

# Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal debido a la explotación de carbón a cielo abierto en la mina El Cerrejón, ubicada en el departamento de La Guajira, Colombia, durante el período comprendido entre 1986 y 2023.

Multitemporal Analysis of Vegetation Cover Change Due to Open-Pit Coal Mining at El Cerrejón Mine in La Guajira Department, Colombia, from 1986 to 2023

Andres Mauricio Arango  
Cifuentes1<sup>\*</sup>  
andres.arango05@usc.edu.co

Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de Especialización en Sistemas de Información Geográfica  
(1)

## **Resumen**

La explotación de carbón a cielo abierto en el departamento de La Guajira ha experimentado un crecimiento importante en las últimas cuatro décadas, planteando interrogantes sobre el alcance y las consecuencias de la pérdida de vegetación en la región. El presente estudio tiene como objetivo realizar un análisis multitemporal de los cambios en la cobertura vegetal en las minas de carbón El Cerrejón y áreas de influencia en un periodo temporal desde 1986 hasta el 2023. Utilizando técnicas de análisis geoespacial en el software libre QGIS e imágenes satelitales provenientes de los sensores remotos Landsat y Sentinel, y procesadas posteriormente con el complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), se logró obtener salidas graficas que permiten cuantificar y evaluar los cambios históricos del área de estudio, así como comprender los comportamientos espaciales y temporales de los cambios observados. Este análisis multitemporal permite obtener una visión más a fondo de la magnitud y la dinámica de los cambios en la cobertura vegetal frente a la explotación minera. Se espera que los resultados de este análisis aporte a una mejor comprensión de los impactos ambientales de la actividad extractiva en el departamento de La Guajira, brindando información importante para la toma de decisiones en materia de gestión ambiental. De igual manera, se espera que este estudio sirva como base científica para la implementación de estrategias de mitigación y restauración ecológica en áreas afectadas por la pérdida de cobertura vegetal.

*Palabras Clave: Análisis Multitemporal, Cobertura Vegetal, Explotación a Cielo Abierto, Imágenes Satelitales, Mina El Cerrejón, Sensores Remotos.*

## **Abstract**

The open-pit coal mining in the La Guajira department has experienced significant growth in the last four decades, raising questions about the extent and consequences of vegetation loss in the region. The aim of this study is to conduct a multitemporal analysis of changes in vegetation cover in the El Cerrejón coal mines and surrounding areas from 1985 to 2023. By utilizing geospatial analysis techniques in the open-source software QGIS and satellite imagery from Landsat and Sentinel remote sensors, subsequently processed with the Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), graphical outputs were obtained to quantify and evaluate historical changes in the study area, as well as understand the spatial and temporal behaviors of observed changes. This multitemporal analysis provides a deeper insight into the magnitude and dynamics of changes in vegetation cover due to mining exploitation. The results of this analysis are expected to contribute to a better understanding of the environmental impacts of extractive activities in the La Guajira department, providing essential information for environmental management decision-making. Likewise, it is anticipated that this study will serve as a scientific basis for the implementation of mitigation and ecological restoration strategies in areas affected by vegetation loss.

*Keywords: Multitemporal Analysis, Vegetation Cover, Open-pit Exploitation, Satellite Imagery, El Cerrejón Mine, Remote Sensors.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento de la industria minera a cielo abierto genera cambios significativos en las dinámicas ecosistémicas creando de igual manera impactos ambientales de gran magnitud. La mina El Cerrejón, ubicada en el departamento de La Guajira, Colombia, es una de las operaciones mineras a gran escala que ha experimentado un crecimiento importante en las últimas cuatro décadas. La actividad extractiva a cielo abierto en esta región ha tenido repercusiones profundas en el comportamiento de la cobertura vegetal, un componente fundamental de los ecosistemas terrestres. Este artículo tiene como objetivo analizar multitemporalmente el cambio de cobertura vegetal de la mina El Cerrejón para un área de 52160 hectáreas (ha), basado en los parámetros de incremento de áreas artificializadas, y cambios en áreas de baja actividad fotosintética, áreas de alta actividad fotosintética y áreas abiertas sin o con poca vegetación. El desarrollo de la investigación muestra inicialmente la metodología para la obtención de resultados basado en el procesamiento de imágenes satelitales en software libre QGIS, seguido de un análisis de los datos obtenidos y posteriormente comparados con resultados de estudios previos relacionados, luego de esto, se mencionan las problemáticas ambientales del área de estudio planteadas por diferentes fuentes, y por último se aporta una conclusión enfocada hacia la profundización de las investigaciones que permitan avanzar en la unificación de criterios de factores que intervienen en el comportamiento de los suelos y coberturas vegetales del área de estudio.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología empleada en la presente investigación es de carácter cuantitativo, se basa en el procesamiento digital de imágenes satelitales obtenidas a través de sensores remotos de las misiones Landsat y Sentinel, utilizando el software libre QGIS. Se abarca un período temporal que va desde 1986 hasta 2023, buscando una diferencia de 4 a 6 años entre las imágenes. El propósito de esta metodología es generar salidas gráficas segmentadas y corregidas atmosféricamente en formato ráster del área de estudio. Estas salidas resultan de una clasificación supervisada que permite la obtención de datos y la evaluación cuantitativa de los cambios en las coberturas vegetales a lo largo del tiempo. Las categorías de cobertura consideradas incluyen áreas con alta y baja actividad fotosintética, zonas urbanizadas y áreas abiertas con escasa o nula vegetación. Para lograr una identificación precisa de cada área, se buscará la combinación óptima de bandas espectrales que permita una diferenciación eficaz. Una vez obtenidos los resultados, se llevará a cabo un análisis y discusión de estos, teniendo en cuenta fuentes y trabajos previos relacionados con el tema en cuestión.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

