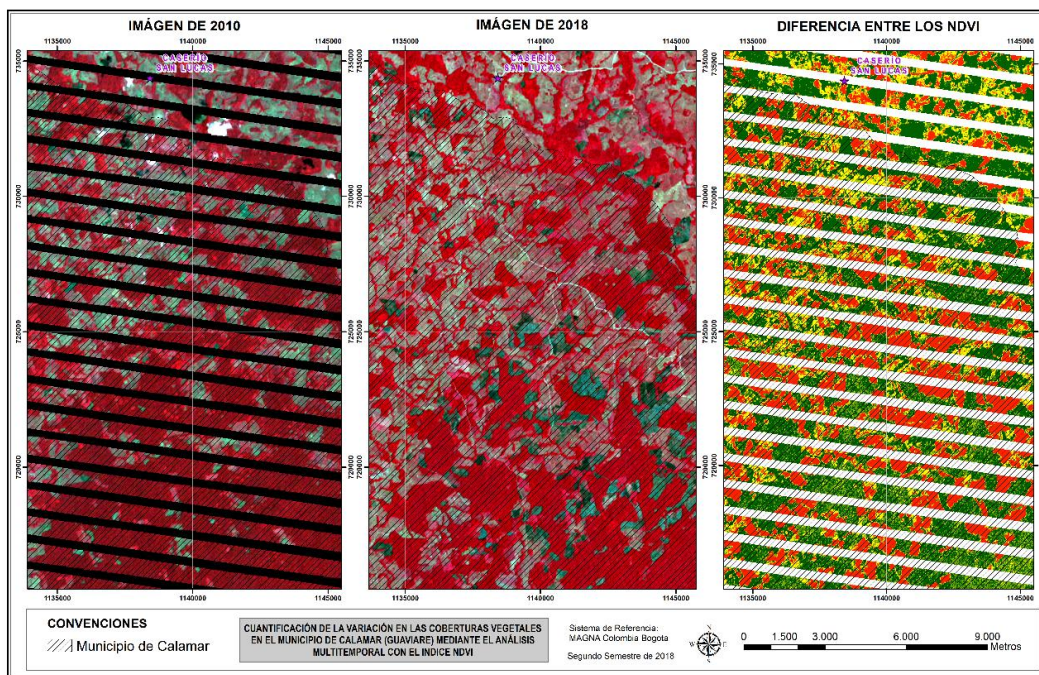


Figura 6 Análisis del cambio de cobertura con el NDVI (path 007, row 058)
Fuente: Elaboración propia, 2018.

El porcentaje más significativo se tiene que es el aumento significativo de la cobertura vegetal, pero se debe tener en cuenta que esta acoge áreas que anteriormente presentaban vegetación, con mejora en la salud vegetal. Mientras que el siguiente porcentaje importante de la Tabla 8 se tiene en la clasificación de disminución significativa, ya que esta es el área degradada donde no existe vegetación en el año 2018.

Tabla 8 Datos de análisis de la clasificación del NDVI (path 007, row 058)

Clasificación	disminución significativa	disminución moderada	sin cambio	aumento moderado	aumento significativo
Ecuación	$< \text{media} - 2 * \text{desviación estándar}$	media - $2 * \text{desviación estándar}$ <u>hasta</u> media + desviación estándar	media - desviación estándar <u>hasta</u> media + desviación estándar	Media + desviación estándar <u>hasta</u> media + $2 * \text{desviación estándar}$	$> \text{media} + 2 * \text{desviación estándar}$
Rangos	< -0.34	$(-0.34, -0.15)$	$(-0.15, 0.22)$	$(0.22, 0.14)$	> 0.14
Área (Km2)	14.60	3.62	8.37	5.67	21.95
Área (%)	26.93%	6.67%	15.44%	10.46%	40.50%

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Igualmente se realiza el proceso para la imagen de path 007 y row 059, donde se clasifica en disminución significativa, disminución moderada, sin cambio, aumento moderado y aumento significativo. Y donde obtenemos el siguiente resultado de la Figura 7.

