

**Análisis multitemporal de imágenes satelitales,  
para la identificación de los cambios de  
temperatura superficial terrestre (LST) en el  
área del proyecto mina El Cerrejón**

**Dussán Montealegre Jesús Andrés, Escobar Rubio Jessica Andrea,  
Novoa Arias Erika Marcela, Porras Plata Nicolas José, Sánchez  
Chacón Wilson**

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

Director (a):

Ph. D. M. Sc (Eng) Electronic Engineer Vladimir Henao Céspedes

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2025

## Resumen

Este estudio tiene como objetivo evaluar las variaciones en la temperatura superficial terrestre mediante el uso de los satélites que capturan información en frecuencias del infrarrojo, permitiendo medir la temperatura a través de la radiación térmica; la intensidad y longitud de onda emitidas están directamente relacionadas con la temperatura de la superficie de los objetos. Satélites como Landsat, Terra y Aqua, mediante sus sensores, capturan esta radiación térmica en su banda de infrarrojo, y con cálculos específicos sobre las imágenes se puede obtener la Temperatura Superficial Terrestre (LST, por sus siglas en inglés).

Se busca comprender las causas de las variaciones térmicas en el contexto de las operaciones mineras y el índice de vegetación, mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales, y se examinará cómo la operación y expansión de la mina han impactado las condiciones térmicas del entorno, evaluando la magnitud y extensión de este efecto a lo largo del tiempo. Este enfoque permite identificar la relación entre las actividades mineras y los cambios observados en la temperatura superficial.

La metodología incluye la recopilación y procesamiento de imágenes satelitales, así como el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para realizar un análisis comparativo entre diferentes períodos. Se espera que los resultados proporcionen información valiosa sobre cómo las actividades mineras afectan la LST, contribuyendo a una mejor comprensión del impacto ambiental del proyecto mina El Cerrejón.

**Palabras clave:** LST, Infrarrojo, Landsat, El Cerrejón, Minería, Temperatura, NDVI.

## Abstract

This study aims to evaluate variations in land surface temperature (LST) by using satellites that capture information in infrared frequencies, allowing temperature measurement through thermal radiation. The intensity and wavelength emitted are directly related to the surface temperature of objects. Satellites such as Landsat, Terra, and Aqua capture this thermal radiation in their infrared bands through their sensors, and specific calculations applied to the images enable the retrieval of LST.

The objective is to understand the causes of thermal variations in the context of mining operations and vegetation index through multitemporal analysis of satellite images and to examine how the operation and expansion of the mine have impacted the thermal conditions of the surrounding environment, assessing the magnitude and extent of this effect over time. This approach helps to identify the relationship between mining activities and the observed changes in surface temperature.

The methodology includes the collection and processing of satellite images, as well as the use of Geographic Information System (GIS) tools to perform a comparative analysis across different periods. It is expected that the results will provide valuable insights into how mining activities affect LST, contributing to a better understanding of the environmental impact of the El Cerrejón mining project.

**Keywords: LST, Infrared, Landsat, El Cerrejón, Mining, Temperature, NDVI**

# Contenido

	<b>Pág.</b>
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>13</b>
1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA .....	13
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	15
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	16
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>3. ANTECEDENTES .....</b>	<b>19</b>
3.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES .....	19
3.2 ANTECEDENTES NACIONALES .....	21
<b>4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL .....</b>	<b>25</b>
4.1 NORMATIVA INTERNACIONAL .....	25
4.1.1 <i>Convenio sobre la Diversidad Biológica (1992)</i> .....	25
4.1.2 <i>Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP)</i> .....	26
4.1.3 <i>Acuerdo de París (2015)</i> .....	26
4.1.4 <i>Normas ISO 14001: Gestión Ambiental</i> .....	26
4.1.5 <i>Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible</i> .....	27
4.2 NORMATIVA NACIONAL (COLOMBIA) .....	28
4.2.1 <i>Ley 99 de 1993 - Ley General Ambiental</i> .....	28
4.2.2 <i>Ley 685 de 2001 - Código de Minas</i> .....	28
4.2.3 <i>Resolución 1115 de 2012 - Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA)</i> .....	29
4.2.4 <i>Decreto 1076 del 2015</i> .....	29
4.2.5 <i>Licencia Ambiental</i> .....	30
4.2.6 <i>Plan de Manejo Ambiental (PMA)</i> .....	30
4.2.7 <i>Resolución 0018 de 2020 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible</i> .....	31
4.2.8 <i>Ley 2099 de 2021 - Ley de transición energética</i> .....	31
<b>5. REFERENTE TEÓRICO .....</b>	<b>32</b>
5.1 LA TEMPERATURA SUPERFICIAL TERRESTRE (LST) .....	32
5.2 IMPACTO DE LA MINERÍA SOBRE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL Y EL MEDIO AMBIENTE .....	32
5.3 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y ANÁLISIS MULTITEMPORAL .....	33
5.4 IMÁGENES SATELITALES TIPO LANDSAT .....	34
5.5 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES TIPO LANDSAT .....	34
5.6 USO DE SUELO .....	35
5.7 ÍNDICES ESPECTRALES DE VEGETACIÓN Y SUELOS .....	36
<b>6. METODOLOGÍA .....</b>	<b>38</b>

6.1	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN .....	40
6.1.1	<i>Delimitación del área de estudio y zonas de actividad minera</i> .....	41
6.2	CREACIÓN DE GDB .....	42
6.2.1	<i>Preparación de datos geospaciales</i> .....	42
6.2.2	<i>Integración de información a la GDB</i> .....	42
6.3	PROCESAMIENTO DE IMÁGENES .....	43
6.3.1	<i>Preprocesamiento de los datos</i> .....	45
6.3.2	<i>Conversión de niveles digitales (DN) a radiancia espectral</i> .....	46
6.3.3	<i>Conversión de radiancia a temperatura de brillo (BT)</i> .....	47
6.3.4	<i>Cálculo del NDVI</i> .....	48
6.3.5	<i>Cálculo de la Proporción de Vegetación (Pv)</i> .....	48
6.3.6	<i>Calcular la emisividad (<math>\epsilon</math>)</i> .....	49
6.3.7	<i>Cálculo de la Temperatura Superficial Terrestre (LST)</i> .....	50
6.3.8	<i>Generación de capas térmicas y cambios de coberturas a partir de NDVI</i> .....	50
6.3.9	<i>Herramientas para relación de variables</i> .....	53
6.3.10	<i>Relación entre la variación de temperatura superficial y variación en las coberturas del suelo. ...</i>	55
6.3.11	<i>Análisis de correlación</i> .....	56
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>57</b>
7.1	DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	57
7.2	VARIACIONES SIGNIFICATIVAS EN LST .....	58
7.3	IMPACTO SOBRE EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN (NDVI) .....	60
7.4	CORRELACIÓN ENTRE ACTIVIDADES MINERAS Y LST .....	63
7.4.1.	<i>Análisis comparativo de la relación entre LST y NDVI (1984, 2003 y 2024)</i> .....	63
7.5	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS BOX PLOTS DEL NDVI Y LST .....	68
7.6	CORRELACIÓN ENTRE LST Y NDVI .....	72
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>114</b>
<b>9.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>118</b>
<b>10.</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>120</b>

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> <i>Flujograma de la metodología generalizada realizada durante el desarrollo del proyecto de investigación.</i>	39
<b>Figura 2</b> <i>Diagrama de flujo para el cálculo del LST para Landsat 8. según la metodología de García, 2019.</i>	44
<b>Figura 3</b> <i>Diagrama de flujo para el cálculo del LST para Landsat 5 y 7. Tomada y modificada de Khan et al., 2022.</i>	45
<b>Figura 4</b> <i>Mapa de Ubicación General (Fuente: los Autores)</i>	57
<b>Figura 5</b> <i>Actividades mineras y el LST 1986.</i>	59
<b>Figura 6</b> <i>Actividades mineras y el LST 2003.</i>	59
<b>Figura 7</b> <i>Actividades mineras y el LST 2024.</i>	60
<b>Figura 8</b> <i>NDVI y el LST 1986.</i>	61
<b>Figura 9</b> <i>NDVI y el LST 2003.</i>	62
<b>Figura 10</b> <i>NDVI y el LST 2024. Fuente Los Autores</i>	62
<b>Figura 11</b> <i>Correlación entre el LST y el NDVI 1986.</i>	66
<b>Figura 12</b> <i>Correlación entre el LST y el NDVI 2003.</i>	67
<b>Figura 13</b> <i>Correlación entre el LST y el NDVI 2024. Fuente Los Autores.</i>	68
<b>Figura 14</b> <i>Análisis estadístico del NDVI.</i>	69
<b>Figura 15</b> <i>Análisis estadístico LST.</i>	71
<b>Figura 16</b> <i>Comparación NDVI 1986 - 2003 – 2024.</i>	79
<b>Figura 17</b> <i>Comparación LST 1986 - 2003 – 2024.</i>	81
<b>Figura 18</b> <i>Cambio NDVI 1986-2003.</i>	83
<b>Figura 19</b> <i>Cambio en las zonas mineras 1986-2003.</i>	84
<b>Figura 20</b> <i>Cambio NDVI 2003 – 2024.</i>	88
<b>Figura 21</b> <i>Cambio en las zonas mineras 2003 – 2024.</i>	89
<b>Figura 22</b> <i>Cambio NDVI 1986 – 2024.</i>	93
<b>Figura 23</b> <i>Cambio en las zonas mineras 1986 – 2024.</i>	94
<b>Figura 24</b> <i>Cambio LST 1986-2003.</i>	99
<b>Figura 25</b> <i>Cambio en las zonas mineras 1986-2003.</i>	100
<b>Figura 26</b> <i>Cambio LST 2003-2024.</i>	104
<b>Figura 27</b> <i>Cambio en las zonas mineras 2003-2024.</i>	105
<b>Figura 28</b> <i>Cambio LST 1986-2024.</i>	109
<b>Figura 29</b> <i>Cambio en las zonas mineras 1986 – 2024.</i>	110