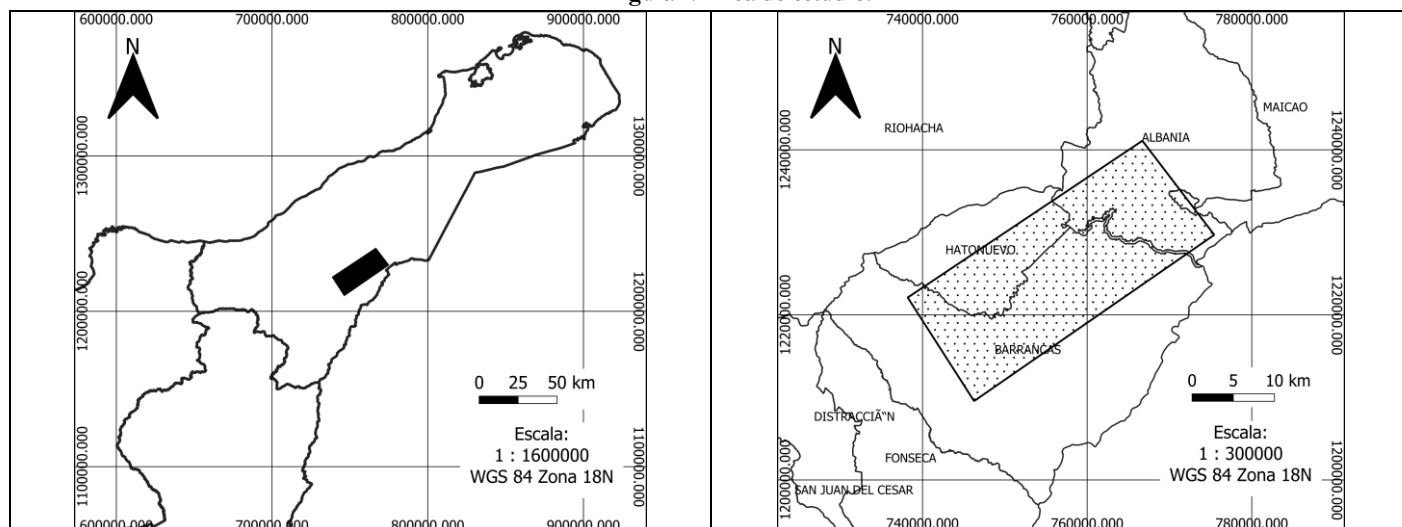
### 3.1. Resultados de estudio

El desarrollo de siguiente estudio fue realizado mediante el procesamiento de imágenes satelitales en el software libre QGIS con versión 3.16, y su complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), el sistema de coordenadas utilizado es WGS 84 / UTM Zona 18N, con una escalada de trabajo de 1: 250000, a continuación, se describe el proceso seguido.

#### 3.1.1 Definición de área de estudio

A través del portal de datos abiertos del (Servicio Geológico Colombiano, 2023) SGC, se descarga la capa en formato shapefile de zonas carboníferas de Colombia, para este caso se tiene en cuenta la zona número uno perteneciente a La Guajira, con la ayuda del software (Google Earth Pro, 2023) se designa un área de estudio rectangular dentro del polígono dado por el SGC, contempla la mina El Cerrejón y los centros poblados de Albania y Hatonuevo, este polígono es exportado en formato KMZ al software QGIS.

Figura 1. Área de estudio.



Realizado con: (QGIS 3.16, 2020)

### 3.1.2 Descarga de imágenes satelitales

Por medio de la plataforma del Servicio Geológico de los Estados Unidos, (USGS EarthExplorer, 2023) y el programa de observación de la Tierra de la Unión Europea en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), (Copernicus Open Access Hub, 2023) se descargan imágenes satelitales de los sensores remotos Landsat 4, 5 y 8, y Sentinel-2 respectivamente, buscando una temporalidad de diferencia entre las imágenes de cuatro a seis años, esto dependiendo de la calidad de las imágenes encontradas y el porcentaje de nubosidad, el cual no es superior al 10%. La resolución espacial de las imágenes Landsat es de 30 metros y las de Sentinel-2 de 10 metros. En la siguiente tabla se relacionan las imágenes utilizadas en el estudio.

Tabla 1. Imágenes satelitales utilizadas.

Año	ID	Path	Row	Porcentaje de nubosidad (%)	Satélite	ID Sensor
1986	LT05_L2SP_008052_19860731_20200918_02_T1	8	52	5,00	LANDSAT_5	TM
1990	LT04_L2SP_008052_19901123_20200915_02_T1	8	52	7,00	LANDSAT_4	TM
1996	LT05_L2SP_008052_19960827_20200911_02_T1	8	52	1,00	LANDSAT_5	TM
2001	LT05_L2SP_008052_20010129_20200906_02_T1	8	52	2,00	LANDSAT_5	TM
2007	LT05_L1TP_008052_20070911_20200829_02_T1	8	52	10,00	LANDSAT_5	TM
2013	LC08_L2SP_008052_20131029_20200912_02_T1	8	52	9,47	LANDSAT_8	OLI_TIRS
2018	S2A_MSIL1C_20181225T152631_N0207_R025_T18PYT_20181225T170551	R025	T18PYT	0,07	Sentinel-2	MSI
2023	S2A_MSIL1C_20230503T152641_N0509_R025_T18PYT_20230503T202700	R026	T18PYT	0,07	Sentinel-2	MSI

Fuente: (USGS EarthExplorer, 2023) y (Copernicus Open Access Hub, 2023)

### 3.1.3 Corrección atmosférica de imágenes

Con las imágenes por bandas previamente cargadas en el software y con la ayuda del complemento (SCP), en la ventana de preprocesamiento se elige el sensor que generó la imagen y se selecciona la opción “Aplicar la corrección atmosférica DOS1”, agregando el archivo de metadatos integrado en el paquete de descarga de las imágenes, luego de rodar el proceso se cargan automáticamente en el panel de capas todas las bandas de la imagen ya corregidas.

### 3.1.4 Construcción de ráster virtual

Para cada juego de bandas de las imágenes, en el menú de la barra de herramientas Ráster, se selecciona la opción “Miscelánea” seguido de la opción, “Construir ráster virtual” teniendo en cuenta que las bandas queden separadas para poder realizar combinaciones entre ellas más adelante.

### 3.1.5 Recorte por máscara

Para cada imagen ráster virtual construido, en la barra de herramientas desde el menú Ráster se selecciona la opción “Extracción” y posteriormente “Cortar ráster por capa de máscara”, la máscara usada es la definida como área de estudio.

**Tabla 2. Área de recorte por máscara por sensor.**

Sensor	Imagen recortada por máscara (ha)
Landsat 4, 5 y 8	52160,58
Sentinel 2	52161,25

### 3.1.6 Composición de bandas en imágenes

Para el caso puntual de este estudio se realizó la combinación de falso color Infrarrojo teniendo en cuenta la sensibilidad a la vegetación y a las capas de interés, territorios artificializados y áreas abiertas sin o con poca vegetación, según (Alonso Ramos, 2023) “La definición de las bandas para crear cada salida gráfica, y la secuencia de colores de esta, varía entre los diferentes sensores y las aplicaciones del proyecto en que fueron generadas. La composición más común es conocida como falso color o infrarrojo color, resultante de superponer los canales de rojo, verde y azul sobre las bandas correspondientes al infrarrojo cercano, el rojo y el verde individualmente”, en la tabla 3 se muestra la combinación de bandas utilizada para cada sensor.

