



IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS QUEMADAS POR MEDIO DE ÍNDICES ESPECTRALES UTILIZANDO IMÁGENES SENTINEL 2 EN EL MUNICIPIO DE OROCUÉ, CASANARE.

**IDENTIFICATION OF BURNED AREAS BY MEANS OF
SPECTRAL INDEXES USING SENTINEL 2 IMAGES IN THE
MUNICIPALITY OF OROCUÉ, CASANARE**

Alix Johana González
U3101516
Ingeniero civil - Topógrafa

Director:
Ing. Freddy León Reyes M.Ed

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA
NOVIEMBRE DE 2020
BOGOTÁ-COLOMBIA**

IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS QUEMADAS POR MEDIO DE ÍNDICES ESPECTRALES UTILIZANDO IMÁGENES SENTINEL 2 EN EL MUNICIPIO DE OROCUÉ, CASANARE.

IDENTIFICATION OF BURNED AREAS BY MEANS OF SPECTRAL INDEXES USING SENTINEL 2 IMAGES IN THE MUNICIPALITY OF OROCUÉ, CASANARE.

Alix Johana González
Ingeniera civil y Topógrafa
Aspirante a Especialista en Geomática
Universidad Militar Nueva Granada.
Bogotá, Colombia
u3101516@unimilitar.edu.co

RESUMEN

La presente investigación busca identificar las áreas quemadas dentro del municipio de Orocué en el departamento del Casanare a partir de imágenes satelitales Sentinel 2, obtenidas de forma gratuita a través del portal EarthExplorer. Anualmente durante la época de sequía esta municipalidad se ve afectada por el fuego, causado principalmente por acción antrópica para el establecimiento de cultivos, pastos o para limpieza de terrenos, en repetidas ocasiones este fenómeno se sale de control presentándose grandes incendios que afectan de manera grave el ecosistema de la región. El índice espectral NBR es utilizado con el fin de resaltar las zonas afectadas por incendios y tipificar la severidad del evento, mostrando como resultado una clasificación de acuerdo con un rango de valores clave en orden continuo cualitativo ofrecidos por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). El estudio arrojó un total de Área Quemada de 3900 km², clasificadas entre zonas de quema con gravedad alta, moderada y baja, que corresponde a un 82% del área total del municipio, una cifra preocupante, que debe alertar a los funcionarios gubernamentales del municipio encargados de la Gestión del Riesgo de desastres, para evaluar daños y analizar los respectivos procesos de recuperación de la cobertura vegetal y el ecosistema en forma eficaz.

Palabras Clave: Incendios forestales, Orocué, Imagen satelital, Sentinel 2A, Índice espectral NBR, Severidad de Incendios, SIG.

ABSTRACT

The present investigation seeks to identify the burned areas within the municipality of Orocué in the department of Casanare from Sentinel 2 satellite images, obtained free of charge through the EarthExplorer portal. Every year during the dry season, this municipality is affected by fire, caused mainly by anthropic action to establish crops, pastures or to clean up land, repeatedly this phenomenon gets out of control, with large fires that seriously affect the ecosystem of the region. The NBR spectral index is used in order to highlight the areas affected by fires and typify the severity of the event, showing as a result a classification according to a range of key values in qualitative continuous order offered by the United States Geological Survey (USGS). The study yielded a total Burned Area of 3,900 km², classified into burning areas with high, moderate and low severity, which corresponds to 82% of the total area of the municipality, a worrying figure, which should alert the municipal government officials Responsible for disaster risk management, to assess damage and analyze the respective recovery processes of vegetation cover and the ecosystem an effective way.

Keywords: Forest fires, Orocué, Satellite image, Sentinel 2A, NBR spectral index, Burn severity, GIS.

INTRODUCCION

El fuego también tiene historia y se cataloga como una fuerza evolutiva de la naturaleza, ha sido aplicado en los sistemas agrícolas de las culturas americanas prehispánicas en los llanos de la Orinoquia Colombiana, las quemadas han sido una práctica ancestral por más de 10.000 años, la cual limita la sucesión vegetal y por consiguiente la presencia de formaciones boscosas, y mantiene el paisaje de sabana como lo conocemos [1]. Sin embargo, los cambios de uso del suelo ocurridos durante los tres últimos siglos en los distintos continentes, conjugados con los cambios climáticos de carácter global y regional, han conllevado a la alteración de los patrones naturales de ocurrencia de este fenómeno en la mayor parte de los ecosistemas con coberturas vegetales transformándolos, disminuyendo su biodiversidad y comprometiendo su capacidad productiva. [2]

Debido a las características fisiográficas de las sabanas inundables, la presencia del fenómeno del Niño y las diferentes prácticas de preparación del terreno para la agricultura y la ganadería, la región de la Orinoquia Colombiana se caracteriza por presentar anualmente un número considerable de emergencias por incendios forestales, especialmente durante los períodos secos prolongados, entre los meses de enero, febrero y marzo, lapso en el que los ecosistemas tropicales húmedos y muy húmedos pierden gran parte de su contenido de humedad superficial, llegando a niveles de susceptibilidad alta de combustión de la biomasa vegetal contenida en éstos [3]. El número de alertas de incendios, en el mes de marzo del año 2020, aumentó en un 13% en comparación con el 2019, los factores principales son la persistencia de un clima más cálido y seco debido al cambio climático y la deforestación causada principalmente por la conversión de tierras para la agricultura

[4]. Los incendios forestales del oriente colombiano no solo transforman un paisaje también influyen en la mala calidad del aire en varias ciudades del interior del país. Según la revista de Semana Sostenible “Cuando la biomasa de los bosques es quemada, el material particulado producto de los incendios de grandes extensiones de sabanas y bosques es transportado por los vientos cubriendo una distancia de más de 1.200 kilómetros de distancia hacia el centro del país, y actualmente ahoga y contamina el aire de ciudades como Bogotá, Medellín y Bucaramanga. [5].

Por lo descrito anteriormente, es vital proveer de información cuantitativa y cualitativa a las entidades gubernamentales encargadas de la gestión del riesgo de desastres, para que puedan crear mecanismos de compensación y mitigación de impactos post - incendio; esto se obtiene a través de la tecnología de la percepción remota y los sistemas de información geográfica (SIG).

La tecnología que engloba los procesos que permiten obtener una imagen de la superficie de la tierra desde el aire o el espacio, y su posterior tratamiento en el contexto de una determinada aplicación, se denomina percepción remota, teledetección o teleobservación; tales términos son la traducción latina del término inglés “remote sensing” [6]. También se puede catalogar la percepción remota como la ciencia de adquirir información sobre objetos lejanos sin hacer contacto físico con ellos, restringida a medidas de radiación electromagnética, incluyendo luz visible e infrarroja, al igual que ondas de radio y calor. Tal definición implica que entre la superficie de la tierra y el sensor debe existir una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, o por emisión propia. A su vez, es preciso que ese haz energético recibido por el sensor se transmita a la superficie terrestre, donde la señal detectada pueda almacenarse y, en última instancia, ser interpretada para una aplicación determinada [6].

Desde el año 2015 se han utilizado imágenes satelitales de las misiones Sentinel para la detección de incendios en diferentes partes del mundo casi en tiempo real, en el marco del programa Copernicus de la Unión Europea [8]. La misión Sentinel 2 cuenta con las combinaciones de bandas necesarias para la aplicación de los diferentes índices que permiten la identificación de conatos y el análisis de variables como la severidad [9]. De acuerdo con Delegido, J. [10] y el portal de las Naciones Unidas encargada de la administración de la información de Riesgos y desastres [11] la combinación de las bandas 8A (NIR) y 12 (SWIR) con resolución espacial de 20 m pertenecientes a las imágenes SENTINEL 2, presenta la mejor correlación para el cálculo del índice NBR. El índice normalizado del área quemada (NBR), fue diseñado para resaltar áreas quemadas en grandes zonas de incendio y es un índice primordial para calcular la severidad del fuego que puede interpretarse como la pérdida o cambio de materia orgánica por encima y por debajo del suelo [12]. El comportamiento de las masas vegetales frente al espectro electromagnético en el infrarrojo se convierte en un instrumento útil para el análisis de estudios forestales vinculados con incendios [13].