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> <i>Descripción general de imágenes seleccionadas como insumo</i>	41
<b>Tabla 2</b> <i>Matriz de tabulación cruzada propuesta por Strzempko y Pontius, 2023.</i>	54
<b>Tabla 3</b> <i>Valores que entrega el coeficiente de correlación de Pearson</i>	64
<b>Tabla 4</b> <i>Correlación de Pearson para los años 1986, 2003, 2024</i>	65
<b>Tabla 5</b> <i>NDVI VS LST comparación entre los años 1986 y 2003.</i>	73
<b>Tabla 6</b> <i>NDVI VS LST comparación entre los años 2003 y 2024.</i>	75
<b>Tabla 7</b> <i>NDVI VS LST comparación entre los años 1986 y 2024.</i>	77
<b>Tabla 8</b> <i>Áreas de comparación NDVI para los años 1986 - 2003 – 2024.</i>	79
<b>Tabla 9</b> <i>Áreas de clasificación de temperaturas para los años 1986, 2003, 2024, la clasificación de temperatura se realiza según Segura y Bejarano, 2019.</i>	82
<b>Tabla 10</b> <i>Cambio NDVI Área total 1986-2003.</i>	84
<b>Tabla 11</b> <i>Cambio NDVI Área de estudio 1986-2003.</i>	86
<b>Tabla 12</b> <i>Cambio NDVI Área de estudio 2003-2024.</i>	89
<b>Tabla 13</b> <i>Cambio NDVI Área minas 2003-2024.</i>	91
<b>Tabla 14</b> <i>Cambio NDVI Área de estudio 1986-2024.</i>	94
<b>Tabla 15</b> <i>Cambio NDVI Total 1986-2024.</i>	96
<b>Tabla 16</b> <i>Cambio LST Área de estudio 1986-2003.</i>	100
<b>Tabla 17</b> <i>Cambio LST Total 1986-2003.</i>	101
<b>Tabla 18</b> <i>Cambio LST Área de estudio 2003-2024.</i>	105
<b>Tabla 19</b> <i>Cambio LST Total 2003-2024.</i>	106
<b>Tabla 20</b> <i>Cambio LST Área de estudio 1986 – 2024.</i>	110
<b>Tabla 21</b> <i>Cambio LST Total 1986 – 2024.</i>	112

## Lista de anexos

- 1 A. Anexo: LANDSAT 5, AÑO: 1986, contiene Mapa Color real
- 2 B. Anexo: LANDSAT 5, AÑO: 1986, contiene Mapa NDVI
- 3 C. Anexo: LANDSAT 5, AÑO: 1986, contiene Mapa LST
- 4 D. Anexo: LANDSAT 7, AÑO: 2003, contiene Mapa Color real
- 5 E. Anexo: LANDSAT 7, AÑO: 2003, contiene Mapa NDVI
- 6 F. Anexo: LANDSAT 7, AÑO: 2003, contiene Mapa LST
- 7 G. Anexo: LANDSAT 8, AÑO: 2024, contiene Mapa Color real
- 8 H. Anexo: LANDSAT 8, AÑO: 2024, contiene Mapa NDVI
- 9 I. Anexo: LANDSAT 5, AÑO: 2024, contiene Mapa LST
10. J. Anexo: Cambios LST, AÑO: 1986-2003. Área Total.
11. K. Anexo: Cambios LST, AÑO: 1986-2003. Zonas Mineras, Parte 1.
12. L. Anexo: Cambios LST, AÑO: 1986-2003. Zonas Mineras, Parte 2.
13. M. Anexo: Cambios LST, AÑO: 1986-2003. Zonas Mineras, Parte 3.
14. N. Anexo: Cambios NDVI, AÑO: 1986-2003. Área Total.
15. Ñ. Anexo: Cambios NDVI, AÑO: 1986-2003. Zonas Mineras, Parte 1.
16. O. Anexo: Cambios NDVI, AÑO: 1986-2003. Zonas Mineras, Parte 2.
17. P. Anexo: Cambios NDVI, AÑO: 1986-2003. Zonas Mineras, Parte 3.
18. Q. Anexo: Cambios LST, AÑO: 2003-2024. Área Total.
19. R. Anexo: Cambios LST, AÑO: 2003-2024. Zonas Mineras, Parte 1.
20. S. Anexo: Cambios LST, AÑO: 2003-2024. Zonas Mineras, Parte 2.
21. T. Anexo: Cambios LST, AÑO: 2003-2024. Zonas Mineras, Parte 3.
22. U. Anexo: Cambios NDVI, AÑO: 2003-2024. Área Total.
23. V. Anexo: Cambios NDVI, AÑO: 2003-2024. Zonas Mineras, Parte 1.
24. W. Anexo: Cambios NDVI, AÑO: 2003-2024. Zonas Mineras, Parte 2.
25. X. Anexo: Cambios NDVI, AÑO: 2003-2024. Zonas Mineras, Parte 3.
26. Y. Anexo: Cambios LST, AÑO: 1986-2024. Área Total.
27. Z. Anexo: Cambios LST, AÑO: 1986-2024. Zonas Mineras, Parte 1.
28. AA. Anexo: Cambios LST, AÑO: 1986-2024. Zonas Mineras, Parte 2.

- 29 AB. Anexo: Cambios LST, AÑO: 1986-2024. Zonas Mineras, Parte 3.
- 30. AC. Anexo: Cambios NDVI, AÑO: 1986-2024. Área Total.
- 31. AD. Anexo: Cambios NDVI, AÑO: 1986-2024. Zonas Mineras, Parte 1.
- 32. AE. Anexo: Cambios NDVI, AÑO: 1986-2024. Zonas Mineras, Parte 2.
- 33. AF. Anexo: Cambios NDVI, AÑO: 1986-2024. Zonas Mineras, Parte 3.

## Lista de símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área	m <sup>2</sup>	Superficie de una zona específica en el área de estudio.
BT	Temperatura de Brillo	K	Temperatura medida en bandas térmicas, utilizada en la estimación de la LST.
C	Calor específico	J/(kg·K)	Cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en 1 K.
E	Emisividad	sin unidad	Capacidad de una superficie para emitir radiación térmica.
LST	Temperatura Superficial Terrestre	K	Temperatura de la superficie terrestre derivada de datos satelitales.
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	sin unidad	Índice para evaluar la cantidad de vegetación en el área.
p	Tamaño de píxel	m	Resolución espacial de la imagen satelital.
ρ	Reflectancia	sin unidad	Proporción de radiación reflejada por la superficie terrestre.
T	Temperatura	°C o K	Medida de la temperatura de una superficie o del aire en el contexto de análisis térmicos.
V	Volumen	m <sup>3</sup>	Cantidad de espacio tridimensional ocupado por una sustancia o región del área de estudio
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinación		Indica en qué medida la variable independiente explica la variación de la variable dependiente en la regresión. Es decir, en qué medida la línea de regresión se ajusta a los datos.
r	Coefficiente de Pearson	r	Relación estadística entre dos variables continuas.

## Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$\lambda$	Longitud de onda	$\mu\text{m}$	Distancia entre crestas de una onda, relevante en bandas infrarrojas para la estimación de LST.
$\varepsilon$	Emisividad	sin unidad	Capacidad de la superficie para emitir radiación térmica, crucial en el cálculo de LST.
$\alpha$	Absorción	sin unidad	Proporción de energía absorbida por una superficie en relación con la incidente.
$\Delta$	Diferencia o cambio	variable	Representa variaciones, como en la diferencia de temperatura o NDVI entre dos períodos.
$\theta$	Ángulo de incidencia	grados	Ángulo de incidencia de la radiación solar sobre la superficie terrestre.
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$	Constante utilizada en la ecuación para calcular radiación térmica emitida por un cuerpo.

## Subíndices

Subíndice	Término
atm	Atmósfera
avg	Valor promedio
max	Valor máximo
min	Valor mínimo

## Superíndices

Superíndice	Término
n	Exponente o potencia
T	Transpuesto (para matrices)
*** (asterisco)**	Valor estimado o ajustado

## Abreviaturas

Abreviatura	Término
BT	Temperatura de Brillo (Brightness Temperature)
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
Ha	Hectáreas
GDB	Geodatabase
LST	Temperatura Superficial Terrestre (Land Surface Temperature)
MME	Ministerio de Minas y Energía
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
NIR	Banda Infrarroja Cercana
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PMA	Plan de Manejo Ambiental
RMSE	Raíz del Error Cuadrático Medio
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SINA	Sistema Nacional Ambiental
TIRS	Sensor Infrarrojo Térmico
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos

# **1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación**

## **1.1 Descripción del área problemática**

La región de La Guajira se distingue por su clima árido y desértico, atribuible a su posición geográfica a nivel marino. De acuerdo con los registros obtenidos por el IDEAM, exhibe temperaturas anuales promedio que oscilan entre 26 y 27°C. Se observan temperaturas medias superiores a 28°C, así como temperaturas bajas que no exceden los 8°C. (Riveros Rueda & Ruiz Chica, 2020).

La mina El Cerrejón, se sitúa en el departamento de La Guajira, Colombia, es una de las mayores minas de carbón a cielo abierto del mundo, cubriendo una superficie cercana a las 69,000 hectáreas en las que se lleva a cabo la exploración y extracción del carbón. Esta mina está ubicada en la región caribe de Colombia, en una zona geográfica que exhibe variadas características climáticas y ambientales. (ANLA. 2023).

Existen dos metodologías para la explotación del carbón. La primera es la minería a cielo abierto, que es la más avanzada tecnológicamente y produce la mayor cantidad de mineral. La otra opción es la minería subterránea, la cual requiere menor tecnología para su implementación. La técnica de explotación a cielo abierto se basa principalmente en el

descapote de todas las capas superficiales del suelo para acceder al yacimiento de carbón y facilitar la extracción del mineral. (Ulloa et al., 2020).

El Proyecto minero El Cerrejón, se caracteriza por ejecutar sus actividades de extracción a cielo abierto, lo cual ha generado algunos impactos considerables en la cobertura terrestre debido a las actividades inherentes a esta industria, que incluyen la deforestación y la modificación del paisaje natural y la pérdida de cobertura vegetal. Dichas transformaciones pueden alterar el comportamiento micro climático local y contribuir a variaciones en la temperatura superficial.