**Tabla 3. Combinación de bandas para falso color infrarrojo.**

Sensor	Combinación
Landsat 4 y 5	4-3-2
Landsat 8	5-4-3
Sentinel-2	8-4-3

### 3.1.7 Clasificación supervisada

La clasificación supervisada fue realizada mediante el panel SCP Dock, creando una capa de entrenamiento en “Training Input”, en el cual se marcaron polígonos definidos por cuatro clases de interés del área de estudio, nombradas en la tabla 4, a través del menú del complemento SCP en “Band processing” seguido de “Clasificación” se obtuvieron las salidas gráficas ya clasificadas.

Para determinar la clasificación realizada se tuvo en cuenta, los siguientes parámetros para la combinación de falso color en infrarrojo, “Los tonos más comunes en una combinación en falso color son: Rojo, representa una vegetación desarrollada y saludable; Rosa, indica áreas con una vegetación menos densa y desarrollada; Blanco, áreas con vegetación escasa o ausente; Marrón, vegetación arbustiva de variada densidad; Beig-dorado, zonas de transición que indican prados secos relacionados con matorrales dispersos”. (Alonso Ramos, 2023).

**Tabla 4. Capas de clasificación supervisada.**

Territorios artificializados	Hacen referencia a las áreas con intervenciones antrópicas, como, zonas de extracción minera, tejidos urbanos continuos y discontinuos y cuerpos de agua artificiales. En las imágenes compuestas se logran identificar por sus colores azul claro y oscuro, y tonalidades de blanco con matices de azul.
Área de baja actividad fotosintética	Estas áreas son aquellas en que las plantas y organismos fotosintéticos experimentan una actividad limitada o reducida, condición resultante de factores como, estrés hídrico, condiciones climáticas desfavorables, perturbaciones ambientales y/o nutrientes limitados. En estas áreas, las plantas pueden mostrar síntomas de estrés, como hojas amarillentas, marchitamiento o una disminución general en el crecimiento. Los colores que logran identificar este tipo de áreas están compuestos por tonos marrones y rosados.
Área de alta actividad fotosintética	Son áreas en las que las plantas y organismos fotosintéticos experimentan actividades productivas y eficientes, dadas por factores como condiciones ambientales propicias que permiten su óptimo desarrollo, captura de luz solar, absorción de dióxido de carbono, y producción de nutrientes. Estas áreas son identificables en la imagen compuesta en falso color infrarrojo, ya que resulta en un color rojo.

Áreas abiertas sin o con poca vegetación	Estas son áreas en el cual la cobertura vegetal es limitada o inexistente, generalmente son territorios con suelos desnudos, arenas y rocas con muy baja densidad de vegetación. Estas áreas son identificables ya que de ellas se desprenden colores beige claro y oscuros y dorados.
Nubes	Se identifican por su color natural blanco, y pueden dar matices de colores de las capas cercanas, sin embargo, para este estudio solo se tuvo en cuenta el blanco absoluto, con el fin de evitar errores entre capas en el resultado de la clasificación.
Sombra de nubes	Se identifican fácilmente por su color negro.

### 3.1.8 Obtención de resultados ráster

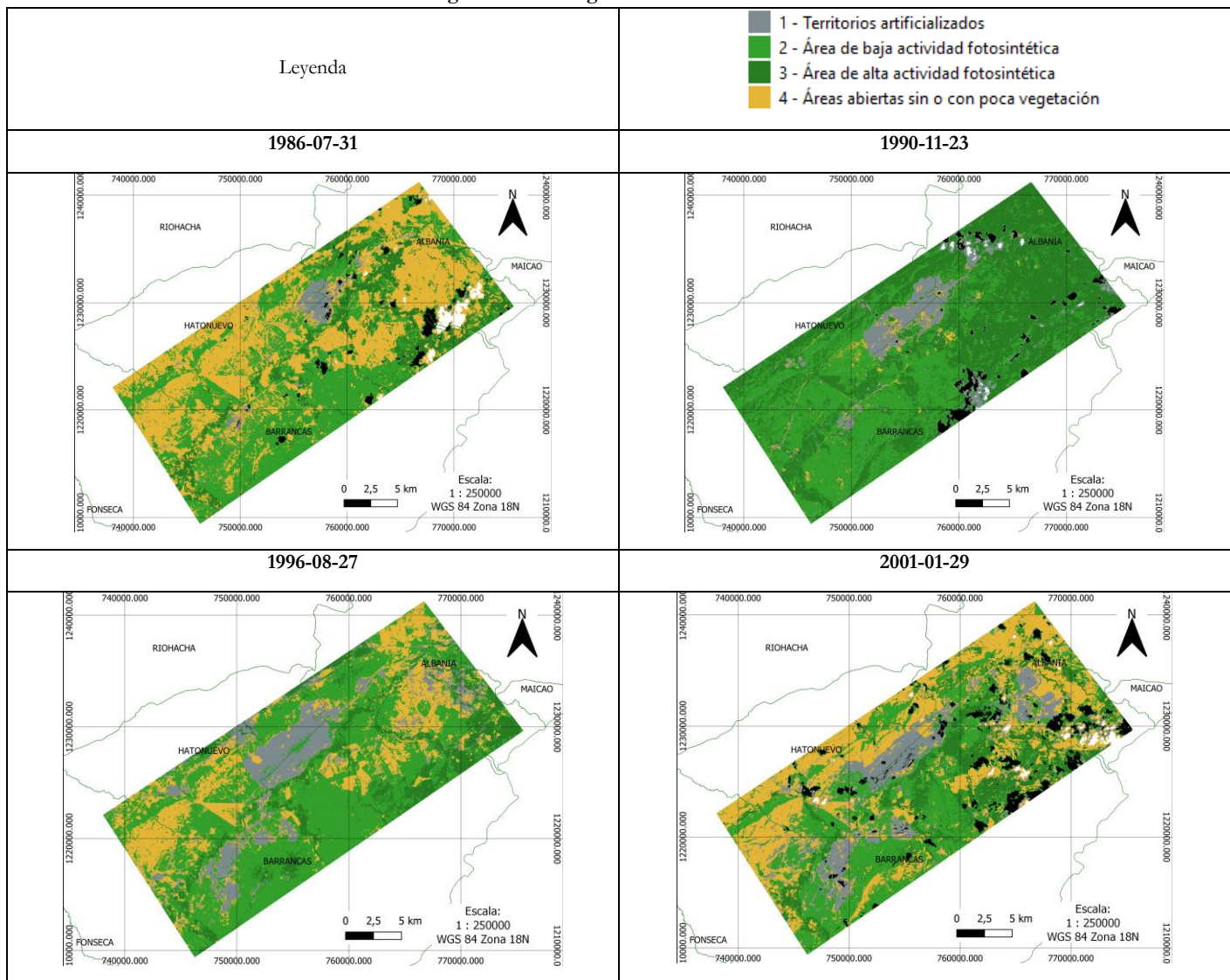
En (QGIS with GRASS, 2020) desde la caja de herramienta de procesos se utiliza “r report” para determinar las áreas clasificadas previamente, para cada imagen del estudio multitemporal.