Otro medio empleado para detectar impactos de incendios forestales a escala global son los focos de calor, estos se definen como una anomalía térmica sobre el terreno, detectado a partir de imágenes MODIS y VIIRS que viajan sobre los satélites Terra,

Aqua, Suomi-NPP y NOAA. Estos puntos de calor son en realidad aproximaciones a incendios o puntos potenciales de fuego [14].

En el Departamento del Casanare especialmente en el municipio de Orocué, los focos de calor detectados por sensores remotos (MODIS) durante el mes de marzo del 2020 se encuentran cercanos a zonas de resguardos indígenas y Reservas Naturales de la Sociedad Civil incluidas dentro del Registro Único Nacional de Áreas Protegidas, demostrando que la acción del hombre está afectando la incidencia del fuego aumentando tanto su intensidad como su frecuencia, particularmente en periodos de sequías [15]. Esta vasta región tiene la segunda tasa de deforestación más alta del país, según el Estudio Nacional del Agua y en el futuro va a experimentar problemas hídricos por la pérdida de bosques y la desaparición de humedales [16].

De acuerdo con Guillermo Pérez, director de riesgos y desastres en el Departamento del Casanare para el 2020 se han presentado 388 incendios de la cobertura vegetal [17], que han consumido más de 23000 hectáreas (entendiendo que se considera incendio forestal una afectación superior a 5000 m²), siendo el municipio de Orocué uno de los más afectados, el fuego ha impactado desde maleza, hasta morichales, bosques, sabana nativa y áreas protegidas [18]. En Orocué se reportan anualmente incendios forestales de grandes proporciones en zonas de las veredas La Virgen y Aguaverde, Caño San Miguel, parque Wisirare, resguardo El Concejo, y el nacedero del Caño el Socorro donde resultaron afectadas aproximadamente 1.000 hectáreas de sabana nativa, 40 hectáreas de morichales, bosque y rastrojo; los socorristas han señalado que el enorme daño generado por el fuego en esta zona del Casanare, se fundamenta principalmente en que las comunidades no informan a tiempo para acudir a sofocar las llamas para evitar mayores afectaciones y, la falta de un transporte apropiado, para recorrer las enormes distancias entre el casco urbano y las veredas por vías destapadas [19].

Como recurso para la evaluación de las áreas quemadas se consultaron varias investigaciones que fueron valiosas y tienen como soporte principal el uso de la teledetección y los SIG, por ejemplo, Emilio Chuvieco junto con otros autores, proponen un esquema de integración para estimar el peligro de ocurrencia de incendios forestales (Chuvieco, Aguado, Yebra, Nieto, & Martín, 2007) y también la utilización de los puntos de calor del sensor MODIS, como aproximación a la ocurrencia del fuego [20]; con ayuda de estos estudios, noticias de periódicos regionales y nacionales que facilitan información espacio temporal de la ocurrencia de las quemadas, las imágenes satelitales obtenidas a partir de Earth Explorer, catálogos de mapas del SIAC (Sistema de Información Ambiental de Colombia), y herramientas del SIG como Erdas, ArcMap y QGIS, la presente investigación busca identificar áreas quemadas causadas por incendios forestales ocurridos en marzo del 2020 en el municipio de Orocué, Casanare, por medio de índices espectrales utilizando imágenes Sentinel 2.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO.

El municipio de Orocué se encuentra ubicado en el Departamento de Casanare dentro de las coordenadas geográficas 4° 48' 0" Latitud Norte y 71° 19' 59" Longitud Oeste, cuenta con una extensión de aproximadamente 4.800 km². Presenta una altitud de 187 m.s.n.m y una temperatura media de 26° C. Dentro de su cobertura vegetal predominan las sabanas, donde se desarrolla principalmente la actividad pecuaria, y en las zonas de las riberas de los ríos Meta y Cravo Sur, la actividad agrícola. Limita por el Norte con el municipio de San Luis de Palenque y el municipio de Yopal, por el sur con el Río Meta y el departamento del Meta, por el Oriente con el Departamento del Vichada y por el Occidente con el municipio de Maní.



Ilustración 1. Ubicación geográfica del área de estudio. Municipio de Orocué dentro del Departamento del Casanare. Fuente: <https://es.wikipedia.org/wiki/Orocué> [21]

INFORMACION ESPACIO TEMPORAL DE INCENDIOS Y ANOMALIAS TERMICAS (FOCOS DE CALOR)

La información espacio temporal de la ocurrencia de las conflagraciones de la cobertura vegetal en el municipio de Orocué, se obtuvo a través de los diferentes diarios regionales y nacionales como Semana Sostenible [5], Llanera Radio [18], el TIEMPO [21], la reporteria.com [23], al leer y analizar cada uno de los reportes consultados en los medios de comunicación digitales, se establece un periodo de tiempo para la búsqueda de las imágenes satelitales y datos de anomalías térmicas (focos de calor), entre el 27 de Febrero al 12 de marzo del 2020, días donde se registran la mayoría de incendios forestales críticos y de gran envergadura (superiores a 5000 m²). Además, también se recurre a la página de la NASA (<https://earthdata.nasa.gov/>) para identificar anomalías térmicas (focos de calor) y ubicarlos en la zona de estudio para comprobar si son útiles en la detección de incendios, estos puntos son detectados por el sensor MODIS y procesadas en la Collection 4 Active Fire dataset (FIRMS, 2007), se procede a la búsqueda de estos puntos pertenecientes al mes de Marzo del 2020.

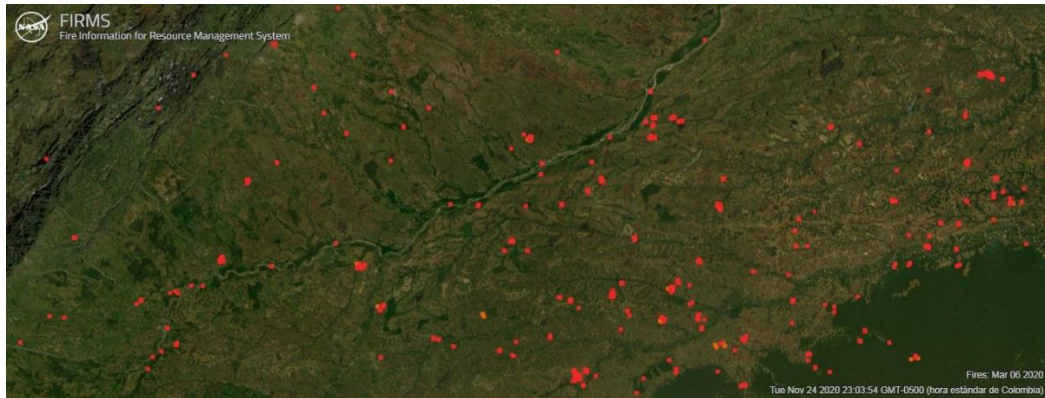


Ilustración 2. Anomalías Térmicas-Focos de calor. Fuente: FIRMS (Fire Information for Resource Management System) <https://earthdata.nasa.gov/> [24]

OBTENCIÓN DE IMÁGENES SATELITALES

Las imágenes SENTINEL 2, fueron descargadas de forma gratuita en la plataforma EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), este servicio es avalado por la USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos). Si se quiere tener acceso a este servicio, es necesario realizar un registro previo para tener una cuenta dentro del Geoportal. Para realizar la búsqueda de imágenes que cubrieran la totalidad del área de estudio, en las herramientas que ofrece la plataforma se crea un círculo, señalamos como su centro la cabecera municipal de Orocué y como radio una distancia de 60 km. Se toman como criterios adicionales de búsqueda, la temporalidad cuyos datos corresponden a la primera parte del año 2020, y la nubosidad, en esta opción, se elige un porcentaje de referencia inferior al 60%. Las imágenes obtenidas son del 6 de enero de 2020 (Pre) y del 13 de marzo de 2020 (Post). Se adquiere un shape del municipio de Orocué con el fin de delimitar en forma exacta el área de estudio sobre las imágenes, este proceso se realiza con el programa ArcMap versión 10.7