La eliminación o reducción de la vegetación natural con el fin de desarrollar actividades de explotación del carbón reduce el porcentaje de radiación del área, lo que puede resultar en un aumento de la temperatura superficial. La vegetación actúa como un regulador térmico natural; su ausencia puede incrementar el calentamiento ya que entre otras cosas expone materiales que tienen diferentes propiedades térmicas, estos cambios pueden influir en cómo el calor se retiene o se disipa en el ambiente. (Villareal, 2022).

Las actividades mecanizadas que giran en torno a la explotación de carbón producen emisiones de gases debido a la combustión; sin embargo, estas emisiones son poco perceptibles para las comunidades cercanas debido al gran alcance del proyecto. Por otra parte, la combustión espontánea del carbón en las áreas de excavación libera gases como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono, que pueden ser detectados por el olfato los

cuales podría llegar a considerarse como olores ofensivos, este problema se agrava durante las temporadas de lluvia. La falta de medidas efectivas para su control ha incrementado las enfermedades respiratorias entre las poblaciones cercanas, afectando especialmente a niños y ancianos (Zapata. 2023).

## **1.2 Formulación del problema**

La explotación minera en la zona del proyecto mina El Cerrejón ha provocado alteraciones importantes en el paisaje y la vegetación, además de una variación en la cobertura de árboles entre 2001 y 2018, lo que permite reconocer zonas donde se llevan a cabo actividades de extracción y/o edificación de infraestructuras (Bernal. 2021), lo que puede influir en la variación de la temperatura superficial de la Tierra (LST). Sin embargo, existe una falta de investigaciones sistemáticas que analicen de manera cuantitativa y cualitativa el efecto de estas operaciones en las condiciones de temperatura del ambiente alrededor del área del proyecto El Cerrejón.

La obtención de carbón genera un impacto en el medio ambiente, dado que conlleva la modificación del suelo. Este procedimiento provoca una disminución en la calidad del agua y del aire, a causa de las partículas en suspensión y la modificación de los ecosistemas en las zonas donde se realiza la extracción. (Franco & Franco, 2018).

Este estudio plantea el siguiente problema central: ¿Cuál ha sido la variación de la temperatura superficial terrestre en el área del proyecto minero El Cerrejón y el área objeto de estudio a lo largo del tiempo?

### **1.3 Justificación**

La minería a cielo abierto, como es la que se desarrolla en la mina El Cerrejón, es de las que más extensión posee a nivel global, y por su naturaleza se generan impactos sobre la superficie terrestre de manera significativa, lo que se relaciona de manera directa con los cambios en la temperatura superficial terrestre. Estos cambios se relacionan con la cobertura vegetal, alteración de suelos, su topografía y creación de infraestructura vial, los cuales son los principales efectos que contribuyen al cambio de la temperatura superficial.

Aunque previamente se ha estudiado sobre los diferentes impactos del proyecto minero, pocos se han enfocado en el comportamiento de la temperatura superficial utilizando series temporales con productos satelitales. De este proyecto surge el aporte de una metodología estandarizada para el procesamiento de datos multitemporales, también la identificación de patrones espacio-temporales de la temperatura superficial en diferentes estados de la actividad minera.

El aporte de este proyecto resulta en herramientas valiosas que pueden ser útiles para empresas mineras, donde sirva para diseñar estrategias de responsabilidad social y ambiental,

---

como programación de cierre de minas, reforestación y disminuir las actividades que modifiquen grandes porciones de la superficie.

Este proyecto resalta la importancia del uso de técnicas avanzadas de teledetección como la aplicación de algoritmos a grupos de datos de diferentes características, además de fomentar el uso de software donde se procesen y analicen datos geoespaciales.

Con el desarrollo de este trabajo se demuestra el potencial de los SIG y la teledetección para generar información aplicada sobre la superficie, buscando aportar evidencias técnicas que promuevan un equilibrio entre el desarrollo minero y la modificación ordenada del uso del suelo.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Realizar un Análisis multitemporal de imágenes satelitales, para la identificación de los cambios de temperatura superficial terrestre (LST) en el área del proyecto mina El Cerrejón.

### **2.2 Objetivos específicos**

Caracterizar el área de estudio mediante cartografía, fotografías aéreas, imágenes satelitales y estudios existentes entre los años 1986 y 2024.

Estimar la variación de temperatura superficial terrestre LST y la variación del monitoreo de la dinámica de la cobertura vegetal (NDVI) entre los años 1986 y 2024.

Evaluar la relación entre la variación de temperatura superficial terrestre y la variación del NDVI entre los años 1986 y 2024.

## 3. Antecedentes

### 3.1 Antecedentes Internacionales

El estudio realizado por García-Santos, Cuxart, Martínez-Villagrasa, Jiménez, y Simón (2018) fue evaluar y comparar tres métodos para estimar la temperatura de la superficie terrestre (LST) a partir de datos del sensor Landsat 8-TIRS en un sitio con heterogeneidad en las Islas Baleares, España. Los autores analizan la efectividad de tres algoritmos para estimar LST: la ecuación de transferencia radiativa (RTE), el algoritmo de canal único (SCA) y el algoritmo de ventana dividida (SWA). Se analizaron 21 escenas adquiridas en condiciones de cielo despejado y se compararon las estimaciones de LST de Landsat con mediciones in situ. El SWA mostró la menor raíz del error cuadrático medio (RMSE) y fue el método preferido debido a su precisión (entre 1.6 y 2 K). Los algoritmos RTE y SCA también produjeron estimaciones útiles, aunque con un mayor margen de error.

El propósito del estudio Zhu, Chen, Zhen, and Niu (2020). [VHC1] fue evaluar el impacto ambiental de la minería a cielo abierto a través de la aplicación de un índice ecológico mejorado de teledetección (MW-RSEI) que se fundamenta en el uso de ventanas móviles. El estudio utilizó imágenes Landsat para aplicar el Índice de Estabilidad Ecológica de Mina a Gran Escala (MW-RSEI) con el fin de evaluar los cambios ecológicos en una región minera en Zhengzhou, China, durante el período comprendido entre 2009 y 2018. El índice de calidad ecológica experimentó una disminución, pasando de 0.668 a 0.611, como resultado de modificaciones en el uso del

suelo ocasionadas por actividades mineras y la expansión de áreas urbanas. El uso de MW-RSEI ha demostrado ser eficaz en la vigilancia del ecosistema, lo que sugiere que la implementación de prácticas adecuadas en las minas podría ayudar a reducir ciertos impactos negativos.

El estudio de Hinojosa, Maillard y Saucedo (2021) fue analizar la temperatura de la superficie terrestre (LST) en los diez municipios metropolitanos de Santa Cruz, Bolivia, durante el periodo comprendido entre 2010 y 2018. Para este estudio, se emplearon datos diurnos y nocturnos del producto MYD11A1 de MODIS. Se llevó a cabo un análisis de regresión utilizando la Temperatura Superficial Terrestre (LST) y los registros de temperatura de estaciones meteorológicas. Los resultados revelaron que las temperaturas son más bajas en zonas boscosas en comparación con áreas urbanas (-2.4°C) y agrícolas /ganaderas (-1.1°C). Además, se encontró una evaluación significativa entre la Temperatura Superficial Terrestre y la temperatura del aire.

Seguido a esto Chaddad, Mello, Tayebi, Safanelli, Campos, Amorim y otros (2022). Evaluaron los efectos de la deforestación inducida por la minería sobre la temperatura superficial y las reservas de carbono en la Amazonía utilizando imágenes satelitales. En la mina de cobre Salobo, la deforestación aumentó de 0.9 ha en 2005 a 2214 ha en 2020, elevando la temperatura de la superficie hasta en 10 °C y aumentando las emisiones de CO<sub>2</sub> de 0.005 a 1.82 Tg en este periodo. Se encontró una correlación positiva entre áreas deforestadas y el aumento térmico. La deforestación por minería genera importantes incrementos de temperatura y emisiones de carbono, lo que evidencia un impacto ambiental que podría influir en el clima local.

---

En su estudio, Taati, Sunardi, Syauqiah y Jauhari (2024) examinaron los efectos de la actividad minera del carbón en la temperatura superficial del suelo en zonas boscosas adyacentes a las minas. A través del uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la información de la Temperatura Superficial Terrestre (LST) obtenida de las imágenes del satélite Landsat-8, se pudo determinar que las áreas boscosas cercanas a las zonas mineras presentaron temperaturas oscilando entre 30,0 y 36,0 °C, en comparación con temperaturas de 27,5 a 31,0 °C en los bosques no impactados. Este estudio evidencia el impacto de las actividades mineras en el aumento de las temperaturas superficiales, lo cual puede provocar una disminución en la humedad del suelo y afectar negativamente la vegetación regional.

### **3.2 Antecedentes Nacionales**

En su investigación, Galvis y Prada (2017) se centraron en la estimación de la temperatura superficial de la tierra (LST) en la ciudad de Ibagué, ubicada en el departamento de Tolima. Para llevar a cabo este análisis, utilizaron imágenes satelitales provenientes del satélite Landsat 8. El propósito del estudio consistió en emplear un enfoque cuantitativo para estimar la Temperatura Superficial Terrestre (LST) en una región intertropical con escasa cobertura nubosa, a través del análisis de bandas espectrales y térmicas. En la metodología se llevó a cabo un proceso de calibración radiométrica y corrección atmosférica, seguido de la aplicación del modelo de Barsi para la determinación de la temperatura de brillo (BT) y la temperatura de la superficie terrestre (LST). Los resultados obtenidos evidenciaron una variabilidad térmica

significativa, con temperaturas más bajas observadas en regiones con vegetación y temperaturas más elevadas en áreas urbanas, lo que pone de manifiesto la influencia del tipo de cobertura en la Temperatura de Superficie Terrestre (LST).

La industria minera, especialmente el proyecto Mina El Cerrejón donde se explota carbón desde la década de los 80, ha suscitado crecientes preocupaciones debido a sus efectos ambientales y socioeconómicos en las comunidades locales. En el estudio Cerrejón, 2016 se revelan impactos significativos en diversos aspectos, como el paisaje, la seguridad, la identidad cultural y la fauna, además de afectaciones a los recursos de subsistencia y la salud de las poblaciones cercanas. Ante esta situación, se reconoce la urgencia de implementar medidas eficaces de control y seguimiento de estos impactos, donde aparece el análisis multitemporal para estudiar cambios en la cobertura y uso de suelo (Acero, 2022).