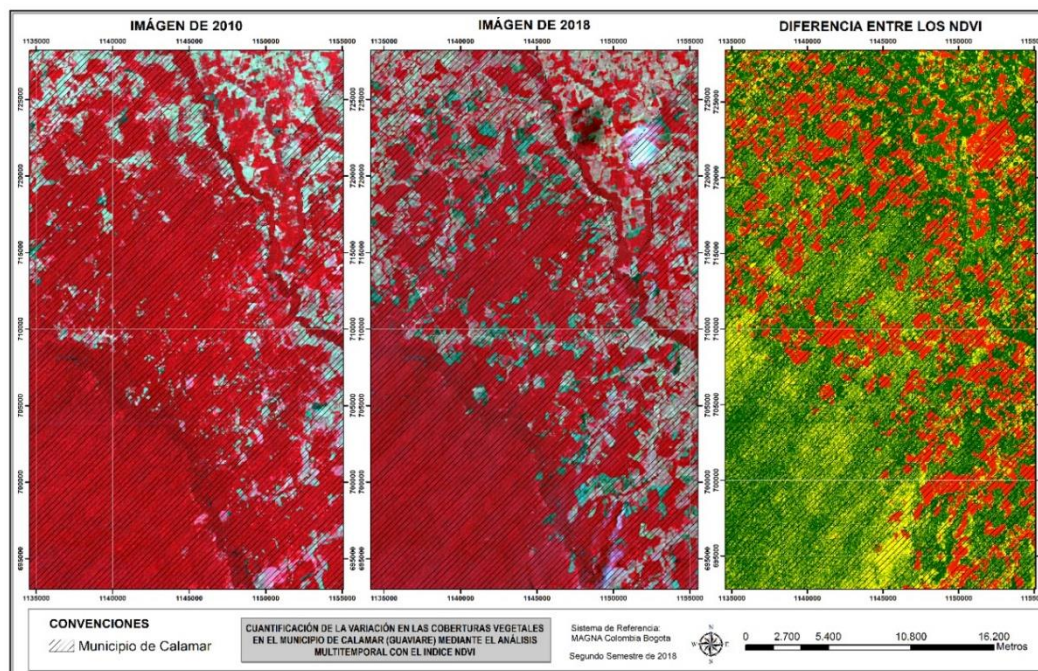


Figura 7 Análisis del cambio de cobertura con el NDVI (path 007, row 059)

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Para la imagen de path 007 y row 059, se tiene la media de 0,054 y para la desviación estándar se tiene el valor de 0,171. Lo que arroja los valores para los diferentes rangos, e igualmente que para la imagen path 007 y row 058 se realizan los cálculos de áreas y el porcentaje que representa dentro del municipio de Calamar, cuyos datos para el aumento significativo y aumento moderado en la salud de la vegetación es de 33.86% y 31.86% respectivamente, adicionalmente se tiene la disminución significativa que corresponde a 18.09 %.

Tabla 9 Datos de análisis de la clasificación del NDVI (path 007, row 059)

Clasificación	disminución significativa	disminución moderada	sin cambio	aumento moderado	aumento significativo
Ecuación	$< \text{media} - 2 * \text{desviación estándar}$	media - $2 * \text{desviación estándar}$ <u>hasta</u> media - desviación estándar	media - desviación estándar <u>hasta</u> media + desviación estándar	Media + desviación estándar <u>hasta</u> media + $2 * \text{desviación estándar}$	$> \text{media} + 2 * \text{desviación estándar}$
Rangos	$< -0,29$	$(-0.29, -0.12)$	$(-0.12, 0.22)$	$(0.22, 0.39)$	> 0.39
Área (Km2)	221.14	25.63	172.21	389.50	413.98
Área (%)	18.09%	2.10%	14.09%	31.86%	33.86%

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Para la imagen del path 006 y row 059 se tiene el resultado de la clasificación en la Figura 8