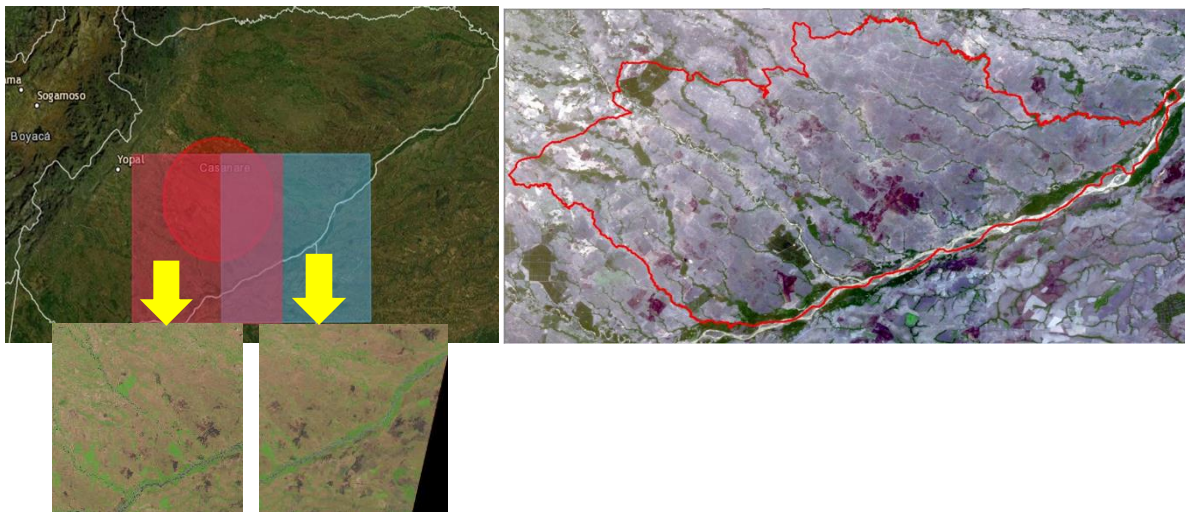


Ilustración 3. Delimitación Área de estudio y muestra de las dos imágenes satelitales que cubren en su totalidad el Municipio de Orocué. Fuente: <https://earthexplorer.usgs.gov/> [25]

Las imágenes utilizadas son SENTINEL 2 las cuales cuentan con las siguientes características:

SENTINEL 2		
	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
Banda 1 - Aerosol	0,43 - 0,45	60
Banda 2 - Blue	0,45 - 0,52	10
Banda 3 - Green	0,54 - 0,57	10
Banda 4 - Red	0,65 - 0,68	10
Banda 5 - Red edge 1	0,69 - 0,71	20
Banda 6 - Red edge 2	0,73 - 0,74	20
Banda 7 - Red edge 3	0,77 - 0,79	20
Banda 8 - Near Infrared (NIR) 1	0,78 - 0,90	10
Banda 8A - Near Infrared (NIR) 2	0,85 - 0,87	20
Banda 9 - Water vapour	0,93 - 0,95	60
Banda 10 - Cirrus	1,36 - 1,39	60
Banda 11 - SWIR 1	1,56 - 1,65	20
Banda 12 - SWIR 2	2,10 - 2,28	20

Ilustración 4. Características imágenes Sentinel 2A. Fuente: <http://www.gisandbeers.com/lo-deberias-saber-imagenes-sentinel-2/> [26]

Dentro de las imágenes Sentinel 2 disponibles para descarga, se encuentran las denominadas imágenes de nivel 1C e imágenes de nivel 2A. Las imágenes de nivel 1C se encuentran ortorectificadas y con niveles de reflectancia por encima de la atmósfera (TOA). Las imágenes de nivel 2A se encuentran ortorectificadas con niveles de reflectancia por debajo de la atmósfera (BOA). [26] Esto quiere decir que las imágenes que se obtuvieron deben ser corregidas atmosféricamente porque pertenecen al nivel L1C.

CORRECCION ATMOSFERICA IMÁGENES SENTINEL 2

El primer paso antes de comenzar a calcular el NBR es aplicar una corrección de la parte superior de la atmósfera. Esto se hace para separar la reflectancia real que se emitió desde los objetos en la superficie de la Tierra (que es lo que necesitamos) de las perturbaciones atmosféricas que forman parte de la energía reflejada registrada por el sensor [11], Para realizar el proceso de corrección atmosférica de cada una de las bandas que componen la imágenes Sentinel 2, disponemos del programa QGIS Desktop 3.16.1. En el software es necesario descargar el complemento Semi-Automatic Classification Plugin SCP, esta opción presenta herramientas para la descarga, preprocesamiento, post procesamiento y clasificación de diferentes clases de imágenes satelitales.

En el programa ERDAS IMAGINE 2020, se procede a realizar un layer stack (Unión de bandas espectrales) de las bandas (B2, B3, B4, B8, B8A, B11, B12) corregidas atmosféricamente, y son fundamentales al momento de realizar combinación de bandas (R, G, B). Para identificar áreas quemadas vamos a utilizar la combinación (B7, B5, B3) correspondientes a las bandas (B12, B8A, B4) [SWIR2, NIR2, R].

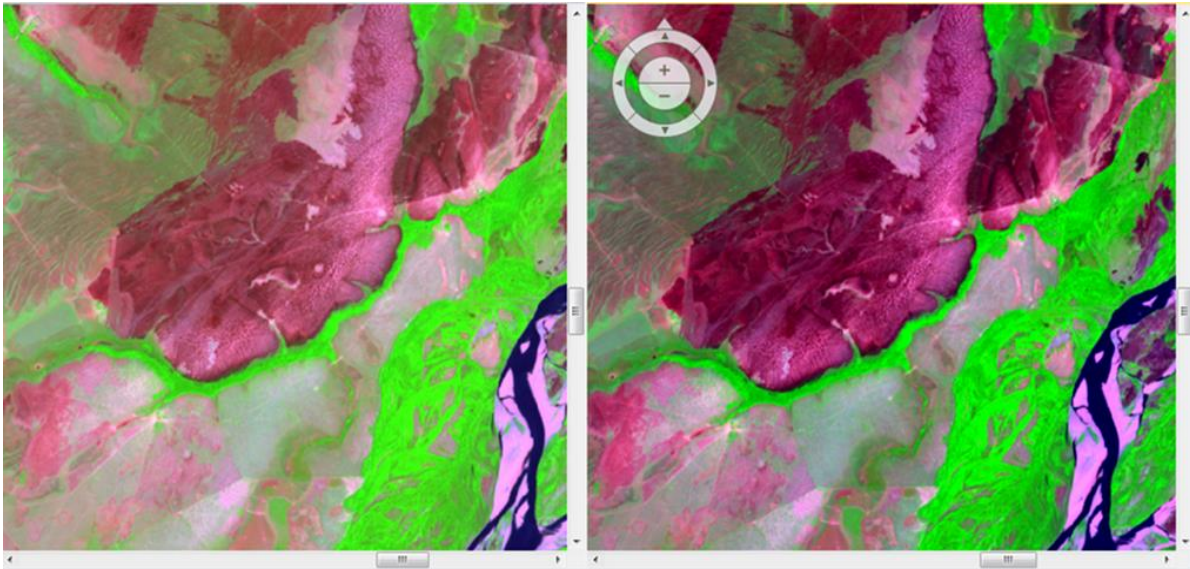


Ilustración 5. Imagen Izquierda: Layer Stack de bandas Sentinel 2 con corrección atmosférica. Imagen derecha: Layer stack de bandas sin corregir. Combinación para identificar incendios [SWIR1, NIR, B] [B7, B5, B3] corresponde a Bandas respectivamente (12,8A,4).

**BANDAS UTILIZADAS PARA COMBINACION DE BANDAS
MULTIESPECTRALES SENTINEL OROCUÉ**

B2, B3, B4, b8, b8a, B11, B12

B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7

Ilustración 6. Combinación de bandas y su respectiva correspondencia en la.

CALCULO DE INDICE NBR y Δ NBR CON IMÁGENES SENTINEL 2

Las bandas que se utilizarán para calcular la relación de combustión normalizada (NBR) son el infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), que corresponden a la banda 8A y la banda 12, respectivamente [11]. Las imágenes que se observan por cada banda son monocromáticas.