En un estudio realizado por Mejía Ladino y Venegas Zambrano (2020), se examina la variación multitemporal de la temperatura superficial en Zipaquirá, Colombia. El análisis comparó áreas degradadas por uso agropecuario con zonas de reserva forestal a lo largo de un período de 17 años, utilizando imágenes MODIS. Se ha descubierto que la disminución de la vegetación en zonas degradadas provoca un aumento en la temperatura de la superficie, lo cual afecta la regulación climática a local.

En un estudio llevado a cabo por Benavides Bonilla y León Reyes (2020) en la zona de El Cerrejón, se analizó la evolución temporal de la actividad minera y su impacto en la cobertura

---

del suelo en un área de 3 km de radio durante el período comprendido entre los años 2000 y 2020. A través del empleo de imágenes satelitales y Sistemas de Información Geográfica (SIG), se ha logrado identificar una reducción en la cobertura vegetal, particularmente en zonas boscosas, así como variaciones en cuerpos de agua artificial destinada a actividades mineras. Los resultados indican un incremento en zonas desprovistas de vegetación, lo cual sugiere la importancia de implementar medidas de compensación ambiental.

En el estudio realizado por Aldana Lizarazo y Gineth Karen (2022), se llevó a cabo un análisis multitemporal de la erosión generada por la actividad minera a cielo abierto en Soacha, Cundinamarca, abarcando los años 1991, 2015 y 2021. El propósito del estudio consistía en analizar la dinámica de erosión del suelo en la zona minera del sur. El estudio ha identificado zonas erosionadas que están asociadas con la actividad minera. Se destaca que dicha actividad ha generado consecuencias adversas en el entorno ambiental, tales como la reducción de la vegetación y alteraciones significativas en el paisaje. Se determinó que la actividad minera a cielo abierto en Soacha ha incrementado la erosión, generando impactos negativos en la vegetación y el suelo, lo cual ha resultado en consecuencias ambientales de importancia.

En el estudio realizado por Betancourt Herrera y Campos Carrasco (2022), se examina la variación de la temperatura de la superficie terrestre y la pérdida de cobertura vegetal en el área de influencia indirecta del Distrito Regional de Manejo Integrado en el Desierto de la Tatacoa durante el periodo comprendido entre 2000 y 2022. Mediante la realización de muestreos en el desierto y el análisis de imágenes Landsat, se ha observado una disminución en las áreas de

vegetación en ciertas categorías específicas, a la vez que se ha registrado un aumento en la extensión y temperatura de otras áreas.

Los antecedentes presentados contribuyen al análisis multitemporal de la temperatura superficial terrestre (LST) y su relación con actividades humanas, como la minería, al proporcionar diversas metodologías y enfoques. Las investigaciones presentan técnicas pertinentes, tales como la utilización de algoritmos estratégicos para la estimación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST), índices ecológicos y el análisis de transformaciones en la cobertura del suelo, las cuales son aplicables al entorno de la Mina El Cerrejón. De este modo, las investigaciones actúan como fundamento metodológico y de comparación para examinar los efectos ambientales y térmicos resultantes de la actividad minera.

## **4. Referente Normativo y Legal**

El análisis multitemporal de imágenes satelitales y su relación con los posibles impactos ambientales de las actividades mineras y en particular en lo que respecta a las variaciones de la LST en el área del proyecto mina El Cerrejón, se enmarca en un conjunto de normativas legales y ambientales que regulan la minería y la protección del medio ambiente. Específicamente en Colombia el ministerio de minas y energía (MME) expidió normas que regulan todas las actividades mineras como lo son Código de Minas (Decreto - Ley 2655 de 1988) que fue derogado por el artículo 361 de la Ley 685 de 2001 así mismo se regula lo relacionado a los títulos mineros de interés nacional (PIN).

### **4.1 Normativa Internacional**

#### **4.1.1 Convenio sobre la Diversidad Biológica (1992)**

Este tratado tiene como objetivo la conservación de la biodiversidad, la utilización sostenible de sus componentes y la distribución justa de los beneficios derivados de los recursos genéticos. Colombia, como país signatario, se compromete a proteger sus ecosistemas y especies nativas, entro en vigor el 29 de diciembre de 1993. (Naciones Unidas, 1992).

#### **4.1.2 Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP)**

Este convenio busca proteger la salud humana y el medio ambiente de contaminantes químicos persistentes, como los subproductos industriales, que también pueden ser liberados durante actividades mineras. Colombia es parte de este acuerdo, lo que la compromete a adoptar medidas para reducir estas emisiones, este decreto entró en vigor el 17 de mayo de 2004. Naciones Unidas. (2001).

#### **4.1.3 Acuerdo de París (2015)**

Colombia es parte del Acuerdo de París, un tratado internacional sobre el cambio climático que busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar los efectos del calentamiento global, donde se incluyen compromisos sobre la regulación de la industria extractiva, como la minería, fue adoptado el 12 de diciembre de 2015 y entro en vigor el 4 de noviembre de 2016. (Naciones Unidas, 2015).

#### **4.1.4 Normas ISO 14001: Gestión Ambiental**

La ISO 14001 establece criterios internacionales para un sistema de gestión ambiental efectivo. Muchas empresas mineras adoptan estas normas como parte de sus procesos para garantizar el cumplimiento de estándares internacionales de sostenibilidad. (ISO, 2015)

---

#### 4.1.5 Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible

En julio de 2016, el Centro de Inversión Sostenible de la Universidad de Columbia, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, la Red de Soluciones de Desarrollo Sostenible de la ONU y el Foro Económico Internacional publicaron la Cartografía de la Minería en relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Un Atlas, como respuesta a la adopción global en 2015 de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que la acompañan.

El Atlas sirve de introducción para que las partes interesadas en el sector minero reconozcan las grandes relaciones que existen entre el sector minero y los ODS, y busca instar a las empresas mineras a todas las escalas a incorporar más ODS al tiempo que valida los esfuerzos actuales y motiva el avance. Ilustra cómo la minería puede tener una influencia positiva en el logro de los ODS a través del impulso del desarrollo económico amplio y la provisión de minerales esenciales para las tecnologías, la infraestructura, la energía y la agricultura.

## **4.2 Normativa Nacional (Colombia)**

### **4.2.1 Ley 99 de 1993 - Ley General Ambiental**

La Ley 99 de 1993 establece la organización del Sistema Nacional Ambiental (SINA) en Colombia, cuyo objetivo es la protección del medio ambiente y la salud pública. Esta ley otorga el marco legal para el monitoreo, conservación y protección de los recursos naturales, y establece mecanismos para evaluar los impactos ambientales de las actividades humanas, incluidas las operaciones mineras. La ley enfatiza la importancia de la evaluación ambiental para determinar cómo actividades como la minería pueden afectar las condiciones ambientales, donde se pueden enmarcar las variaciones en la temperatura superficial. (Congreso de la República de Colombia, 1993). Ley 99 de 1993) (MADS, 2021).

### **4.2.2 Ley 685 de 2001 - Código de Minas**

El Código de Minas, en su artículo 2, establece los principios bajo los cuales se debe llevar a cabo la explotación minera en Colombia, destacando la obligación de las empresas mineras de minimizar los impactos ambientales. Esta ley regula las actividades de minería a cielo abierto y obliga a las empresas mineras a presentar un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) que contemple la identificación y mitigación de los impactos sobre el medio ambiente, donde se pueden enmarcar las variaciones de la temperatura superficial terrestre debido a la remoción de

---

suelos y vegetación. (Congreso de la República de Colombia., 2001). La norma subraya la importancia de monitorear y controlar los efectos ambientales de las operaciones mineras, lo cual puede incluir el uso de imágenes satelitales para el análisis de cambios de temperatura y otros factores ambientales.

#### **4.2.3 Resolución 1115 de 2012 - Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA)**

Esta resolución establece los requisitos para la obtención de licencias ambientales en proyectos de gran escala, como la minería. Es importante porque regula los impactos ambientales y exige la implementación de medidas para mitigar estos efectos. (ANLA, 2012).

#### **4.2.4 Decreto 1076 del 2015**

El decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible establece un conjunto de normas en Colombia para regular la gestión ambiental, enfocándose en el manejo de los recursos naturales renovables, la conservación del medio ambiente y la calidad ambiental. Unifica procedimientos de evaluación, prevención, control y seguimiento de los efectos ambientales causados por actividades humanas como la minería, la agricultura, la industria y la construcción. También regula la gestión de los residuos y el Sistema de Información Ambiental, promoviendo la creación de planes y programas para el manejo sostenible del entorno. Este

decreto busca garantizar la protección ambiental a largo plazo, promoviendo la participación ciudadana y la rendición de cuentas de las autoridades responsables. (MADS, 2015).

#### **4.2.5 Licencia Ambiental**

En el artículo 2.2.2.3.1.3 del decreto 1076 del 26 de mayo de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (). Se relaciona con las competencias para otorgar licencias ambientales a proyectos de exploración y uso de fuentes de energía alternativa virtualmente contaminantes.” esta licencia busca el cumplimiento de los requisitos, términos, condiciones y obligaciones, así como la prevención, mitigación, corrección, compensación y manejo de los efectos ambientales del proyecto, obra o actividad autorizada. (MADS, 2015).

#### **4.2.6 Plan de Manejo Ambiental (PMA)**

El decreto 1076 del 26 de mayo de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), en su artículo 2.2.2.3.1.1 define que El Plan de Manejo Ambiental (PMA) es “el conjunto detallado de medidas y actividades que, producto de una evaluación ambiental, están orientados a prevenir, mitigar, corregir o compensar los impactos y efectos ambientales debidamente identificados, que se causen por el desarrollo de un proyecto, obra o actividad”. Dicho plan debe incluir todos los planes de seguimiento, monitoreo, contingencia, y abandono según el tipo del proyecto, obra o actividad. Es un documento que establece las acciones que se

---

implementarán para prevenir, mitigar, corregir o compensar los impactos ambientales negativos. (MADS, 2015).

#### **4.2.7 Resolución 0018 de 2020 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible**

La resolución 0018 reglamenta las actividades de monitoreo y gestión de la temperatura superficial terrestre como uno de los indicadores ambientales para actividades industriales, como la minería, con miras a reducir el impacto ambiental. (MADS, 2020).