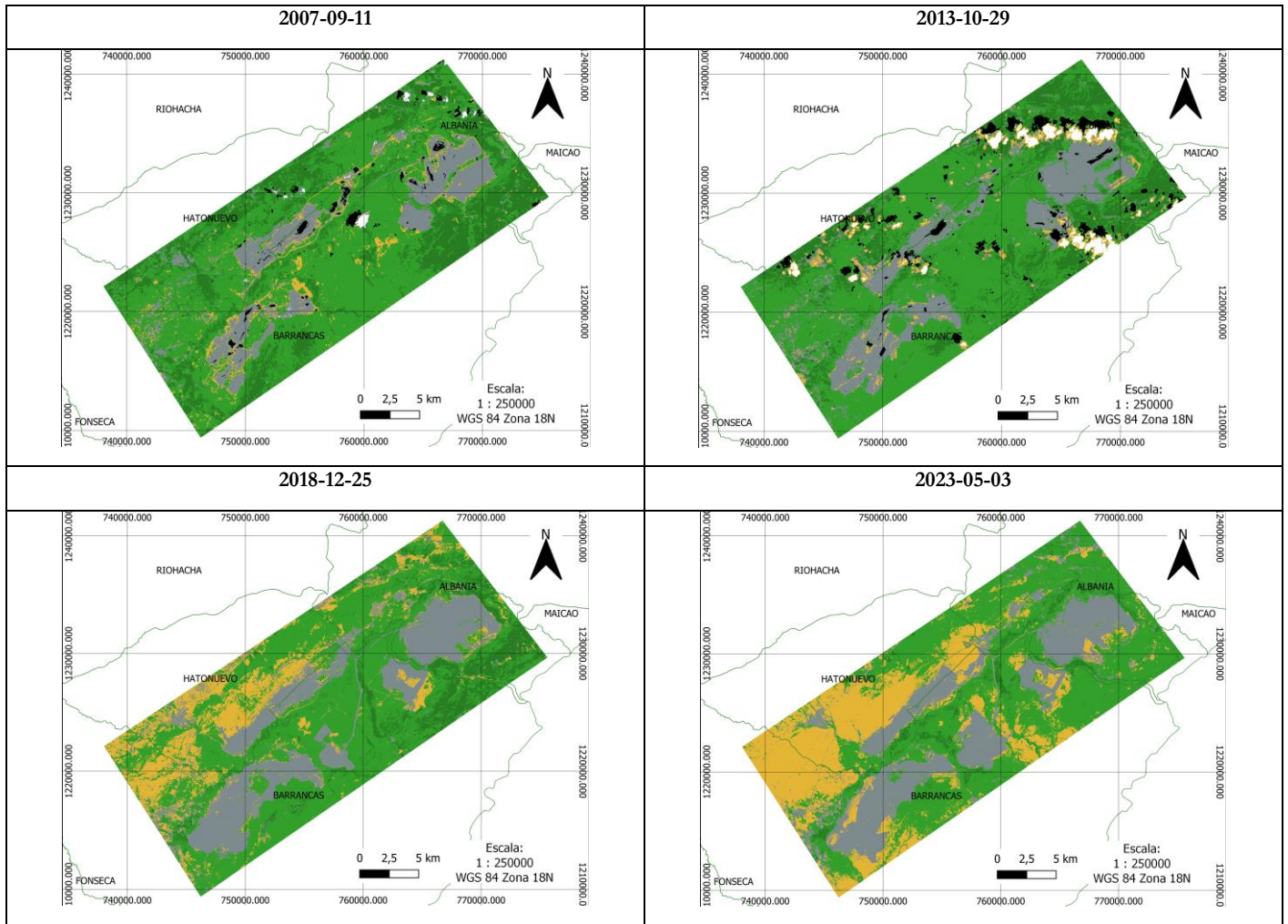
### 3.1.9 Edición de salidas gráficas

Con la herramienta “Nueva composición de impresión” se realiza el acabado de las salidas gráficas, en las cuales se agrega, cuadrícula de coordenadas, flecha al norte, barra de escala y etiqueta de sistema de coordenadas, la escala de impresión es de 1 : 250000 y el sistema de coordenadas es WGS 84 / UTM zona 18N.

### 3.1.10 Salidas gráficas obtenidas

Figura 2. Salidas gráficas resultantes de estudio.





Realizado con: (QGIS 3.16, 2020).

### 3.1.11 Datos resultantes

Tabla 5. Datos resultantes de estudio.

Año	Territorios artificializados	%	Área (ha)				Áreas abiertas sin o con poca vegetación	%
			Área de baja actividad fotosintética	%	Área de alta actividad fotosintética	%		
1986	1681,92	3,22	19759,32	37,88	6397,47	12,26	22680,81	43,48
1990	4451,94	8,54	21699,36	41,60	23606,82	45,26	1105,47	2,12
1996	6994,71	13,41	26418,96	50,65	6389,91	12,25	12357	23,69
2001	6965,46	13,35	16946,46	32,49	7815,87	14,98	17201,43	32,98
2007	7911,9	15,17	29164,23	55,91	11640,06	22,32	2435,13	4,67
2013	10037,88	19,24	27512,46	52,75	9249,12	17,73	2025,81	3,88
2018	12317,35	23,61	26664,41	51,12	4973,28	9,53	8206,21	15,73
2023	12272,34	23,53	24096,22	46,20	1616,02	3,10	14176,67	27,18

### 3.2 Análisis de resultados

Es de gran relevancia tener en cuenta para realizar el análisis, la fecha de generación de la imagen satelital, ya que el régimen climático tiene una relación directa con el comportamiento de la cobertura vegetal, según la (Corporación Autónoma Regional de La Guajira, 2006) en el departamento “El comportamiento de las precipitación tiene un ciclo de

dos fases, una primera fase entre los meses de abril a junio, y otra, más significativa, entre los meses de septiembre y octubre, sin embargo esta fase puede llegar hasta el mes de noviembre, iniciando desde finales de agosto. Asimismo, los períodos de sequía más relevantes ocurren en los meses de junio y julio y el otro en los meses de enero a marzo, con temperaturas promedio de hasta 34.3°C en la zona Subtropical y de 30°C en la zona Tropical”.