Para esta operación se recurre al programa ArcMap 10.7, se usa la herramienta Ráster Calculator de ArcToolbox utilizando la siguiente ecuación:

$$\mathbf{NBR} = (\mathbf{NIR} - \mathbf{SWIR}) / (\mathbf{NIR} + \mathbf{SWIR})$$

$$\mathbf{NBR} = (\mathbf{B8A} - \mathbf{B12}) / (\mathbf{B8A} + \mathbf{B12})$$

Esta operación se realiza con cada una de las imágenes pre-Incendio y Post Incendio obtenidas para la zona de estudio del municipio de Orocué

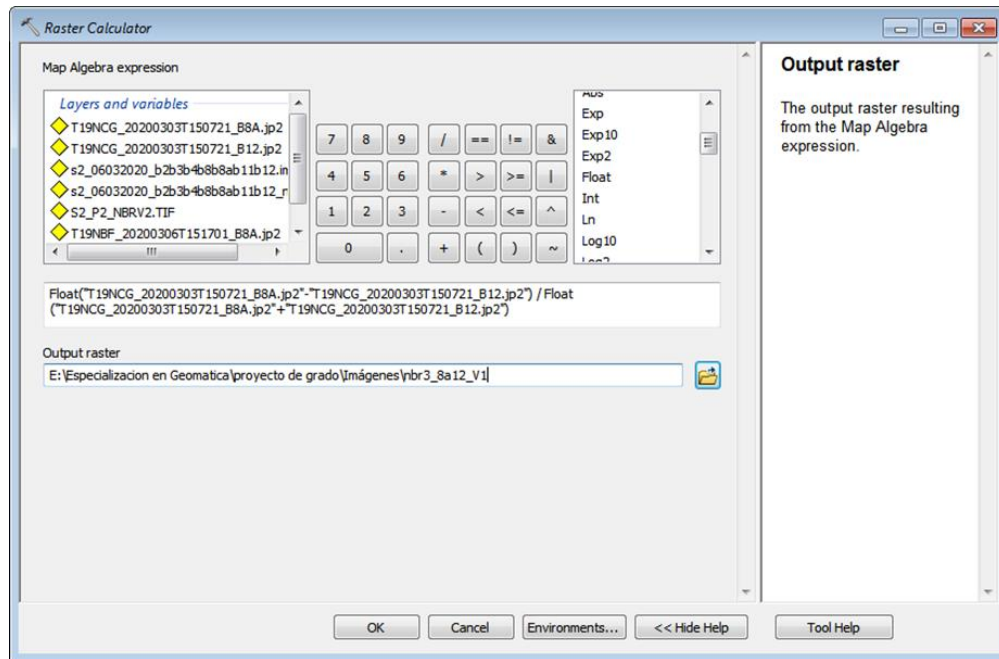


Ilustración 7. Cálculo del Índice NBR con la herramienta Ráster Calculator en el programa Arc MAP 10.7.

Posteriormente se calcula el índice de la severidad o Δ NBR entre las imágenes 1 correspondientes al evento Pre-incendio y Post-Incendio, de la misma forma se procede para las Imágenes 2 (Pre y Post Incendio) del área de estudio del municipio de Orocué, utilizando la siguiente formula:

$$\Delta \text{ NBR} = (\text{NBR pre-fuego OROCUE}) - (\text{NBR post-fuego OROCUE})$$

Δ NBR=

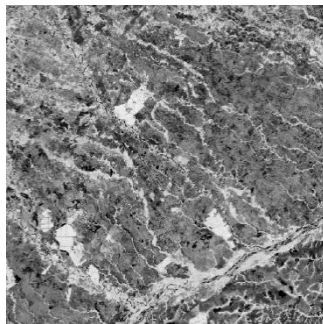


Imagen1 pre -incendio

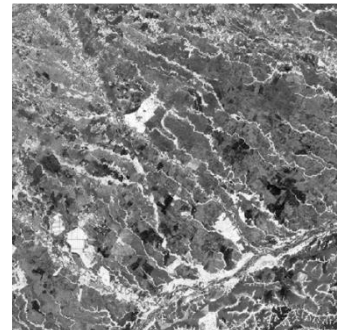


Imagen1 post -incendio

Δ NBR =

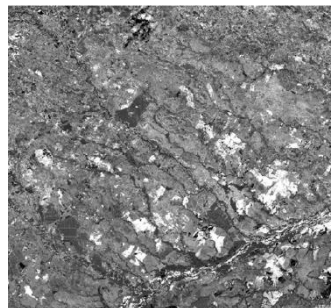


Imagen1 D NBR

El índice NBR muestra una relación de valores comprendidos entre -1 y 1, en ArcMap se realiza un mosaico con las 2 imágenes correspondientes al Δ NBR Imagen 1 y Δ NBR Imagen 2, se recorta de acuerdo con el perímetro del Municipio de Orocué:

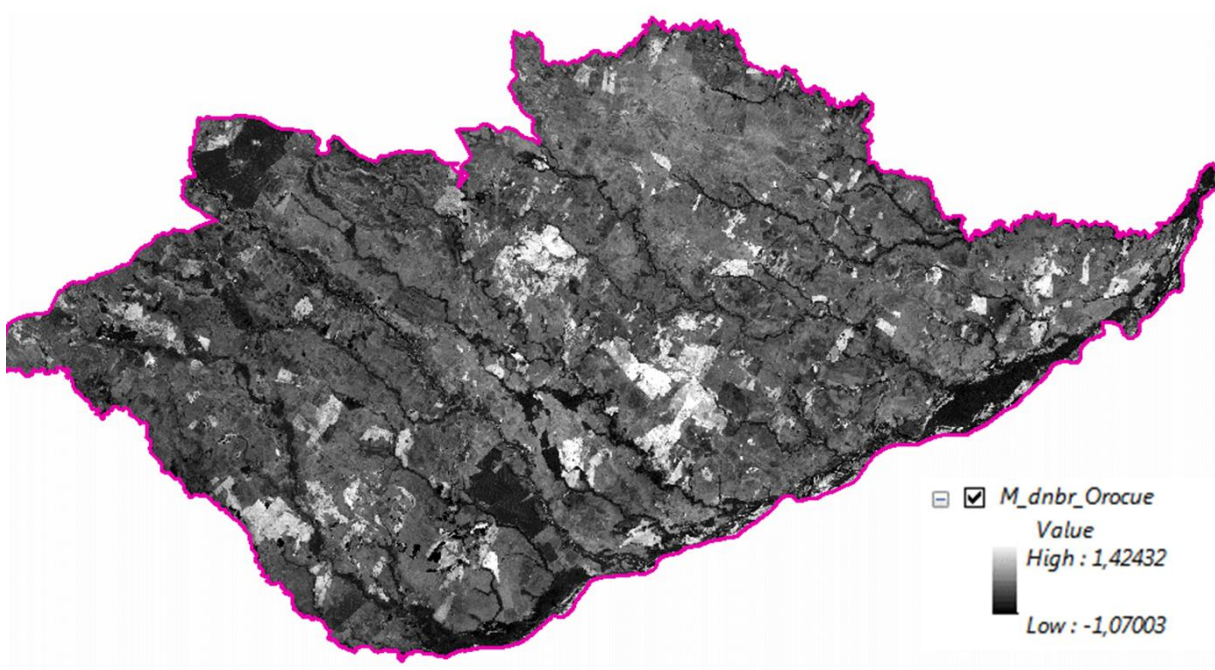


Ilustración 8. Mapa Monocromático resultado del Δ NBR. Fuente: Autor.

El NBR representa rangos numéricos a través de los cuales es posible determinar la severidad causada por el incendio. Estos valores son suministrados por la USGS.

- **< -0,25:** Alto crecimiento de vegetación posterior al fuego
- **-0,25 -- 0,1:** Bajo crecimiento de vegetación posterior al fuego
- **-0,1 - 0,1:** Zonas estables o sin quemar
- **0,1 - 0,27:** Zonas quemadas con gravedad baja
- **0,27 - 0,44:** Zonas quemadas con gravedad moderada-baja
- **0,44 - 0,66:** Zonas quemadas con gravedad moderada-alta
- **> 0,66:** Zonas quemadas con gravedad alta

Ilustración 9. Tabla de Valores de la USGS para valores de entre -1 y 1 para el Índice NBR. [13].