#### **4.2.8 Ley 2099 de 2021 - Ley de transición energética**

Regula la reconversión de proyectos de minería e hidrocarburos. El artículo 24 de la ley establece que el Ministerio de Minas y Energía debe promover la reconversión de estos proyectos para contribuir a la transición energética.

## **5. Referente Teórico**

Teniendo en cuenta el tema que se abordará en el documento se enfoca en tres aspectos principales: la temperatura superficial terrestre (LST), los efectos de la minería en el medio ambiente y el uso de imágenes satelitales para el análisis de estos fenómenos.

### **5.1 La Temperatura Superficial Terrestre (LST)**

La temperatura superficial se refiere específicamente a la temperatura radiante de la superficie terrestre. En este sentido, es importante destacar que todo objeto o cobertura presente en la superficie emite radiación electromagnética de manera proporcional a su temperatura. . (Medina Solarte, 2023) LST se calcula utilizando las bandas térmicas de satélites, como los Landsat 5, 7 y 8.

### **5.2 Impacto de la Minería sobre la Temperatura Superficial y el Medio Ambiente**

La minería a cielo abierto genera alteraciones significativas en la cobertura terrestre, entre los principales efectos se encuentran la deforestación, la alteración de cuencas hidrográficas, la contaminación del aire, el aumento de superficies desnudas y el cambio en la temperatura superficial terrestre (Goudie, 2018). Estas modificaciones pueden incrementar la temperatura superficial, ya que la vegetación actúa como reguladora de la temperatura mediante la

---

transpiración y la sombra. (Geoinnova, 2019). lo que indica que un índice de vegetación superior se vincula con temperaturas superficiales inferiores, y viceversa. Este patrón destaca el papel fundamental de la vegetación como un mecanismo natural de enfriamiento, a través de la disminución de la radiación solar incidente y el fomento de la evapotranspiración. (Medina Solarte, 2023).

### **5.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Análisis Multitemporal**

El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite realizar análisis espaciales precisos y gestionar grandes volúmenes de datos geoespaciales. Las imágenes satelitales proporcionan información que se utiliza en estudios de impacto ambiental y para evidenciar cambios en el paisaje y sus efectos en las poblaciones (Tatipamul, 2019); La integración de los SIG con imágenes satelitales facilita el monitoreo de los cambios en el paisaje y las variaciones en la LST. El análisis multitemporal implica la comparación de imágenes adquiridas en diferentes fechas para identificar cambios a lo largo del tiempo.

Plataformas como el visor del USGS, World View de la NASA y Google Earth permite acceder y analizar imágenes satelitales de forma gratuita y en tiempo real o histórico, permitiendo el monitoreo y análisis de los cambios en la temperatura superficial terrestre a lo largo del tiempo. Las imágenes de satélite de Landsat 5, 7 y 8 son valiosas debido a su larga

continuidad temporal y su capacidad de medir bandas térmicas para realizar análisis de la temperatura superficial debido a su resolución espacial.

## **5.4 Imágenes satelitales tipo LANDSAT**

La generación de datos de Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) ha sido posible gracias al desarrollo de diversas metodologías basadas en información obtenida desde plataformas orbitales. En este contexto, el satélite Landsat-8, lanzado en 2013 como parte de la octava misión del programa Landsat, incorpora dos bandas termales (TIRS 10 y 11) diseñadas para el procesamiento de datos de LST con una periodicidad de 16 días y resolución espacial de 30 metros. Sin embargo, durante su fase operativa inicial se identificaron imprecisiones radiométricas en estas bandas, superando el umbral máximo aceptable del 2%. Los análisis revelaron desviaciones absolutas de entre 4% y 5% para la banda 10, y de 8% a 9% para la banda 11, lo que evidenció limitaciones técnicas en la calibración de los sensores (García et al, 2021).

## **5.5 Procesamiento de imágenes satelitales tipo**

### **LANDSAT**

El procesamiento digital de imágenes satelitales constituye una etapa crítica en la teledetección moderna, orientada a optimizar la extracción de información mediante la corrección y realce de datos espectrales. Este enfoque se sustenta en técnicas de

---

preprocesamiento que combinan secuencias multibanda de un mismo sensor para mitigar distorsiones inherentes a la adquisición orbital. La corrección radiométrica, emplea modelos matemáticos para ajustar los valores digitales de los píxeles, compensando anomalías en la reflectancia causadas por dispersión atmosférica, variaciones en la iluminación solar o imperfecciones en los sensores. De manera paralela, la corrección geométrica aplica transformaciones basadas en coordenadas de referencia para alinear la imagen con sistemas de proyección espacial, eliminando sesgos por movimiento del satélite o curvatura terrestre (Jie et al, 2021).

## **5.6 Uso de Suelo**

El crecimiento demográfico y los modelos de desarrollo actual aceleran la degradación del suelo, especialmente en regiones tropicales vulnerables como la costa Caribe de Colombia, donde la desertificación, la pérdida de agua superficial y el aumento de la evapotranspiración amenazan la seguridad alimentaria y los medios de vida rurales. Esta crisis exige replantear el manejo del territorio mediante prácticas de conservación que integren una visión ecosistémica del suelo, reconciliando su función agrícola con la preservación de la biodiversidad y la salud edáfica. En zonas semiáridas, caracterizadas por baja materia orgánica y estrés hídrico, la adaptación de especies y el aumento de carbono orgánico en el suelo (Aguirre, 2022).

## 5.7 Índices Espectrales de Vegetación y Suelos

Los índices espectrales son combinaciones matemáticas de bandas espectrales que se utilizan para extraer información específica de los datos de teledetección. Estas herramientas son fundamentales para caracterizar la cobertura del suelo, estimar parámetros biofísicos y realizar monitoreos ambientales (Varade et al., 2018). Mediante la operación entre bandas, se buscan resaltar características particulares como la vegetación, el agua o los minerales, aprovechando las interacciones radiactivas de estas variables para diferenciarlas de otros elementos. La imagen resultante es cuantitativa y puede servir como entrada para modelos adicionales (Varade et al., 2018).

El índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI) es un indicador utilizado para generar imágenes que muestran el verdor o biomasa relativa, aprovechando el contraste entre dos bandas espectrales: la banda roja, que refleja la absorción de clorofila, y la banda infrarroja cercana (NIR), que refleja la alta reflectividad del material vegetal. Los valores de NDVI varían según la cantidad de vegetación presente: valores bajos o negativos indican áreas sin vegetación, como agua, nieve o nubes, mientras que valores moderados corresponden a matorrales y praderas, y valores altos indican vegetación densa, como en bosques (ESRI, 2024, p1).

La ecuación (1) del NDVI se calcula a partir de imágenes de satélite y de acuerdo con la siguiente fórmula (ESRI, 2024):

---

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Donde:

NIR es la luz reflejada en el espectro infrarrojo cercano

RED es la luz reflejada en el rango rojo del espectro

De acuerdo con la fórmula del NDVI, la densidad de la vegetación (NDVI) en un punto determinado de la imagen es igual a la diferencia de las intensidades de luz reflejada en el rango rojo e infrarrojo dividida por la suma de estas intensidades.

Este índice está definido por valores que van de -1.0 a 1.0, donde los valores negativos están formados principalmente por nubes, agua y nieve, y los valores negativos cercanos a cero están formados principalmente por rocas y suelo descubierto. Los valores muy pequeños (0,1 o menos) de la función NDVI corresponden a áreas sin rocas, arena o nieve.

## 6. Metodología

La recopilación y correlación de los datos numéricos y los cambios en la cobertura del suelo, así como la expansión de la temperatura superficial, son los que causarán a la investigación a seguir el enfoque cuantitativo. Por lo que participará de la recopilación de datos, procesamiento, análisis estadístico, preferentemente instrumental para el proyecto. Utilizándose además modelos matemáticos y herramientas digitales con los cuales se pueden relacionar la información del área minera de El Cerrejón y las anomalías térmicas por medio de sensores remotos obtenidas y procesadas. Dichos procesos sumados a la información espacial brindarán la suficiente información para respaldar o ir en contravía de estudios anteriores.

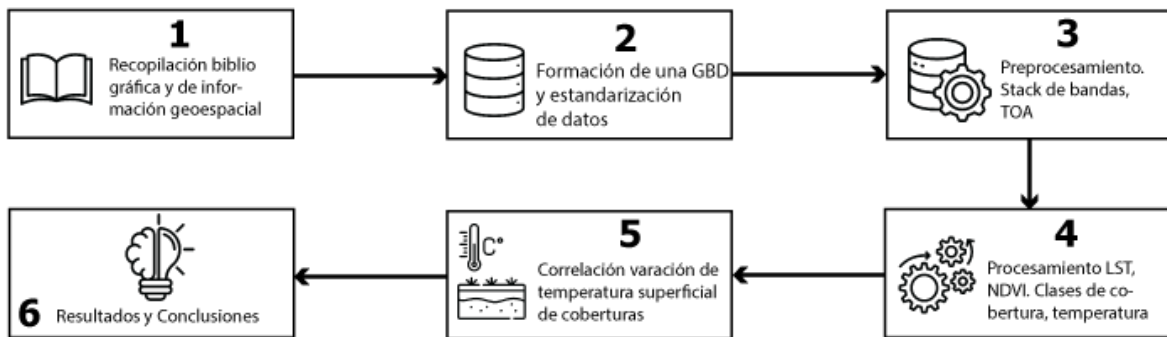
La información relevante capturada por los datos satelitales corresponde a las frecuencias del infrarrojo, y se produce un fenómeno relativo a cómo la temperatura produce radiación térmica de diferentes niveles de intensidad y longitud de onda mediante la cual la radiación emitida está directamente relacionada con la temperatura de la superficie de los objetos. En este sentido, los satélites Landsat, Terra y Aqua, a través de sus sensores, capturan dicha radiación térmica, y con cálculos específicos realizados sobre las imágenes, se puede tener la Temperatura Superficial Terrestre, entre los distintos datos disponibles como MODIS, el Sensor Infrarrojo Térmico (TIRS) de Landsat (L4, L5, L8, L9), VIIRS, ECOSTRESS, Sentinel 3 y ASTER (USGS, 2023).