### 3.2.1 Territorios artificializados

La artificialización del territorio en el área de estudio tiene un aumento progresivo durante el periodo multitemporal, marcado inicialmente por un crecimiento en la primera década de 1986 a 1996 de 5312 hectáreas (ha), equivalente al 10% del total promedio del área de estudio (52160 ha), seguido de un crecimiento menos marcado hasta el año 2007 de 917 ha, equivalentes al 1.7%, durante el periodo de 2007 a 2018 nuevamente se evidenció un aumento significativo en el cual se registraron 4406 ha, con un crecimiento porcentual del 8.4%, sin embargo para el año 2023 resulta un decrecimiento mínimo de -45 hectáreas, que no supera el 0.1%. En total se registró un aumento de territorios artificializados de 10590 ha, equivalentes al 20,3% del total de área de estudio.

### 3.2.2 Áreas de baja actividad fotosintética

Se puede observar una variación en el área de baja actividad fotosintética a lo largo de los años, los datos resultantes muestran que hubo años en los que el área de baja actividad fue mayor, como en 2007 con 29164 ha y 2013 con 27512 ha, equivalentes al 55.9 % y 52.7% respectivamente. Por otro lado, también hubo años con áreas relativamente más bajas, para el año 2001 se registraron 16946 ha, con baja actividad obteniendo un porcentaje de 32.4% del total del área de estudio.

### 3.2.3 Áreas de alta actividad fotosintética

Los resultados evidencian un comportamiento variable en el área de alta actividad fotosintética a lo largo de los años, entre 1986 y 1990, hubo un aumento significativo, con un incremento de 6397 ha a 23606 ha partiendo de 12.2% a 45.2%, desde 1990 hasta 1996, hubo una disminución drástica en el área, reduciéndose a aproximadamente su valor anterior, 6389 ha, entre 1996 y 2007 se observó un aumento constante hasta llegar a 11640 ha, equivalente a un aumento del 10.1%, a partir del 2007 hubo un decrecimiento continuo llegando a 1616 ha obteniendo un 3.1%.

### 3.2.4 Áreas de tierras abiertas sin o con poca vegetación

Los datos muestran fluctuaciones en el área de tierras abiertas sin o con poca vegetación a lo largo de los años, en términos generales, se observa un patrón de aumento y disminución a lo largo del período, con variaciones significativas. Entre 1986 y 1990 hubo una disminución drástica en el área de tierras abiertas sin o con poca vegetación, pasando de 22680 ha a 1105 ha, lo que representa una disminución de aproximadamente el 41%, desde 1990 hasta 2001, se observa un aumento constante en el área de tierras abiertas, llegando a un pico de 17201 ha, posteriormente, hay una disminución en 2007 a 2435 ha, seguida de una ligera disminución adicional en 2013 a 2025 ha, a partir de 2013, nuevamente hay un aumento en el área de tierras abiertas, alcanzando un valor significativamente mayor en 2023, con 14176 ha, equivalentes al 27,18%.

## 3.3 Comparación de resultados con estudios previos.

En la tabla 6 se mencionan los estudios previos tenidos en cuenta, y para los cuales se realiza una comparación de los resultados obtenidos por sus autores vs el estudio actual, teniendo en cuenta la correlación entre capas evaluadas.

**Tabla 6. Relación de estudios previos y actual.**

Número de estudio	Nombre	Autor (es)	Temporalidad	Área de estudio (ha)
1	Análisis de la pérdida de cobertura vegetal y los impactos ambientales hacia las comunidades utilizando imágenes satelitales, minería de	(Chamorro Hernandez, Mesias Jojoa, & Pinto Castelblanco, 2015)	1986 - 2007	6948,98

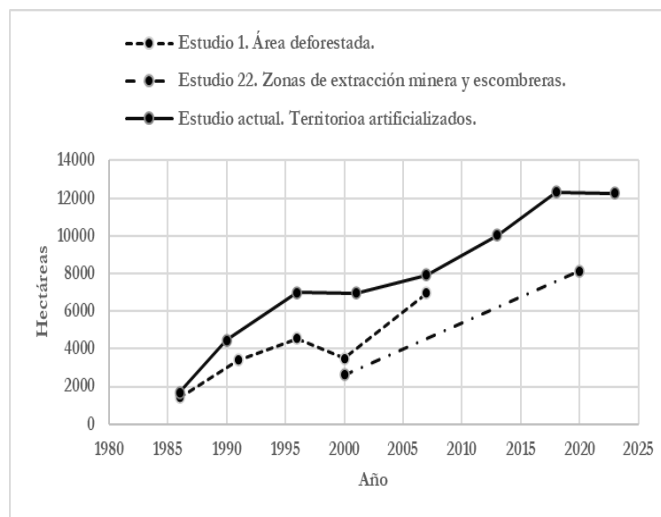
	carbón en Cerrejón y La Loma.			
2	Análisis multitemporal del impacto de la explotación a cielo abierto en la mina “El Cerrejón” de los años 2000 y 2020.	(Benavides Bonilla, 2022)	2000 - 2020	45151,94
Estudio actual	Análisis multitemporal de cambio de cobertura vegetal por explotación de carbón a cielo abierto en la mina El Cerrejón en el departamento de La Guajira, Colombia.	(Arango Cifuentes, 2023)	1986 - 2023	52160,91

Es importante mencionar que los estudios previos, aunque enfocan su investigación en el área de extracción minera El Cerrejón, no poseen la misma área de estudio, ni el mismo alcance, además que su metodología de realización y software aplicado son diferentes. La diferencia de área entre el estudio actual y el estudio uno es de 45211 ha, y para el estudio dos es de 7008 ha, lo que indica que el área del estudio uno y el estudio dos corresponden al 13,3% y al 86,5% del 100% del área del estudio actual.

Esta comparación puede tener algunas brechas informativas por lo anteriormente expuesto, y teniendo en cuenta el régimen climático en el que se generaron las imágenes satelitales, ya que este afecta directamente sobre el comportamiento de las coberturas vegetales, para el estudio número uno no aplica, ya que el autor solo evalúa la expansión del área minera, y el estudio numero dos solo muestra el año de generación de sus imágenes satelitales, quedando el vacío informativo de régimen climático respectivo.