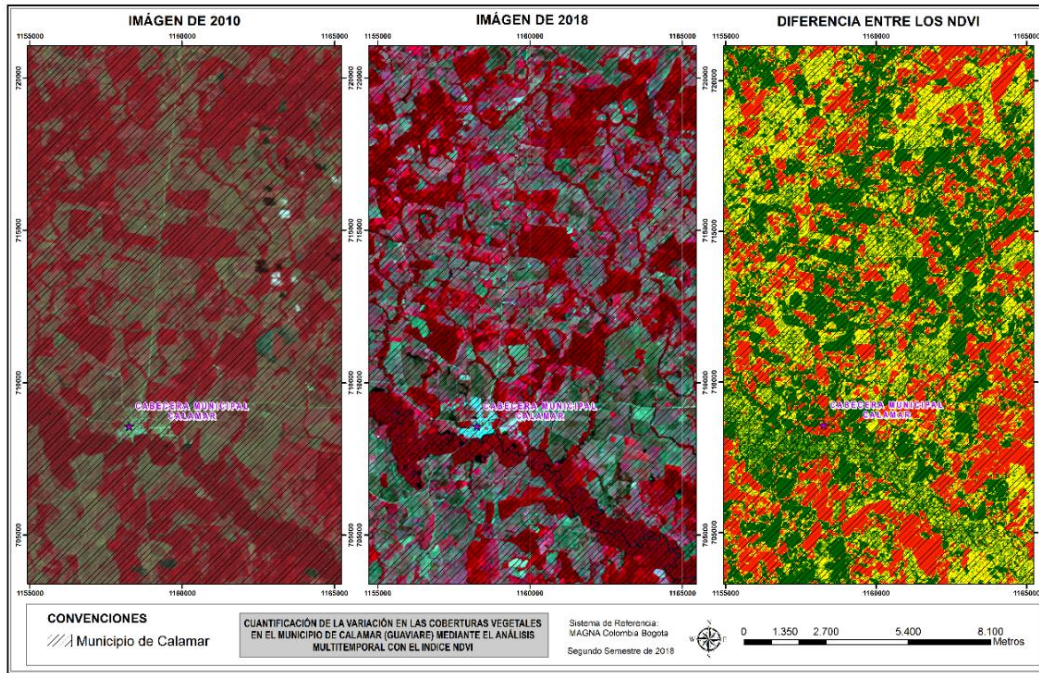


Figura 8 Análisis del cambio de cobertura con el NDVI (path 006, row 059)

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Por ultimo tenemos el análisis de área de la imagen del path 006 y row 059 en la Tabla 10, donde se tiene para la clasificación de aumento significativo un valor de 24.74% y para la clasificación de disminución significativa se tiene un porcentaje de 28.44%.

Tabla 10 Datos de análisis de la clasificación del NDVI (path 006, row 059)

Clasificación	disminución significativa	disminución moderada	sin cambio	aumento moderado	aumento significativo
Ecuación	$< \text{media} - 2 * \text{desviación estándar}$	$\text{media} - 2 * \text{desviación estándar}$ <i>hasta</i> $\text{media} - \text{desviación estándar}$	$\text{media} - \text{desviación estándar}$ <i>hasta</i> $\text{media} + \text{desviación estándar}$	$\text{Media} + \text{desviación estándar}$ <i>hasta</i> $\text{media} + 2 * \text{desviación estándar}$	$> \text{media} + 2 * \text{desviación estándar}$
Rangos	< -0.16	$(-0.16. -0.008)$	$(-0.008. 0.29)$	$(0.29. 0.43)$	> 0.43
Área (Km2)	243.40	50.52	271.71	78.46	211.74
Área (%)	28.44%	5.90%	31.75%	9.17%	24.74%

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Adicionalmente se debe tener en cuenta que esta zona analizada se encuentra la cabecera municipal de Calamar, como también los centros poblados de La Fortaleza y la cabecera de inspección de policía Las Damas. Donde según la web de la alcaldía los indicadores de la población en 2017 corresponden a que en la zona de la cabecera habitan 3.836 personas mientras que en el área rural se tiene 3.393 [20]. Y al compáralo con los datos almacenados en el censo de 2005 se tiene un crecimiento de la población, ya que en ellos se relaciona en la cabecera una población de 4.855 y en el área rural de 1.239, para un total de 6.094 [21].

Finalmente, al obtener esta información puede usarse como una fuente de gestión y de planeación del territorio como también puede ser usado el modelo mixto de regresión beta regresivo autorregresivo espacial que determina el índice de necesidades básicas insatisfechas [22], en donde con información digital de fuentes gubernamentales o no gubernamentales, se obtiene datos para el desarrollo del ordenamiento del territorio, ya sea dentro de una nación o un municipio.

CONCLUSIONES

Se logra realizar una clasificación de las coberturas según CORINE LAND COVER adaptado para Colombia, a partir de calcular el índice de diferenciación normalizada de vegetación, se clasifican en cinco grupos y luego se realiza el análisis para identificar el cambio de coberturas a partir de una nueva clasificación con el fin de identificar las áreas degradadas por las actividades desarrolladas en el terreno.

El uso de herramientas de los sensores remotos y de las técnicas desarrolladas para clasificar las imágenes, puede ser usado por un municipio para gestionar sus recursos naturales, con el fin de prevenir y concientizar a la población de los cambios que están produciendo las actividades económicas.

El procesamiento de las imágenes presenta algunas complicaciones al momento del procesamiento que limita este proceso para que solo pueda ser calculado dentro de un área menor a 40.000 km². Por lo que no fue posible realizar el proceso para el área completa del municipio o esta labor podría llevar una gran cantidad de tiempo al momento de procesar las diferentes fracciones de la imagen.