Este enfoque de investigación implica un examen exhaustivo de la literatura existente, abordando el contexto de la mina El Cerrejón su región, tipo de mineral y estudios previos sobre

imágenes satelitales, formando la base de nuestra investigación actual y la primera etapa de la metodología. Posteriormente, se recopilan y conservan datos de geolocalización en una geodatabase, facilitando una ejecución sin problemas. Seguidamente se realiza una preparación previa de los registros para eliminar valores faltantes, datos nulos o erróneos, minimizar interferencias, modificar los conjuntos de datos satelitales cuando sea necesario. Durante la fase de preprocesamiento, se aplicaron metodologías de evaluación mediante estrategias y cálculos relacionados con la información térmica y óptica, generando insumos necesarios para la generación de los resultados de esta investigación, interpretando los valores de temperatura superficial, y NDVI. En la fase final, los valores obtenidos se someterán a un análisis estadístico y representación gráfica para esclarecer los resultados y responder a los objetivos de la investigación. En el diagrama que se muestra en la Figura 1, la metodología presentada sigue la descripción proporcionada anteriormente.

**Figura 1**

*Flujograma de la metodología generalizada realizada durante el desarrollo del proyecto de investigación.*



Fuente: Autores.

El proyecto consiste en reunir información de diferentes momentos sobre la temperatura en la superficie, la actividad minera y la cantidad de biomasa en la zona. Esto implica un estudio realizado en tres series temporales para detectar tendencias y su relación con los cambios de usos de suelo y coberturas según la actividad antrópica desarrollada en el área de estudio.

## **6.1 Recopilación de Información**

Se procederá a descargar las imágenes satelitales de Landsat 5, 7 y 8, utilizando sus respectivos filtros de búsqueda, iniciando con una cobertura de nubes reducida (0-15%), con el objetivo de investigar la reflectividad sobre la superficie. Otro tipo de información geoespacial vectorizada que funcione como recurso adicional para destacar la correlación con la actividad minera en la región de El Cerrejón durante el intervalo temporal de 1986 a 2024, obtenida a través de plataformas como EarthExplorer y otros portales geoespaciales de acceso público, que son ampliamente empleados en estudios de análisis temporal geoespacial (Wulder et al., 2019). La provisión de información relativa a la actividad minera, mediante la adquisición de datos históricos de la producción minera (volúmenes extraídos, áreas afectadas anualmente, entre otros), es fundamental para establecer una relación sólida (Schodde, 2017). Es imperativo recolectar datos mediante la revisión de literatura pertinente para establecer una correlación entre las variaciones en la temperatura superficial y las modificaciones en la cobertura vegetal.

Las imágenes obtenidas para el presente trabajo, para el desarrollo de la metodología aquí planteada ver Tabla 1, se descargaron de la página <https://earthexplorer.usgs.gov/>, se van a emplear un total de tres imágenes satelitales, una para cada año a analizar (1986, 2003 y 2024) cubriendo con estas la totalidad del área de estudio.

**Tabla 1**

*Descripción general de imágenes seleccionadas como insumo*

No	Fecha de Adquisición	satélite	Nombre imagen	Resolución espacial (B Multiespectrales)
1	04/11/1986	Landsat 5	LT05_L1TP_008052_19861104_20200917_02_T1	30 m
2	12/02/2003	Landsat 7	LE07_L1TP_008052_20030212_20200916_02_T1	30 m
3	13/01/2024	Landsat 8	LC08_L1TP_008052_20240113_20240123_02_T1	30 m

Fuente: Autores. Información obtenida de Earth Explorer USGS.

### **6.1.1 Delimitación del área de estudio y zonas de actividad minera**

Emplear herramientas de Sistemas de Información Geográfica para delimitar los límites de la zona de interés en el proyecto minero El Cerrejón, ajustando las imágenes a dicha área con el fin de minimizar posibles imprecisiones espaciales (Li et al., 2016). Es importante recopilar

mapas y registros históricos sobre el crecimiento de la minería en El Cerrejón, identificando las zonas que han sido explotadas en el lapso analizado.

## **6.2 Creación de GDB**

### **6.2.1 Preparación de datos geospaciales**

Es necesario cabo una homologación de la información determinada generando los grupos de datos que presenten unas características suficientes o bien digitalizar aquel tipo de información que no esté en soporte digital o en el tamaño de archivo adecuado para su inclusión. La generación de polígonos de mina, aplicación de herramientas de análisis espacial, como distancia euclidiana, fueron necesarios para la generación de la zona de estudio. De la misma forma procesar los productos satelitales, convertirlos a .tiff y después ejecutar de poligonizar ráster, componen un grupo de actividades SIG para que la información esté operable. Estas acciones se pueden resumir en organizar una geodatabase con datos interoperables que permiten abastecer la información para la siguiente fase de actuación (Bajjali y Bajjali, 2018).

### **6.2.2 Integración de información a la GDB**

La creación surge de la necesidad de almacenar de manera organizada los diferentes tipos de información que se deben utilizar repetidamente, para verificar información y procesar. El

---

diseño se constituyó agrupando los archivos con extensión shp en un grupo, el cual se constituyó por los polígonos de actividades mineras y el área de estudio, el otro grupo de datos se conformó por archivos de tipo TIFF, el cual se conformó por los productos satelitales, en sus diferentes fases temporales, según su origen y su procesamiento, como Landsat5\_NDVI\_1986 (Bajjali y Bajjali, 2018).

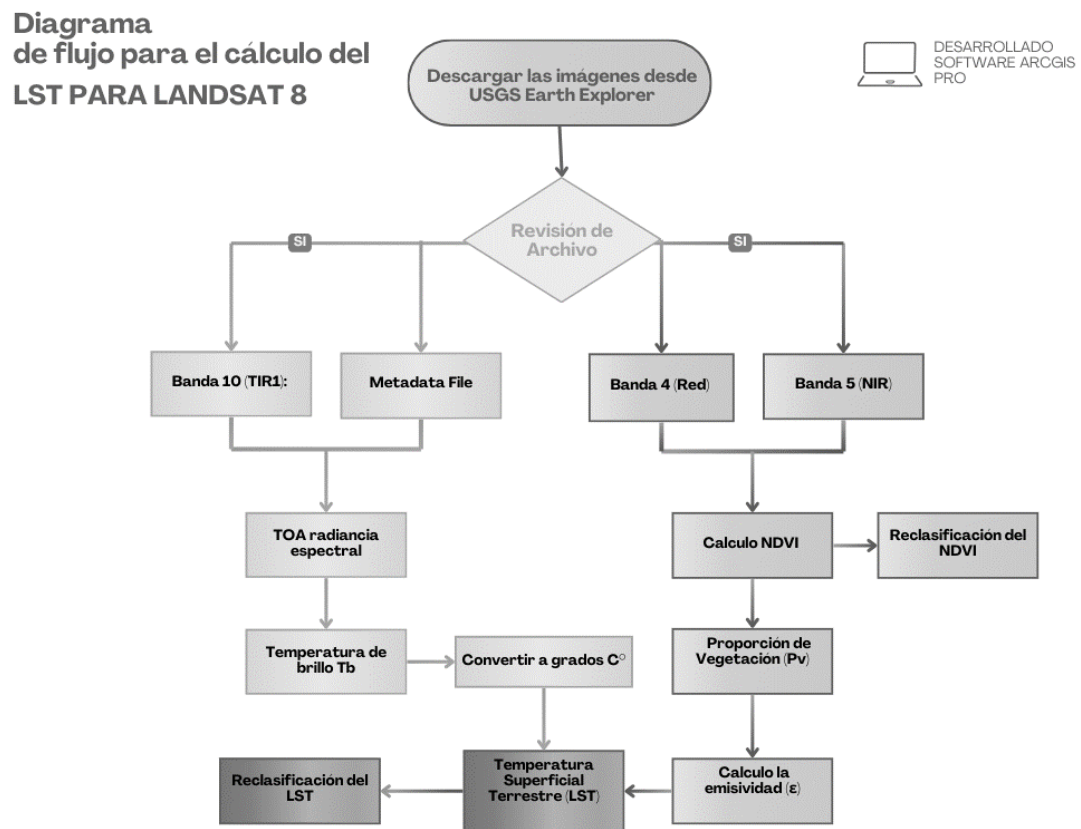
### **6.3 Procesamiento de imágenes**

El cálculo del LST implica varios pasos, que pueden variar ligeramente según el sensor del satélite. A continuación, se describen los pasos principales y las diferencias entre Landsat 8 y Landsat 7 y Landsat 5:

El procesamiento de imágenes Landsat 8 consiste:

Figura 2

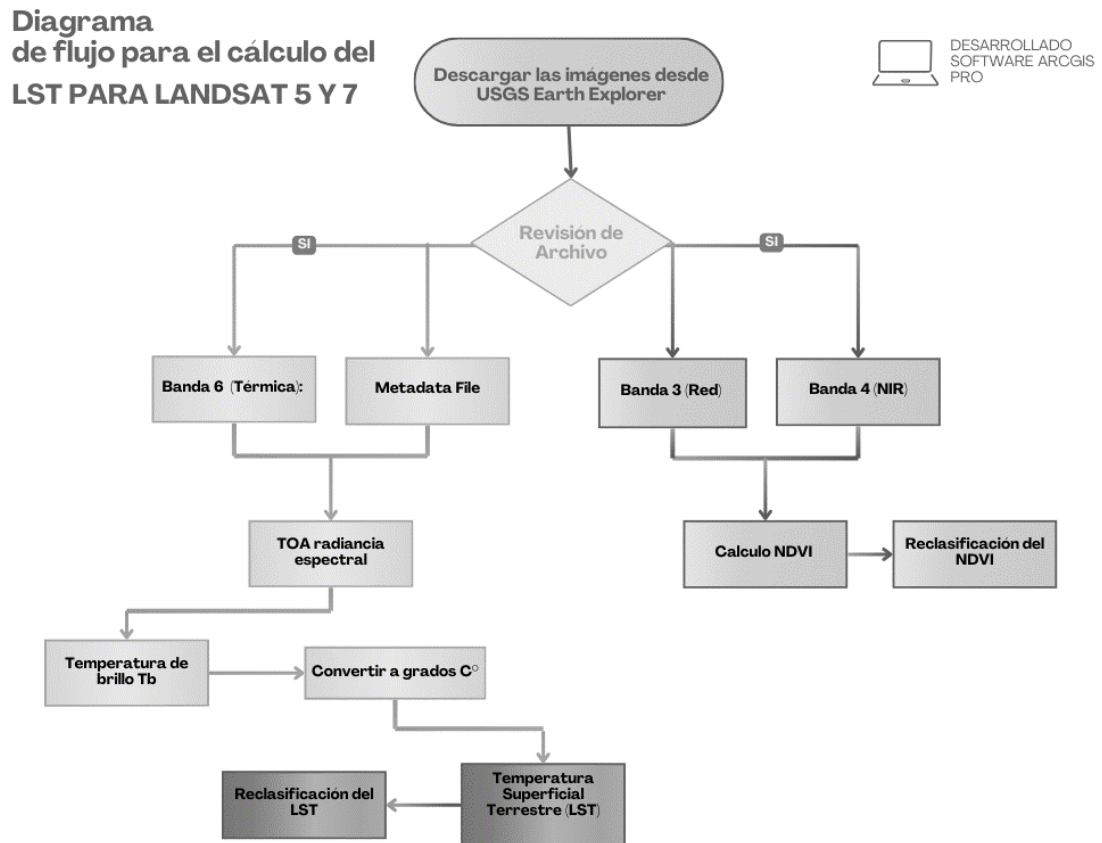
Diagrama de flujo para el cálculo del LST para Landsat 8. según la metodología de García, 2019.