### 3.3.1 Comparación, área deforestada, zona de extracción minera y escombreras, y territorios artificializados.

Figura 3. Gráfico comparativo, área deforestada, zona de extracción minera y escombreras, y territorios artificializados.



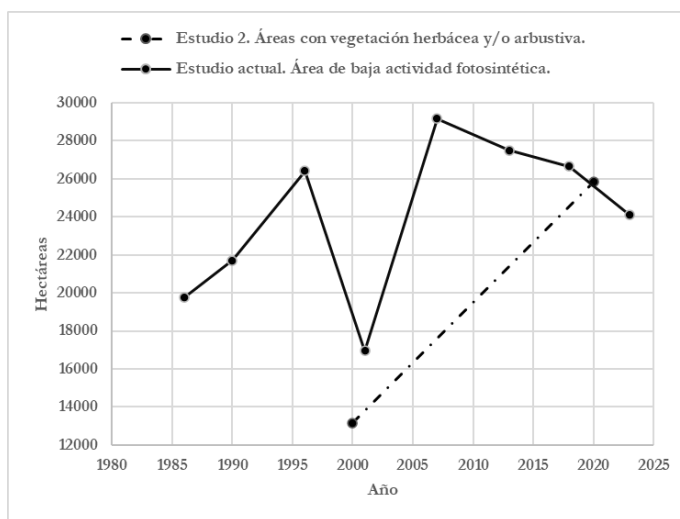
En el estudio número uno se observa un aumento en el área deforestada desde 1986 hasta 1996, alcanzando un pico de 4555 ha en ese año, luego hubo una disminución en la deforestación hasta el año 2000, seguida un aumento importante en deforestación hasta el año 2007 en el que el estudio registró 6948 ha. El estudio numero dos muestras un crecimiento considerable pasando de 2619 ha en el año 2000 a 8127 ha en el año 2020. El estudio actual denota una tendencia creciente en la multitemporal dad, pasando de 1681 ha en al año 1986 a 12272 ha en el año 2023.

El alcance del estudio número uno permite tomar datos del área deforestada por la extracción minera desde 1996 a 2007 y el estudio número dos basas su análisis multitemporal en información recolectada para dos años, 2000 y 2020 respectivamente, por este motivo no se permite la obtención de curvas gráficas sino una línea de tendencia.

En general, las tendencias son crecientes para esta comparación y similares entre los estudios, se puede evidenciar para el estudio uno y el actual un decrecimiento pasado el año 1996, estos decrecimientos pueden ser dados ya que según (Cerrejón, 2023), desde que iniciaron sus operaciones extractivas han transformado más de 4800 ha que pasaron de ser áreas mineras a cielo abierto a áreas boscosas.

### 3.3.2 Comparación, áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva vs áreas de baja actividad fotosintética.

Figura 4. Gráfico comparativo, áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva vs áreas de baja actividad fotosintética.

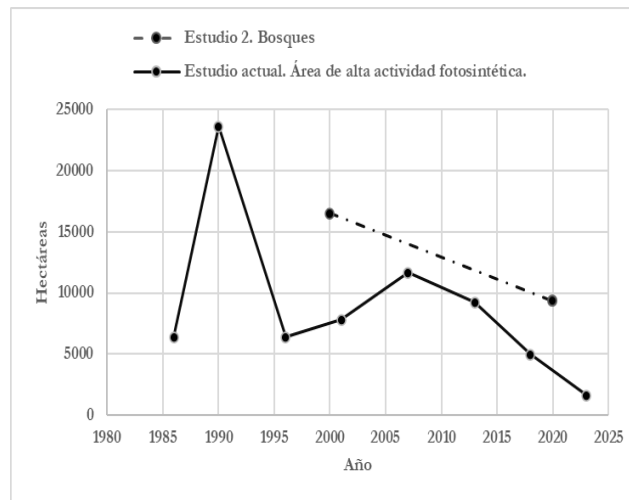


Para el caso comparativo de áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva vs áreas de baja actividad fotosintética, el estudio numero dos muestra una tendencia creciente, de igual manera para el estudio actual pero con un comportamiento variable, los datos arrojados para cada uno de los estudios denotan una similitud, teniendo en cuenta que el estudio dos registro para el año 2000 13161 ha y para el año 2020 25847, y en el estudio actual resultaron para el año 2001 16946 ha y para el año 2018 24096 ha.

Según, (Gualdrón Acosta, 2010), el área de concesión que pertenece al Cerrejón, tiene varias formaciones vegetales, entre las cuales relaciona, montes espinosos subtropicales, bosque secos subtropicales y bosques secos tropicales, el mismo autor aduce que la vegetación nativa ha sufrido intensamente por factores como la deforestación y la disminución y/o perdida de coberturas herbáceas protectores de suelos, que aparte de tener impactos ambientales por la actividad minera en sí misma, también se ve afectada por el sobrepastoreo de actividades ganaderas, resultando de los anteriormente dicho, un paisaje del área de concesión marcado por las actividades antrópicas en la que se encuentran fragmentos de vegetación nativa en diferentes grados de conservación.

### 3.3.3 Comparación, Bosques vs áreas de alta actividad fotosintética.

Figura 5. Gráfico comparativo, Bosques vs áreas de alta actividad fotosintética.

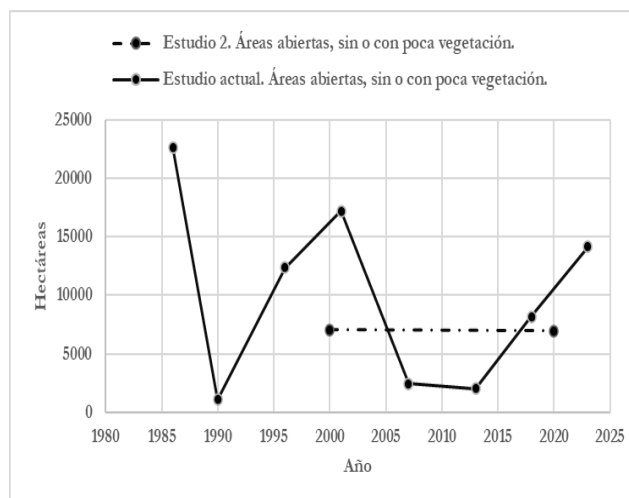


Los resultados representan una tendencia decreciente en la multitemporalidad, el estudio dos indica un área inicial para el año 2000 de 16519 ha y para el año 2020 9361 ha esto significa una perdida 7158 ha en áreas boscosas equivalente al 43%, el estudio actual muestra un comportamiento más variable, con un pico para el año 1990 registrando un área de alta actividad fotosintética de 23606 ha, y otro de menor registro en el año 2007 con un área de 11649, de ahí en adelante comienza una pedida constante hasta llegar a las 1616 ha.