Al realizar el Mosaico de imágenes correspondiente al área de interés y con los valores obtenidos del Mapa Monocromático resultado del Δ NBR, se realiza el uso de la herramienta de análisis espacial Reclassify en ArcMap 10.7. La clasificación digital de imágenes satelitales usa información espectral representada por los niveles digitales en una o más bandas espectrales e intenta clasificar cada píxel individual basado en esta información espectral, este tipo de clasificación se denomina

reconocimiento espectral de patrones. De acuerdo con esto, el propósito es asignar a todos los píxeles en una imagen diferentes clases como por ejemplo bosques plantado, bosque de galería, agua, centros poblados, etc. [27] en el caso de investigación del área de estudio del municipio de Orocué, se va a clasificar en siete (7) tipos de coberturas correspondiente a las zonas quemadas con gravedad alta, con gravedad moderada alta, gravedad moderada baja, gravedad baja, zonas estables o sin quemar, bajo crecimiento de vegetación posterior al fuego y alto crecimiento de vegetación posterior al fuego, según la tabla de valores de la USGS para el índice NBR.

La imagen reclasificada en 7 tipos de coberturas se convierte a polígonos simplificados con la herramienta del ARCMAP Ráster to Polygon, posteriormente se crea un Feature class denominado *Re_DNBR_Orocué1* de tipo polígono sobre el cual se va a cartografiar las áreas de acuerdo con los valores del índice NBR.

Se crea un campo denominado *Área* y se calcula el área en Hectáreas para cada uno de los 7 polígonos creados utilizando la herramienta *Calculate geometry* (tener en cuenta el área total del municipio de Orocué: 474558,24 Ha.) para posteriormente hallar los porcentajes correspondientes.

RE_DNBR_OROCUE1						
FID	Shape *	Id	gridcode	AREA	SEVERIDAD	
0	Polygon	1	1	244,0924	Alto crecimiento de vegetación posterior al fuego	
1	Polygon	2	2	647,689063	Bajo crecimiento de vegetación posterior al fuego	
2	Polygon	3	3	82584,347638	Zonas estables o sin quemar	
3	Polygon	4	4	245318,351494	Zonas quemadas con gravedad baja	
4	Polygon	5	5	109880,634898	Zonas quemadas con gravedad moderada-baja	
5	Polygon	6	6	29548,686235	Zonas quemadas con gravedad moderada-alta	
6	Polygon	7	7	5631,084269	Zonas quemadas con gravedad alta	

Tabla 1. Reclasificación de Coberturas correspondientes a los valores del índice NBR. Fuente: Resultados del autor.

Con este resultado final se materializa la salida gráfica del Índice de severidad NBR denominado, MAPA SEVERIDAD DE AREAS QUEMADAS OROCUE y, se realiza un análisis de las zonas afectadas dentro del municipio por incendios forestales.

Teniendo las coberturas de Reservas Naturales de la Sociedad Civil correspondientes al Registro Único Nacional de Áreas Protegidas y los Resguardos indígenas, se puede realizar un análisis visual entrelazando esta información con el Mapa de severidad de áreas quemadas y conocer si en realidad estos predios son un lugar que aporten a la conservación de la riqueza natural del país.

2. RESULTADOS Y DISCUSIONES

COMBINACIÓN DE BANDAS MULTIESPECTRALES PARA IDENTIFICACION DE INCENDIOS

Las imágenes satélite provenientes de Sentinel 2 se visualiza las zonas afectadas por el fuego a través de la combinación RGB como la 12, 8A, 4. Una combinación que caracteriza a la vegetación sana por presentar colores verdes mientras las zonas afectadas por el fuego quedarán representadas por contrastes cromáticos magentas virando a colores pardos y rojizos.

Los límites son perfectamente visibles a los ojos del análisis multiespectral y se puede cuantificar la superficie afectada mediante análisis de geometría o realizando análisis de afección mediante indicadores como el NBR.

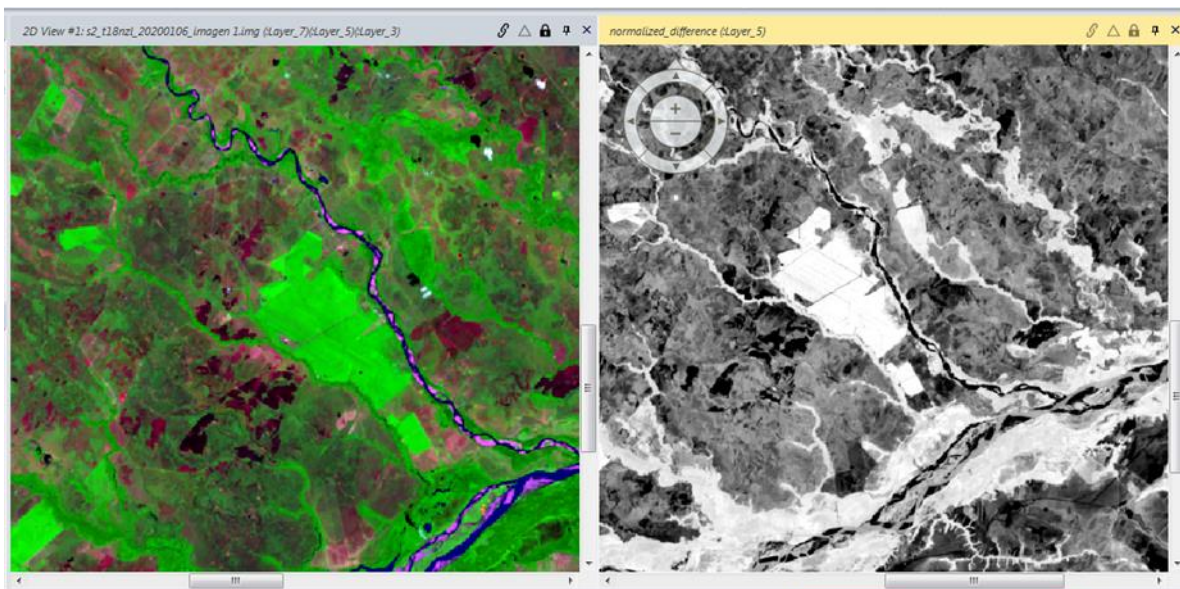


Ilustración 10. Imagen Sentinel 2 Izquierda: Combinación de Bandas espectrales para identificar incendios [SWIR1, NIR, B] [B7, B5, B3] correspondientes a Bandas Sentinel 2 (12,8A,4). Imagen Izquierda Sentinel 2A: Resultado de cálculo del índice NBR con Bandas 5 y Banda 7 (8 A y 12) Monocromática.

Los índices espectrales de borde rojo basados en Sentinel B12 y B8A mostraron la mayor idoneidad para la discriminación de la gravedad en las quemadas o incendios forestales.

Realizar la investigación con imágenes satelitales Sentinel-2, permitió evaluar la magnitud del incendio en términos de severidad y, generó información que confirma la utilidad del índice espectral NBR y dNBR para analizar mediante la reclasificación no supervisada los valores de severidad claves para el municipio de Orocué.

SEVERIDAD DE AREAS QUEMADAS EN EL MUNICIPIO DE OROCUÉ.