Fuente: Tomada y modificada de García, (2019).

**Figura 3**

Diagrama de flujo para el cálculo del LST para Landsat 5 y 7. Tomada y modificada de Khan et al., 2022.



Fuente: Tomada y modificada de Khan et al., (2022).

### 6.3.1 Preprocesamiento de los datos

Descarga de productos satelitales Landsat 5 colección 2 con nivel de procesamiento L1, Landsat 7 colección 2 con nivel de procesamiento L1, y de la misma forma para Landsat 8 colección 2 con nivel de procesamiento L1. descargados desde USGS Earth Explorer.

Revisión de bandas:

- **Landsat 8:** Banda 10 (TIR1): Para el cálculo de temperatura. Bandas 4 (Red) y 5 (NIR) y el Metadata File (.MTL).
- **Landsat 7 y 5:** Revisión de bandas Banda 6 (TIR1): Para el cálculo de temperatura, Bandas 3 (Red) y 4 (NIR) y el Metadata File (.MTL).

### 6.3.2 Conversión de niveles digitales (DN) a radiancia espectral

Esta es la energía medida por el sensor del satélite (esta aplica para ambos sensores). La fórmula para calcular la radiancia espectral ( $L\lambda$ ) es con la ecuación (2):

$$TOA(L) = ML * Qcal + AL \tag{2}$$

Donde:

- ML: Multiplicador de radiancia (obtenido del archivo. MTL).
- AL: Constante de adición (obtenida del archivo. MTL).
- Qcal: Valor digital (DN) del píxel.

Diferencia:

- Para Landsat 8, los factores  $ML$  y  $AL$  son específicos de la banda B10 y se encuentran en el archivo MTL.
- Para Landsat 7/5, los factores de calibración para la banda B6 son diferentes y también están en el archivo MTL.

### 6.3.3 Conversión de radiancia a temperatura de brillo (BT)

La fórmula para calcular la temperatura de brillo (BT) en kelvin es con la ecuación (3):

$$BT = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (3)$$

Donde:

- $K_1$  y  $K_2$  Constantes térmicas (obtenidas del archivo. MTL).
- $L_\lambda$ : Radiancia espectral calculada en el paso anterior.

NOTA: La conversión de radiancia a temperatura de brillo (Tb) produce un valor en kelvin.

Para obtener la temperatura en grados Celsius, se debe restar 273.15 al resultado de BT.

#### 6.3.4 Cálculo del NDVI

Los valores del NDVI se calcula con la ecuación (4) y se sustentan en la absorción de luz roja (rango visible) y la reflexión de la luz infrarroja cercana (NIR) por parte de biomasa y su retención al agua, principalmente vegetación).

$$NDVI = \frac{Banda\ NIR - Banda\ Red}{Banda\ NIR + Banda\ Red} \quad (4)$$

Banda NIR

- Landsat 8: Banda B5.
- Landsat 7 y 5: Banda B4.

Banda Red:

- Landsat 8: Banda B4.
- Landsat 7 y 5: Banda B3.

#### i. Cálculo de la Proporción de Vegetación (Pv)

Se utiliza para el proceso de cálculo de la emisividad terrestre para derivar la temperatura superficial (LST). Se basa en el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI). En este paso solo se lleva a cabo con el satélite Landsat 8 y se utiliza la ecuación (5).

$$Pv = \left( \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (5)$$

- Si  $NDVI < NDVI_{min}$  el valor de Pv será 0 (suelo desnudo).
- Si  $NDVI > NDVI_{max}$  el valor de Pv será 1 (vegetación completamente densa).

### 6.3.5 Calcular la emisividad ( $\epsilon$ )

En este paso solo se lleva a cabo con el satélite Landsat 8 la ecuación (6) Emisividad ( $\epsilon$ )

$$\epsilon = 0.004 * Pv + 0986 \quad (6)$$

Donde:

- Pv: Proporción de vegetación calculada.
- 0.004: Coeficiente que relaciona el Pv con la emisividad.
- 0.986: Emisividad de referencia para un suelo mixto (considerando áreas con cobertura parcial de vegetación y suelo desnudo).

### 6.3.6 Cálculo de la Temperatura Superficial Terrestre (LST)

Se aplica la fórmula final para todos los sensores con la ecuación (7) de Temperatura Superficial Terrestre (LST)

$$LST = \frac{T_b}{1 + \left(\frac{0.00115 * T_b}{1.4388} * \ln(\varepsilon)\right)} \quad (7)$$

Donde:

- $LST$ : Temperatura superficial terrestre (°C).
- $T_b$ : Temperatura de brillo.
- 0.00115: Constante que resulta de ajustar la longitud de onda central de la Banda 10 (10.895  $\mu\text{m}$ ).
- 1.4388: Valor derivado de la constante de Planck.
- $\varepsilon$ : Emisividad del terreno

### 6.3.7 Generación de capas térmicas y cambios de coberturas a partir de NDVI

Para la generación de las capas térmicas, se utilizó una imagen LST en formato ráster, con valores de temperatura en grados Celsius. Los píxeles de esta imagen fueron clasificados en cinco rangos de temperatura, la temperatura superficial puede ser clasificada cada 5 grados,

---

iniciando con la primera clase menor a 20° y terminando con mayor de 35° (Segura y Bejarano, 2019), siendo escenarios de superficies sin efector geotérmicos intensos. Este proceso permitió categorizar áreas por rangos de temperatura homogéneos y asociarlos con clases del NDVI. Los rangos de temperatura y sus respectivas clasificaciones son los siguientes:

1. **Baja (< 20°C):** Estas áreas corresponden principalmente a zonas montañosas. Los valores de temperatura más bajos reflejan la influencia de la altitud y la cobertura vegetal densa que modera las condiciones térmicas.
2. **Media baja (20°C - 25°C):** Representa áreas de transición con cobertura vegetal limitada y de alta humedad. Este rango incluye regiones con un equilibrio entre vegetación y exposición al sol, como algunas áreas de sabana y tierras de altitud intermedia.
3. **Media (25°C - 30°C):** Este rango incluye sabanas y zonas semiáridas donde la escasa vegetación permite una mayor absorción de calor. Estas áreas están caracterizadas por temperaturas moderadamente altas debido a la combinación de suelo expuesto y vegetación baja.
4. **Media alta (30°C - 35°C):** Asociado con áreas bajas expuestas al sol. La alta radiación solar y la falta de vegetación significativa contribuyen al incremento térmico.
5. **Alta (> 35°C):** Comprende desiertos, suelos desnudos y zonas urbanas con efecto de isla de calor, como Riohacha. Estas áreas presentan las temperaturas más altas debido a la

falta total de cobertura vegetal y el predominio de superficies altamente reflectivas y absorbentes de calor.

Para clasificar las coberturas de la tierra a partir de los valores del NDVI, se utilizó una imagen ráster con valores de NDVI que representan la densidad y el estado de la vegetación, se categorizaron en cinco clases basadas en el rango de 5 descrito anteriormente, lo que permitió identificar diferentes tipos de cobertura terrestre. Este proceso facilita el análisis de las dinámicas del paisaje y la correlación con otros factores ambientales, como la temperatura superficial. Las categorías de clasificación son las siguientes:

1. **Suelo desnudo (<0):** Incluye cuerpos de agua, como ríos, quebradas y lagunas, así como nubes. Estas áreas reflejan valores negativos de NDVI debido a la ausencia de vegetación.
2. **Vegetación ligera (0 a 0.2):** Representa tierras degradadas, asentamientos humanos, vías y suelos sin cobertura vegetal. Los valores bajos de NDVI reflejan superficies expuestas y con poca o nula actividad fotosintética.
3. **Vegetación baja (0.2 a 0.4):** Se asocia con tierras cultivadas, herbazales, arbustos y pastizales, generalmente en terrenos áridos o adaptados para cultivos. Los valores de NDVI en este rango indican vegetación escasa o en crecimiento limitado.

- 
4. **Vegetación media (0.4 a 0.6):** Comprende áreas con vegetación leñosa, plantaciones arbustivas o bosques secos. Los valores de NDVI en este rango muestran una cobertura vegetal moderada y homogénea.
  
  5. **Vegetación medio alta (0.6 a 0.8):** Corresponde a plantas densas en crecimiento, como bosques húmedos o selvas. Los valores altos de NDVI reflejan una vegetación vigorosa con alta actividad fotosintética.
  
  6. **Vegetación alta (> 0.8):** Corresponde a vegetación densa con alta humedad, como pantanos o humedales, que reflejan valores altos de NDVI.

Los ráster de NDVI y LST en las diferentes series temporales fueron procesados píxel a píxel, asignando cada valor al rango correspondiente según los umbrales definidos anteriormente. Este procedimiento generó capas temáticas que representan clases de cobertura terrestre y clases térmicas.