En este caso se evidencia que, aunque el estudio actual tenga una mayor área de estudio, la capa representada como área de alta actividad fotosintética se encuentra por debajo de las áreas de bosques resultantes para el estudio número dos, de igual manera como en la comparación anterior (3.3.2), el estudio dos no define el régimen climático para la fecha de origen de sus imágenes satelitales.

### 3.3.4 Comparación entre estudios de Áreas abiertas sin o con poca vegetación

Figura 6. Gráfico comparativo, Áreas abiertas sin o con poca vegetación



El comportamiento de las áreas abiertas con o sin poca vegetación resulta constante para el estudio número dos, al mantenerse sobre las 7000 ha aproximadamente en la temporalidad, dato cuestionable teniendo en cuenta los resultados de las áreas herbáceas y arbustivas y bosques, expuestos anteriormente, según (Gualdrón Acosta, 2010), en el área minera predominan los suelos áridos, pero son menores en área en comparación con las zonas que se encuentran más al norte

del departamento. Las precipitaciones anuales están dentro de un rango de 300 a 400 mm anuales marcados en dos picos en el año y la vegetación típica pertenece a bosques secos subtropicales dispersos, con matorrales espinosos.

Es estudio actual muestra un comportamiento altamente dinámico para esta capa, que puede ser dado, en su mayoría, por factores climáticos, y las intervenciones de la mina tanto extractivas, como para las campañas de rehabilitación de áreas.

Para el año 1991 la Sección de Rehabilitación de Tierras del Cerrejón creó un experimento en áreas a rehabilitar, el cual trataba de introducir diferentes especies vegetales donadas y recomendadas por el Centro Internacional de Agricultura Tropical, ya que según la organización estas especies tenían un buen desempeño frente a las condiciones de sequía. El experimento se montó en plena temporada de lluvias finalizando el mes de octubre, teniendo inicialmente buenos resultados. Posteriormente el régimen climático cambió iniciando una temporada seca, entre el periodo de noviembre a mayo del siguiente año. Para inicios del año la mayoría de las especies gramíneas sobrevivía y algunas pocas leguminosas, sin embargo, al iniciar la siguiente temporada de lluvias se generó un hongo que afectó el sistema radicular de las plantas, causando una gran mortalidad, sobreviviendo únicamente un pasto llamado Buffel. (Gualdrón Acosta, 2010).

Según lo anterior el área de estudio ha sido susceptible a cambios de coberturas por las campañas infructuosas de rehabilitación y reforestación.

### **3.4 Impactos ambientales relacionados**

Son demostrables los efectos negativos sobre el ambiente y la sociedad que genera la actividad minera, la variación en la cuenca del río Ranchería es una de estas, ya que las dinámicas ecosistémicas normales al ser alteradas impactan directamente sobre la posibilidad de subsistencia de la flora y fauna, limitando de igual manera la calidad y cantidad de agua para suministro humano e irrigación de cultivos, igualmente la pérdida antrópica del suelo para la actividad extractiva que aunque es dispuesto en escombreras pierde su potencialidad natural. La emisión de material particulado constituye un impacto importante y significativo ya que deteriora la calidad del aire y genera un ambiente de contaminación que repercute en los organismos vivos y salud humana. Todo lo anterior acompañado del cambio en el comportamiento normal de los acuíferos subterráneos por construcciones de fosas. La contaminación sonora generada por explosiones y las operaciones mineras también es un factor importante. Todos estos impactos han causado que las comunidades indígenas y afrodescendientes aledañas se vean obligadas a desplazarse de sus territorios ancestrales impactando social y culturalmente sus costumbres e impidiendo el desarrollo de estas. (Hernández Ureche, Santiago Mercado, & Torres Díaz, 2022).

Cerca de 7800 hectáreas han sido intervenidas cambiando su uso del suelo y el paisaje natural desde que inicio la actividad extractiva. Las operaciones en sí han promovido la pérdida de coberturas vegetales y con esto, el cambio en la dinámica del comportamiento de especies animales, se ha perdido la regulación natural de los caudales debido a la existencia de redes de drenaje que prematuran la llegada de aguas a puntos de vertido. Habitantes de la región aducen que la fauna a sufrido un impacto importante, teniendo en cuenta que algunas especies tuvieron que ser relocalizadas como es el caso de los monos aulladores cambiando su hábitat natural, y en otros casos las especies sufrieron un desplazamiento que posiblemente contribuyó para la disminución de sus poblaciones en la región, como es el caso de osos hormigueros, conejos y aves. (Ulloa, Escobar, Donato, & Escobar, 2008).

Las condiciones meteorológicas y el clima desértico favorecen la emisión y acumulación de material particulado en la zona, constituyendo uno de los mayores impactos, ya que la baja pluviosidad y los mecanismos de retención de humedad en los suelos son muy limitados, las partículas generadas difícilmente salen de la atmósfera y comienzan a hacer parte de las dinámicas químicas de esta, haciendo parte del proceso de formación de nubes y balances radioactivos. (Doria Argumedo & Fagundo Castillo, 2016).

El territorio Guajiro mantiene altos índices de escasez de agua, poblaciones y comunidades que habitan fuera de los cascos urbanos se ven obligadas a ejercer prácticas de recolección de aguas lluvia. El agua recolectada es usada para preparar alimentos, beber, usos domésticos y agropecuarios. (Doria Argumedo, 2017).

La comunidad del resguardo indígena Wayúu Provincial, ubicada en el municipio de Barrancas logro demostrar bajo estudios científicos la afectación directa a la salud humana, comprobando la contaminación del aire con Zinc, Azufre, Cromo y Cobre, y comprobando además en la sangre de habitantes la presencia de Níquel, Cromo, Bromo y Manganeseo.