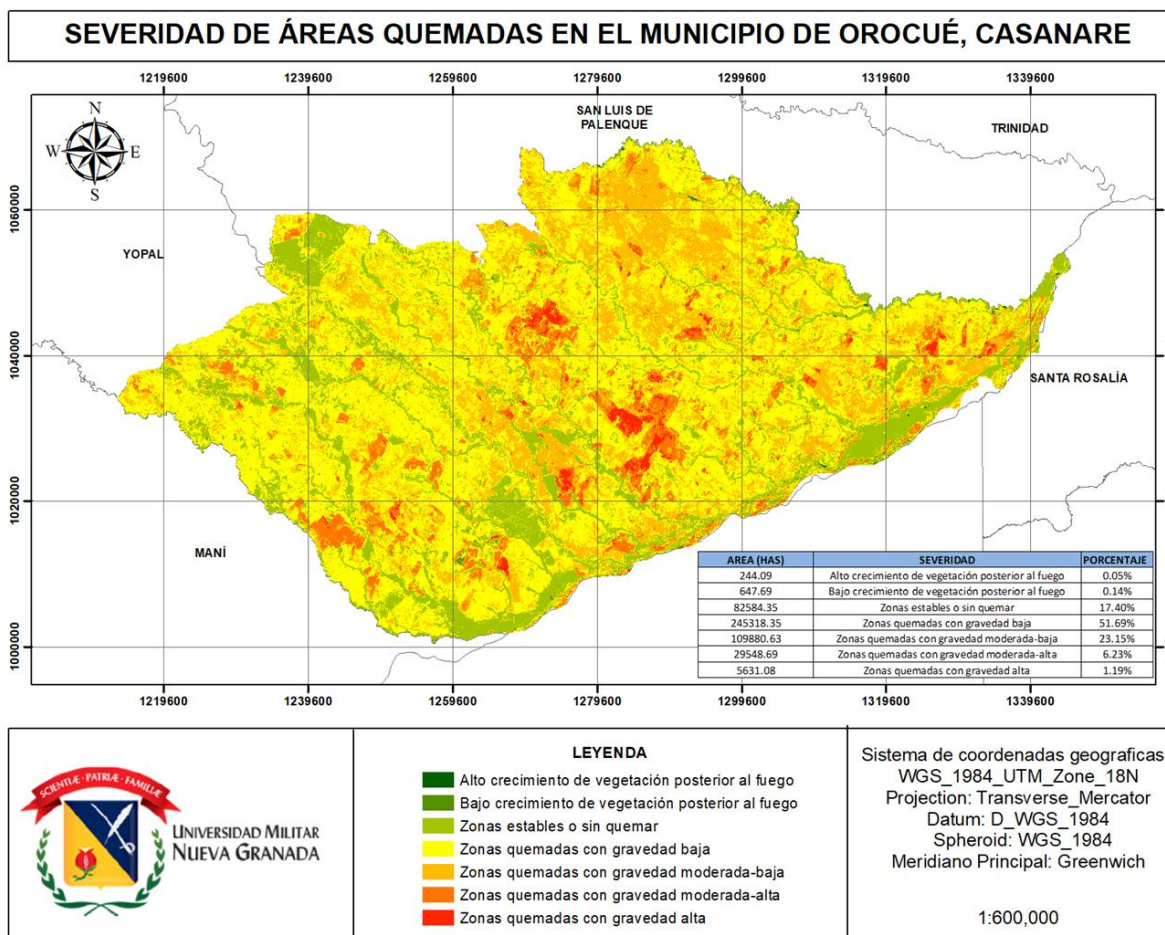


Ilustración 11. Mapa de Severidad del área quemada en Orocué-Casanare. Fuente: Autor

AREA (HAS)	SEVERIDAD	PORCENTAJE
244,09	Alto crecimiento de vegetación posterior al fuego	0,05%
647,69	Bajo crecimiento de vegetación posterior al fuego	0,14%
82584,35	Zonas estables o sin quemar	17,40%
245318,35	Zonas quemadas con gravedad baja	51,69%
109880,63	Zonas quemadas con gravedad moderada-baja	23,15%
29548,69	Zonas quemadas con gravedad moderada-alta	6,23%
5631,08	Zonas quemadas con gravedad alta	1,19%

Tabla 2. Clasificación de las coberturas de severidad del fuego con sus respectivas áreas y porcentajes. Fuente: Autor

El mapa final que representa el índice de la severidad de áreas quemadas para el municipio de Orocué, Casanare obtenido a partir de la clasificación del índice NBR, es realmente preocupante debido a que el 30.5% de las áreas corresponden a zonas quemadas con algún grado de severidad que pueden variar de moderado a gravedad

alta. Particularmente reviste de gran importancia las áreas quemadas con gravedad alta cuya extensión alcanza unas 5631 Ha.

Se debe tener especial atención en las zonas quemadas con gravedad baja, debido a que se pueden confundir con las zonas de pastizales de sabana debido a su escasa vegetación superficial.

La afectación por quemadas reviste tal gravedad para el ecosistema que, de acuerdo con lo observado, apenas el 0.05% de las áreas quemadas demuestran una alta recuperación de vegetación posterior al fuego y, en general solamente 0.19% logra recuperarse.

Las zonas estables o sin quemar corresponden a un 17,40% y, las mismas están ubicadas en áreas de alta humedad alrededor de los cuerpos de agua, de lo cual se puede inferir que la protección se da naturalmente, por la dificultad que tiene la población circundante de generar fuego en estas zonas inundables, que mantienen una buena saturación de agua durante todo el año.

EL FUEGO Y LAS COMUNIDADES INDÍGENAS

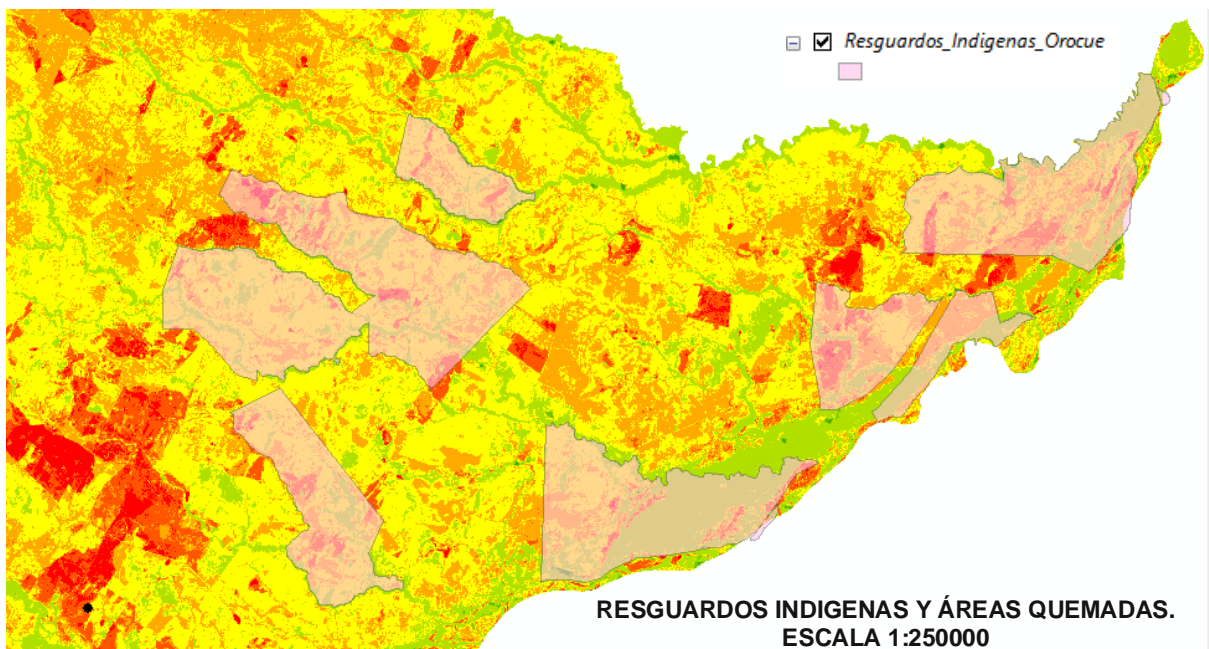


Ilustración 12. Resguardos Indígenas de la comunidad Sáliva en el municipio de Orocué.

Observando la cobertura de los resguardos indígenas más amplios de Orocué sobrepuesto en el mapa de severidad de incendios, se analiza que el manejo del fuego en las sabanas aún hace parte de la cultura del pueblo Saliva, que es difícil concretar un plan de manejo y algunos objetivos de conservación para esta comunidad indígena, debido a que no tienen una percepción generalizada de que las quemadas son perjudiciales, y se conserva el concepto del fuego como un factor determinante que mantiene el paisaje de sabana.