AGRADECIMIENTOS

A la universidad militar nueva granada por los aportes para este estudio, y en especial a los profesores Ximena Lucia Pedraza Nájjar (Seminario de Investigación) y Leonardo Emilio Calle (Ordenamiento Territorial y Gestión del Riesgo) por compartir su crítica y conocimiento para el crecimiento de este documento.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierra Departamento de Guaviare, 2013.
- [2] Lambin, Helmut J, Geist y Eric F., «Proximate causes an underlying driving forces of tropical deforestation,» *Bioscience*, vol. 52, nº 2, pp. 143-150, 2002.
- [3] Revista Semana, «Las mafias de la deforestación en el Guaviare,» *Revista Semana*, 4 Julio 2017.
- [4] R. L. Chazdon, C. A. Harvey, O. Komar, D. M. Griffith, B. G. Ferguson y M. M. Ramos, «Beyond Reserves: A Research Agenda for Conserving Biodiversity in Human-modified Tropical Landscapes,» *Biotropica*, vol. 41, nº 2, pp. 142-153, 2009.

- [5] M. A. Zemanova, H. L. Perotto-Baldivieso, E. L. Dickins y A. B. Gill, «Impact of deforestation on habitat connectivity thresholds for large carnivores in tropical forests,» *Ecological Processes*, pp. 6-21, 2017.
- [6] El Tiempo, ICFJ, CONNECTAS., «La selva del Guaviare, la otra víctima del posconflicto,» *El Tiempo*, 28 Septiembre 2017.
- [7] C. A. Murad y J. Pearse, «Landsat study of deforestation in the Amazon region of Colombia: Departments of Caquetá and Putumayo,» *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 11, pp. 161-171, 2018.
- [8] IDEAM, «Resultados monitoreo de la deforestación 2017,» Bogotá, 2017.
- [9] M. Mazzarino y J. T. Finn, «An NDVI analysis of vegetation trends in an Andean watershed,» *Wetlands Ecol Manage*, vol. 24, pp. 623-640, 2016.
- [10] H. T. B. T. W. Z. A. H. K. Zenebe Mekonnen, «Land use and land cover changes and the link to land degradation in Arsi Negele district, Central Rift Valley, Ethiopia,» *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 12, pp. 1-9, 2018.
- [11] SINCHI, «Zonificación Ambiental Y Ordenamiento De La Reserva Forestal De La Amazonía, Creada Mediante La Ley 2ª De 1959, En El Departamento De Guaviare,» Bogotá D.C., 2016.
- [12] ESRI, «The ArcGIS Imagery Book,» ArcGIS, [En línea]. Available: <https://learn.arcgis.com/es/arcgis-imagery-book/chapter7/>. [Último acceso: 26 10 2018].
- [13] G. Chander, B. L. Markham y D. L. Helder, «Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors,» *Remote Sensing of Environment*, nº 113, pp. 893-903, 2009.
- [14] USGS, «Landsat Missions,» USGS, 18 10 2018. [En línea]. Available: <https://landsat.usgs.gov>. [Último acceso: 24 10 2018].
- [15] USGS, «Earth Explorer,» USGS, 31 01 2018. [En línea]. Available: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. [Último acceso: 10 08 2018].
- [16] E. C. Salinero, Teledetección Ambiental, Barcelona: Ariel Ciencia, 2008.
- [17] IGAC, IDEAM, CORMAGDALENA, Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca, Bogotá DC, 2008.

- [18] M. C. Pineda, J. A. Martínez Casasnovas y J. Vilorio, «RELACIÓN ENTRE LOS CAMBIOS DE COBERTURA VEGETAL Y LA OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS DE TIERRA EN LA SERRANÍA DEL INTERIOR, VENEZUELA.,» *Interciencia*, vol. 41, nº 3, pp. 190-197, 2016.
- [19] E. M. Romero Aroca y C. E. Hernandez, *CUANTIFICACIÓN DEL CAMBIO DE COBERTURAS DEBIDO A LA CONSTRUCCION DE LA REPRESA HIDROSOGAMOSO (Santander) 2001-2015*, Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2015.
- [20] Alcaldía de Calamar Guaviare , «Población 2017,» 24 07 2017. [En línea]. Available: <http://www.calamar-guaviare.gov.co/indicadores/poblacion-2017>. [Último acceso: 06 11 2018].
- [21] DANE, «Censo General 2005,» 14 09 2010. [En línea]. Available: https://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL_PDF_CG2005/95015T7T000.PDF. [Último acceso: 12 10 2018].
- [22] C. A. Gómez, E. M. R. Aroca y L. F. S. Guzmán, «Análisis de datos espaciales del índice de necesidades básicas insatisfechas en la región andina,» *Perspectiva Geográfica*, vol. 20, nº 2, pp. 391-418, 2015.