El tema trascendió hasta la Corte Constitucional teniendo en cuenta que la empresa carbonífera adujo el cumplimiento a cabalidad de los límites permisibles de emisión de contaminantes, a lo cual la Corte se pronunció defendiendo los derechos a gozar de buena salud de las comunidades, exigiendo tanto a la empresa como a todos los organismos de control ambiental involucrados, el monitoreo puntual de emisiones y vertimientos del resguardo, considerando que los límites permisibles no son suficientes para proteger los recursos naturales y a la comunidad, sin embargo la empresa minera conserva su licencia ambiental, dejando puntos cuestionables sobre los límites máximos permisibles y el papel de los organismos de control ambiental. (Henao Mera, 2020)

#### 4 CONCLUSIONES

Con el presente estudio, se ha logrado determinar de manera más precisa la dinámica ambiental en El Cerrejón y sus áreas de influencia, que han sido altamente afectadas por la actividad minera. La integración de tecnologías de geoprociamiento de imágenes satelitales y el software SIG QGIS ha demostrado ser una herramienta de gran utilidad para monitorear y cuantificar los cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo. Los resultados del análisis cuantitativo revelan un patrón de deforestación y degradación de los ecosistemas en las zonas cercanas a la mina. El cambio en la cobertura vegetal en estas áreas ha sido considerable y está directamente relacionado con la expansión de las operaciones mineras.

El comportamiento de los suelos y coberturas vegetales tienen diversos factores que afectan directa o indirectamente sobre su desempeño, que serán evidenciados en los resultados de cualquier investigación que se realice sobre ellos, para el caso puntual de este estudio y los relacionados, estos factores están asociados en primer lugar, a la actividad de explotación minera a cielo abierto y las actividades antrópicas de las comunidades asentadas o con influencia sobre el área de estudio, en segundo lugar, los regímenes climáticos y ambientales a los que están sometidas estas áreas, teniendo en cuenta que la vegetación tiene un mejor desarrollo en épocas de lluvia y caso contrario en temporadas secas, y en tercer lugar, las campañas de rehabilitación y reforestación de áreas que realiza “El Cerrejón” en sus programas de responsabilidad social y ambiental, ya que es fácil encontrar cifras de territorios y áreas rehabilitadas pero no de igual manera encontrar cifras de los porcentajes de ineficiencias y aspectos negativos que han tenido estas campañas a largo plazo. Bajo este orden de ideas es de gran importancia seguir trabajando en la unificación de los criterios de los factores anteriormente expuestos, buscando el cierre progresivo de brechas y vacíos informativos y de esta manera obtener paulatinamente datos más precisos y acertados que permitan la toma de decisiones en pro de la conservación de la cobertura vegetal y el mejoramiento ecológico y ambiental del área de estudio.

La actividad de minería de carbón a cielo abierto en el departamento de La Guajira genera impactos importantes y considerables en las dinámicas ecosistémicas con repercusiones ambientales, sociales y económicas que conllevan al establecimiento de inquietudes sobre los perjuicios vs los beneficios que mantienen las comunidades asentadas en estos territorios, y el papel que juega la empresa El Cerrejón, las entidades territoriales y organismos de control ambiental.

#### REFERENCIAS

- Alonso Ramos, D. (2023). Combinación de bandas en imágenes de satélite Landsat y Sentinel. Valladolid, España. Obtenido de [mappinggis.com/2019/05/combinaciones-de-bandas-en-imagenes-de-satelite-landsat-y-sentinel/](https://mappinggis.com/2019/05/combinaciones-de-bandas-en-imagenes-de-satelite-landsat-y-sentinel/)
- Benavides Bonilla, M. (Junio de 2022). Análisis multitemporal del impacto de la explotación a cielo abierto en la mina “El Cerrejón” de los años 2000 y 2020. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.

- Castro, A., Ronderos, C., & Bernal, F. (2015). *Minería en Colombia: Víctimas, Causas y Consecuencias del Desplazamiento*. Colombia.
- Cerrejón. (2023). Cerrejón, la sexta empresa que más árboles ha sembrado en Colombia. Obtenido de <https://www.cerrejon.com/medios/noticias/cerrejon-la-sexta-empresa-que-mas-arboles-ha-sembrado-en-colombia>
- Cerrejón. (2023). Nuestras cifras. Obtenido de <https://www.cerrejon.com/nosotros/nuestras-cifras>
- Cerrejón. (2023). Rehabilitación. Obtenido de <https://www.cerrejon.com/sostenibilidad/medio-ambiente/rehabilitacion>
- Chamorro Hernandez, M. C., Mesias Jojoa, L. C., & Pinto Castelblanco, J. F. (Enero de 2015). Análisis de la pérdida de cobertura vegetal y los impactos ambientales hacia las comunidades utilizando imágenes satelitales, minería de carbón en Cerrejón y La Loma. Palmira, Valle del Cauca, Colombia.
- Copernicus Open Access Hub. (2023). Obtenido de <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- Corporación Autónoma Regional de La Guajira. (30 de Agosto de 2006). *Plan de Gestión Ambiental Regional*.
- Doria Argumedo, C. (2017). Metales pesados (Cd, Cu, V, Pb) en agua lluvia de la zona de mayor influencia de la mina de carbón en La Guajira, Colombi. Bogotá: Revista Colombiana de Química.
- Doria Argumedo, C., & Fagundo Castillo, J. (2016). Caracterización química de material particulado PM10 en la atmósfera de La Guajira, Colombia. Bogotá: Revista Colombiana de química.
- Google Earth Pro. (2023). Polígono área de estudio mina el Cerrejón.
- Gualdrón Acosta, R. (2010). *Cerrejón Hacia la rehabilitación de las tierras intervenidas por laminería a cielo abierto*. Colombia: Panamericana Formas e Impresos SA.
- Heno Mera, A. (3 de 11 de 2020). Las licencias ambientales más allá de los parámetros permisibles. Colombia: Catorce6. Recuperado el 11 de 9 de 2023, de <https://www.catorce6.com/opinion/columnistas-invitados/18955-las-licencias-ambientales-mas-alla-de-los-parametros-permisibles>
- Hernández Ureche, J. C., Santiago Mercado, L. D., & Torres Díaz, G. A. (2022). Extracción de carbón y obras de ingeniería conexas en la guajira colombiana: impacto socioambiental en un territorio frágil. *Revista Notas Históricas y Geográficas*.
- QGIS. (2020). QGIS Geographic Information System 3.16. Obtenido de <https://qgis.org>
- QGIS with GRASS. (2020). Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) 7.8.5. Obtenido de <https://grass.osgeo.org>
- Servicio Geológico Colombiano. (2023). Zonas Carboníferas de Colombia. Obtenido de [https://datos.sgc.gov.co/datasets/68d1a27c05984be5b0ca1eaf524a1006\\_0/about](https://datos.sgc.gov.co/datasets/68d1a27c05984be5b0ca1eaf524a1006_0/about)
- Ulloa, A., Escobar, E., Donato, L., & Escobar, P. (2008). *Mujeres indígenas y cambio climático. Perspectivas latinoamericanas*. Bogotá.
- USGS EarthExplorer. (2023). Obtenido de <https://earthexplorer.usgs.gov/>