RESERVAS NATURALES DE LA SOCIEDAD CIVIL (RNSC)

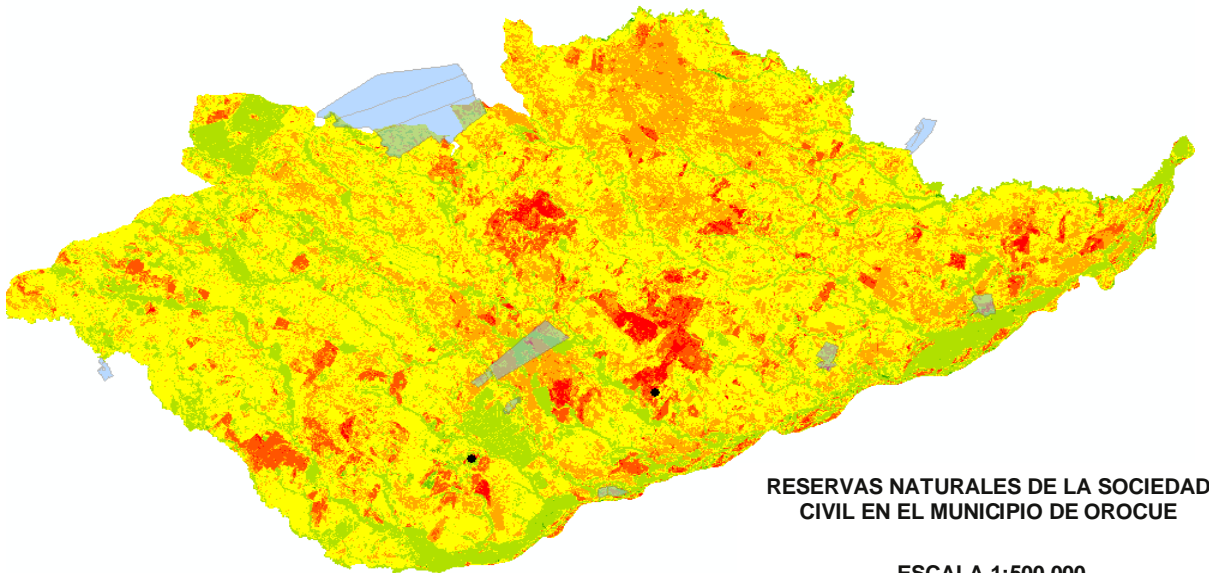
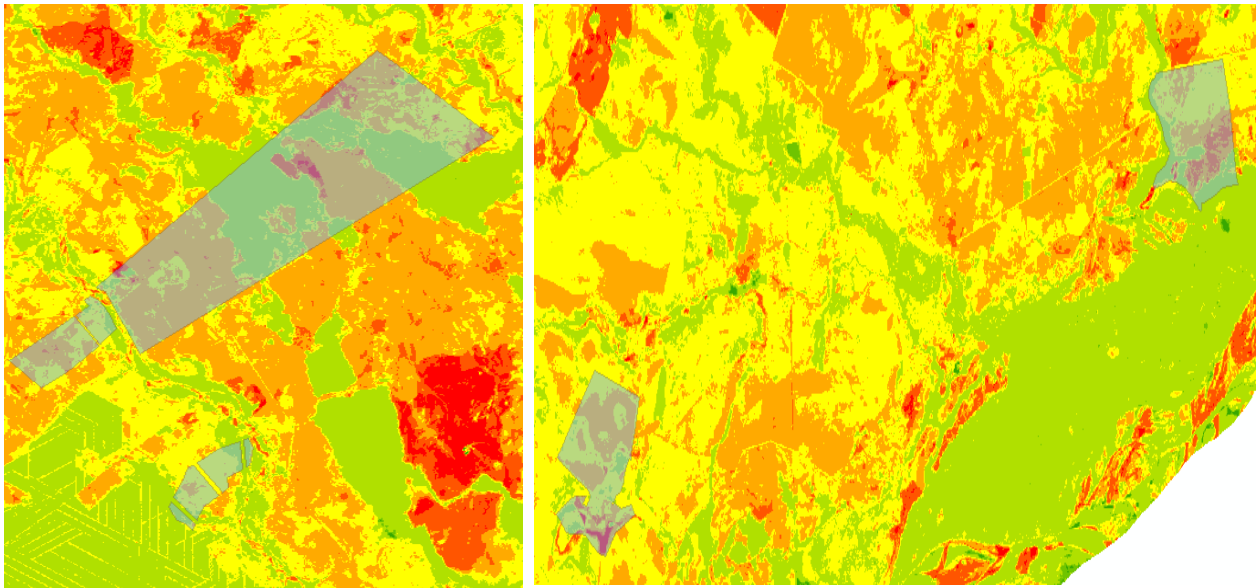


Ilustración 13. Reservas naturales de la sociedad civil en el municipio de Orocué.

Como se puede apreciar de forma visual en el mapa, las pocas áreas en el Municipio de Orocué que se encuentran dispuestas para la conservación, En la mayoría de los casos mantienen sus actividades productivas, pero a una escala mas pequeña, las quemas se producen en una baja proporción.

De los 474558,24 Ha totales del municipio de Orocué, solo 7732 Ha han sido destinadas como Reservas Naturales correspondiendo solamente a un 0,016%. Se analiza la falta una cultura de conservación y uso sostenible de la vegetación natural.

Las zonas de reserva tratan de conservar coberturas de Bosque de Galería y Ripario, que circundan áreas cercanas a humedales, morichales y drenajes.

ZONAS DE ANOMALIA TERMICA.

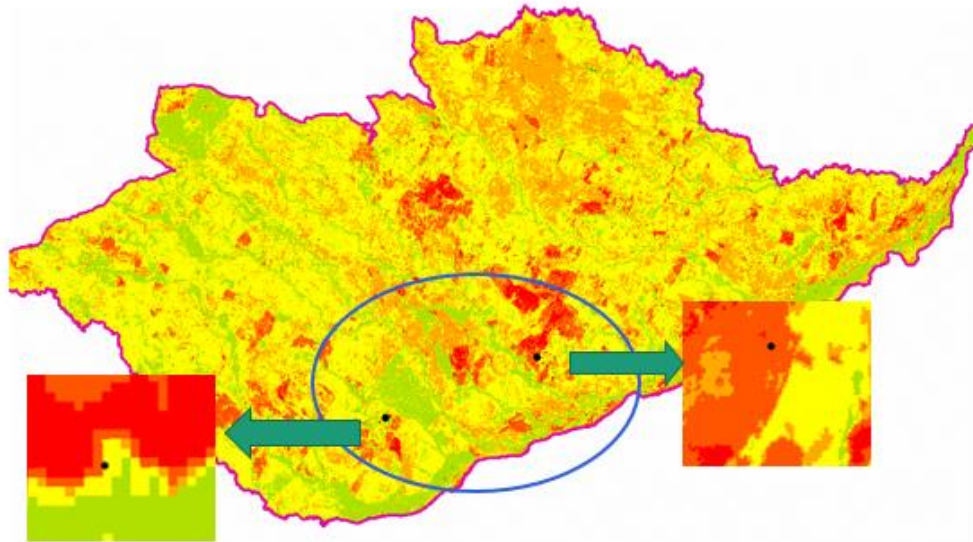


Ilustración 14. Puntos de calor del Sensor Modis detectados en el municipio de Orocué.

Con respecto a las zonas de Anomalía Térmica Los puntos de calor del sensor MODIS se han utilizado extensamente como aproximación a la ocurrencia del fuego, especialmente en aquellos territorios en donde las estadísticas de incendios forestales no están disponibles. [20]. En la siguiente figura observamos que debido a la resolución espacial de las imágenes MODIS que oscilan en 500 m y 1 km se considera que estos puntos de fuego no son muy confiables para la detección de incendios más pequeños, en grandes áreas.

Estos resultados son útiles para realizar una comparación y un análisis cualitativo de la frecuencia y la presencia de incendios.

CONCLUSIONES

- Las imágenes obtenidas del sensor SENTINEL 2 de nivel 1C, se consideran como una alternativa económica para realizar análisis y salidas gráficas de áreas quemadas para el municipio de Orocué, primero por la alta resolución espacial que maneja en la bandas 8A y 12 (20m), la nitidez en las coberturas que ofrece a escala 1:100.000, la abundante información que proporcionan en la zona del SWIR y NIR, la cual permite eliminar gran parte de las confusiones que se producen entre la zona quemada y otras cubiertas como sombras de nubes y cuerpos de agua.

- Al realizar una corrección atmosférica a las bandas espectrales, la imagen Sentinel 2 ofrece un alto grado de nitidez en la imagen, esto es importante para lograr resultados acertados en la reclasificación no supervisada.
- Entre los índices espectrales, el NBR muestra su alta potencialidad para discriminar superficies afectadas por incendios forestales frente a otras cubiertas que no presentan daños.
- La Clasificación no supervisada es una herramienta útil que ofrece el ArcMAP para determinar la severidad causada por incendios forestales, debido a que permite la agrupación de datos basada en la información numérica de las clases espectrales para relacionarlas con los rangos del NBR suministrados por la USGS.
- En el municipio de Orocué predominan zonas quemadas con gravedad baja con un porcentaje del 51,7 % (245318,35 Ha) del total del área del municipio, sin embargo, los valores de las áreas con incidentes de incendios corresponden al 82.26%, una cifra representativa para ser considerada por las autoridades implicadas en la gestión territorial y ambiental. Con este resultado se reconoce que la mayoría del área del municipio de Orocué es un ecosistema dependiente del fuego como la mayoría de las sabanas de la Orinoquia, conformadas principalmente por coberturas de tipo pastizal y herbazal.
- Con el análisis de la clasificación de coberturas de severidad del fuego, se logró determinar la baja capacidad de recuperación que poseen algunas zonas de bosque de galería y morichales ubicadas en sabanas inundables y rodeando caños , ríos y cuerpos de agua (0,14%), estas áreas deberían ser parte del Sistema Nacional de Áreas protegidas de Colombia, por ser Ecosistemas sensibles.
- Los resultados obtenidos en la investigación con relación a la ubicación de los focos activos de calor muestran la utilidad de los productos de anomalías térmicas de MODIS para estudiar la distribución espaciotemporal de los incendios a una escala regional.
- Las áreas bajo figuras de manejo especial sirven de alguna forma como barrera contra incendios de la cobertura vegetal. En los resguardos indígenas se detectan el doble de afectación por áreas quemadas, probablemente porque en la actualidad son ganaderos, poseen bovinos y equinos y persisten con prácticas agrícolas y de subsistencia tradicionales usando el fuego, en cambio las áreas bajo la figura de Reservas Naturales de la Sociedad Civil se observan un mínimo de coberturas quemadas debido a que reciben acompañamiento de parte de autoridades ambientales u organizaciones privadas para la capacitación y construcción de los planes de manejo, y prácticas agrícolas sostenibles.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Huertas Herrera, B. L. G. Baptiste Ballera, M. Toro Manríquez y H. Huertas Ramírez, «MANEJO DE LA QUEMA DE PASTIZALES DE SABANA INUNDABLE: UNA MIRADA DEL PUEBLO ORIGINARIO SÁLIVA EN COLOMBIA,» *Chungara Revista de Antropología Chilena*, vol. 51, nº 1, p. 10, 2018.
- [2] D. A. Pascual, F. H. Bernal Toro, F. González, M. Morales Rivas, J. D. Pabón Caicedo, G. E. Páramo Rocha y Á. d. C. Parra Lara, *Incendios de la cobertura vegetal en Colombia*, Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2011.
- [3] L. R. R. Beltrán, «IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS QUEMADAS POR INCENDIOS FORESTALES EN EL DEPARTAMENTO DEL META Y DETERMINACIÓN DE MEDIDAS DE INTERVENCIÓN PARA SU REDUCCIÓN,» Universidad Católica de Manizales, Manizales, 2017.
- [4] A. Ariza, «Tecnologías Satelitales para Mapeo de Susceptibilidad a incendios forestales,» de *Reunión Regional Virtual de ONU-SPIDER para América Latina*, Bonn, 2012.
- [5] L. Belalcazar, «Colombia y Venezuela atraviesan por su pico más alto de quemaduras e incendios forestales,» *Semana Sostenible*, 22 Marzo 2020.
- [6] H. Villegas Vega, «INTRODUCCION A LA PERCEPCION REMOTA,» Ingeominas, Bogota, 2008.
- [7] Copernicus.eu, «<https://www.copernicus.eu/en/european-forest-fire-information-system>,» 2 Julio 2018. [En línea]. Available: <http://www.copernicus.eu>.
- [8] A. Fernández-Mansoa, O. Fernández-Mansoa y Q. Carmen, «SENTINEL-2A Red-Edge Spectral Indices Suitability for Discriminating Burn Severity.,» *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, pp. 170-175, 2013.
- [9] J. Delegido, A. Pezzola, A. Casella, C. Winschel, E. P. Urrego, J. C. Jiménez, G. Soria, J. A. Sobrino y J. Moreno, «Estimación del grado de severidad de incendios en el sur de la Provincia de Buenos Aires, Argentina usando Sentinel 2 y su comparación con Landsat-8,» *REVISTA DE TELEDETECCIÓN (Asociación Española de Teledetección)*, vol. 4, nº 51, pp. 47-60, 2018.
- [10] UNOOSA, «Knowledge Portal Space-based Information for Disaster Management and Emergency Response,» UNOOSA, 2014. [En línea]. Available: <https://un-spider.org/es/asesoria/practicas-recomendadas/practica-recomendada-mapeo-gravedad-quemaduras/paso-a-paso/qgis>. [Último acceso: 30 Octubre 2020].

- [11] J. E. Keeley, «Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage,» *International Journal of Wildland Fire*, nº 18, pp. 116-126, 2009.
- [12] R. Matellanes, «<http://www.gisandbeers.com>,» 30 abril 2018. [En línea]. Available: <http://www.gisandbeers.com>.
- [13] C. M. Di Bella, G. Posse, M. E. Beget, M. A. Fischer, N. Mari y S. Verón, «La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones.,» *Ecosistemas*, p. 15, 2008.
- [14] B. J. Sebastian, G. Tania M y A. Dolors, «DINÁMICA ESPACIO TEMPORAL DE OCURRENCIA DE INCENDIOS EN ZONAS CON DIFERENTES TIPO DE MANEJO EN EL NORESTE DE LA AMAZONIA: ¿BARRERA EFECTIVA?,» *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, p. 7, 2017.
- [15] <https://www.wwf.org.co/>, «<https://www.wwf.org.co/>,» 7 julio 2016. [En línea]. Available: https://www.wwf.org.co/donde_trabajamos/orinoquia/. [Último acceso: 23 Octubre 2020].
- [16] D. N. d. B. d. Colombia, «REPORTE DE INCENDIOS DE COBERTURA VEGETAL 2020 Enero 01 – Noviembre 20,» DNBC, Bogotá, 2020.
- [17] J. P. Solano, «INCENDIOS FORESTALES EN CASANARE NO DAN TREGUA, 22 MIL HECTÁREAS CONSUMIDAS POR EL FUEGO.,» <https://www.llaneradio.com/>, p. 1, 3 marzo 2020.
- [18] O. Correa, «Orocué, el municipio más afectado por incendios forestales en Casanare,» *El Diario del Llano- Hola Casanare*, p. 1, 9 Marzo 2020.
- [19] E. Chuvieco, C. Y, A. Hantson y A. López., «Comparación entre focos de calor MODIS y perímetros de área quemada en incendios mediterráneos,» *Asociación Española de Teledetección*, p. 22, 2012.
- [20] Wikipedia, «Wikipedia,» 6 Octubre 2020. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Orocu%C3%A9>. [Último acceso: 26 Noviembre 2020].
- [21] E. TIEMPO, «Incendios forestales asedian áreas protegidas del país,» *EL TIEMPO*, p. 1, 21 Febrero 2020.
- [22] L. reportería, «La reportería.com,» 2 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://lareporteria.com/2020/03/02/incendios-forestales-pone-en-riesgo-los-morichales-de-orocue/?Ancho=1366&Alto=768>. [Último acceso: 15 octubre 2020].
- [23] NASA, «FIRMS Fire Information for Resource Management System,» 6 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://earthdata.nasa.gov/>. [Último acceso: 24 Noviembre 2020].

- [24] USGS, «earthexplorer.usgs.gov,» USGS (United States Geological Survey), 6-11 MARZO 2020. [En línea]. Available: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. [Último acceso: 15 Noviembre 2020].
- [25] R. Metallanes, «www.gisandbeers.com,» 21 Diciembre 2019. [En línea]. Available: <http://www.gisandbeers.com/lo-deberias-saber-imagenes-sentinel-2/>. [Último acceso: 16 Noviembre 2020].
- [26] D. Arenas Herrera, «Material de estudio Percepción Remota,» Bogotá, 2020.
- [27] H. V. VEGA, «INTRODUCCION A LA PERCEPCION REMOTA,» INGEOMINAS, Bogotá, 2008.
- [28] C. Emilio y I. Aguado, «Generación de un Modelo de Peligro de Incendios Forestales mediante Teledetección y SIG,» *TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*, p. 8, 2007.
- [29] E. Chuvieco, I. Aguado, M. Yebra, H. Nieto y M. Martín, «Generación de un Modelo de Peligro de Incendios Forestales mediante teledeteccion y SIG,» *TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*, p. 8, 2007.