### **6.3.8 Herramientas para relación de variables**

Superponer los mapas de temperatura con las zonas de actividad minera utilizando herramientas de SIG y aplicar análisis espaciales para detectar posibles coincidencias y áreas con variación de temperatura (He et al., 2019). Para estudiar estos cambios de manera cuantitativa Strzempko y Pontius, 2023 proponen una matriz de tabulación cruzada para el cambio dando la

relación entre las clases de la imagen 1 (tiempo 1) con las clases de la imagen 2 (tiempo 2), situando las primeras clases como filas y las segundas como columnas, de esa manera es posible observar la cantidad de cambios entre las distintas categorías, el modelo enunciado se resume en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Matriz de tabulación cruzada propuesta por Strzempko y Pontius, 2023.*

		TIEMPO 2			Total, Tiempo 1
		CATEGORÍA A 1	CATEGORÍA A 2	CATEGORÍA A 3	
TIEMPO 1	CATEGORÍA A 1	P 11	P12	P13	P11 + P12 + P13
	CATEGORÍA A 2	P21	P22	P23	P21 + P22 + P23
	CATEGORÍA A 3	P31	P32	P33	P31 + P32 + P33
<b>Total, Tiempo 2</b>		P11 + P21 + P31	P12 + P22 + P32	P13 + P23 + P33	

Fuente: Strzempko y Pontius, (2023).

---

Otro método concebido para la relación de cambios es propuesto por Franco (2016), que por medio de la herramienta espacial de superposición se crea la relación entre los dos tiempos. En esta metodología existen dos tiempos, al igual que en Pontius, y para cada valor de la imagen uno existirá una clase, lo que ocurre de la misma forma con la imagen dos. Seguidamente, por superposición se le brindará a un nuevo campo los valores, si siguen siendo el mismo tendrán la forma de 1 a 1, donde no se evidenciaría cambio, a diferencia que, si quedase 1 a 2, lo que indicaría un cambio de la clase 1 en la imagen 1, para la clase 2 en la imagen 2. De esta forma se pueden categorizar los cambios y discriminarlos en una nueva capa.

### **6.3.9 Relación entre la variación de temperatura superficial y variación en las coberturas del suelo.**

Para evaluar las tendencias y variaciones se emplean técnicas de análisis temporal, midiendo los cambios, usando series temporales para identificar patrones de aumento o disminución de temperatura, que pueden ser cuantificados por medio de las matrices de correlación de Strzempko y Pontius, 2023.

La medición de estos cambios nos permite cuantificar de qué manera se realizó el cambio en el píxel muestreado, siendo en la ubicación de estos, donde en el tiempo cero se comporta de una clase y al tiempo uno cambia su estado, de esta manera es posible realizar la medición de píxeles o área de los cambios.

### **6.3.10 Análisis de correlación**

La correlación de Pearson permite realizar la medida de relación o dependencia lineal entre dos variables cuantitativas, midiendo el grado de relación que existen entre ellas. Para este estudio se utiliza analizando esta tendencia entre las variables de cambio para LST y NDVI, en los diferentes escenarios temporales.

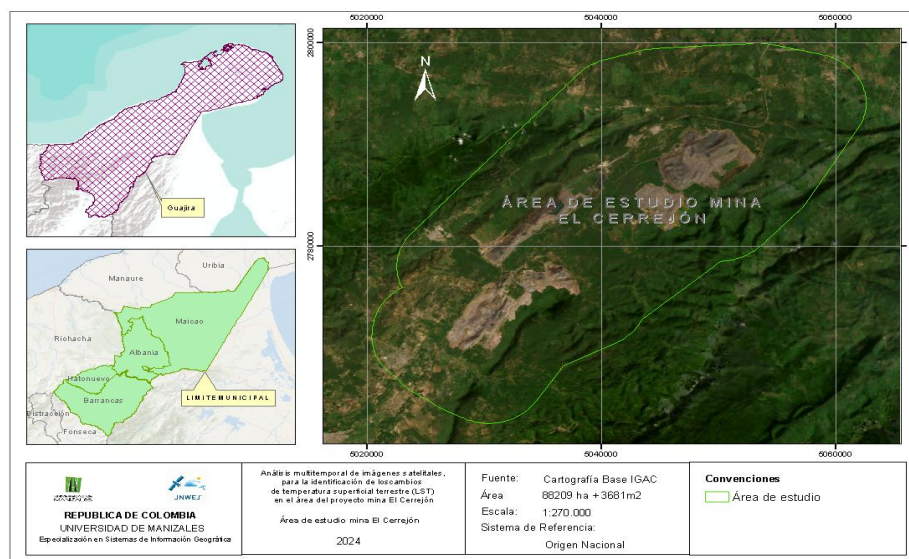
# 7. Resultados

## 7.1 Definición Del Área De Estudio

Para determinar el área de estudio se tomó referencia un buffer de 5 Km de distancia de los títulos mineros otorgados por la Agencia Nacional de Minería (ANM) 00-1976, 00011, 067-2001, 081-91, para el desarrollo de actividades mineras, por parte del proyecto minero El Cerrejón, finalmente el área de estudio corresponde a 88209 ha + 3681 m<sup>2</sup>, abarcando a los municipios de Albania, Barrancas y Hato Nuevo del departamento de La Guajira. (Ver Figura 4).

**Figura 4**

*Mapa de Ubicación General (Fuente: los Autores)*



Fuente: Autores.

El Departamento de La Guajira está situado en el extremo norte del país y de la llanura del Caribe, en la parte más septentrional de la América del sur; localizado entre los 10°23' y 12°28'

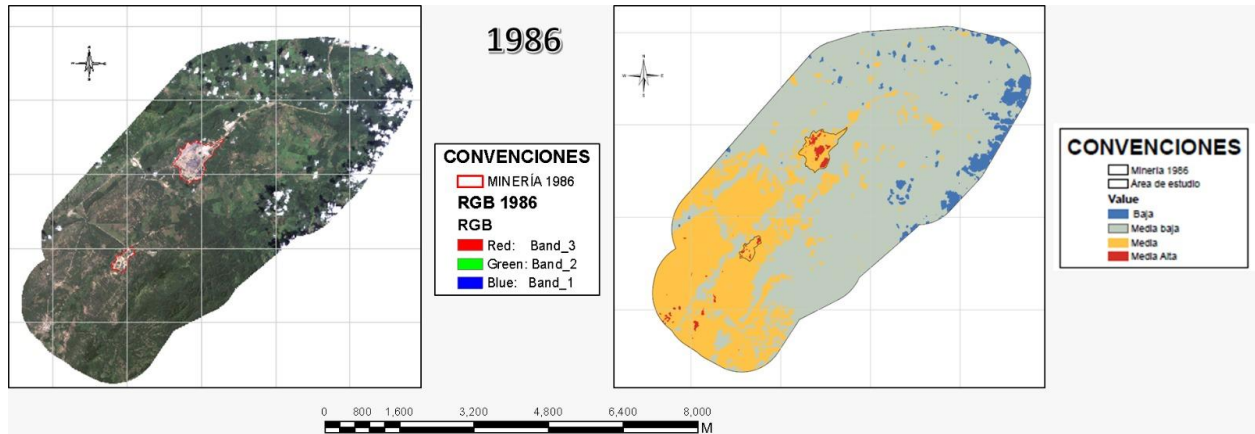
de latitud norte y los 71°06' y 73°39' de longitud oeste. Cuenta con una superficie de 20.848 km<sup>2</sup> lo que representa el 1.8 % del territorio nacional. Limita por el Norte con el mar Caribe, por el Este con el mar Caribe y la República de Venezuela, por el Sur con el departamento del Cesar, y por el Oeste con el departamento del Magdalena y el mar Caribe (Gobernación de La Guajira, 2024).

## **7.2 Variaciones Significativas en LST**

Se observó una marcada diferencia en el LST entre las zonas intervenidas con la mina y el resto del área de estudio. Donde a medida que la minería de carbón genera un cambio de la cobertura del suelo indicando un mayor calentamiento en las zonas más cercanas a las operaciones mineras activas, estas áreas aumentan de forma notable su LST, en comparación con las áreas periféricas que mantienen una mayor cobertura vegetal en los espacios no intervenidos. Esto indica una relación directa entre la extensión de la actividad minera y el calentamiento de estas superficies, para un mejor entendimiento se empleó una rampa de color que va desde el azul para las temperaturas más bajas a rojo para temperaturas más altas. (Ver Figura 5, Figura 6 y Figura 7)

**Figura 5**

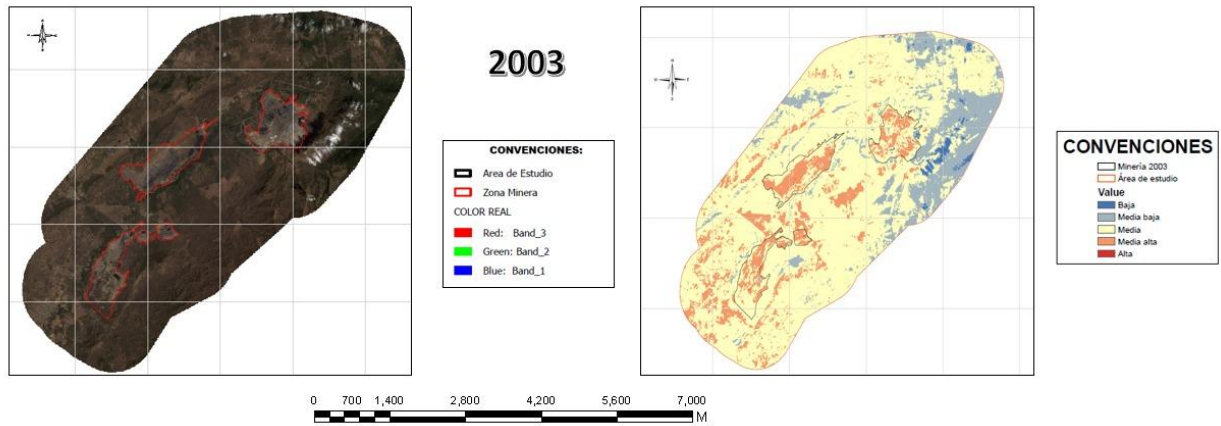
*Actividades mineras y el LST 1986.*



Fuente: Autores.

**Figura 6**

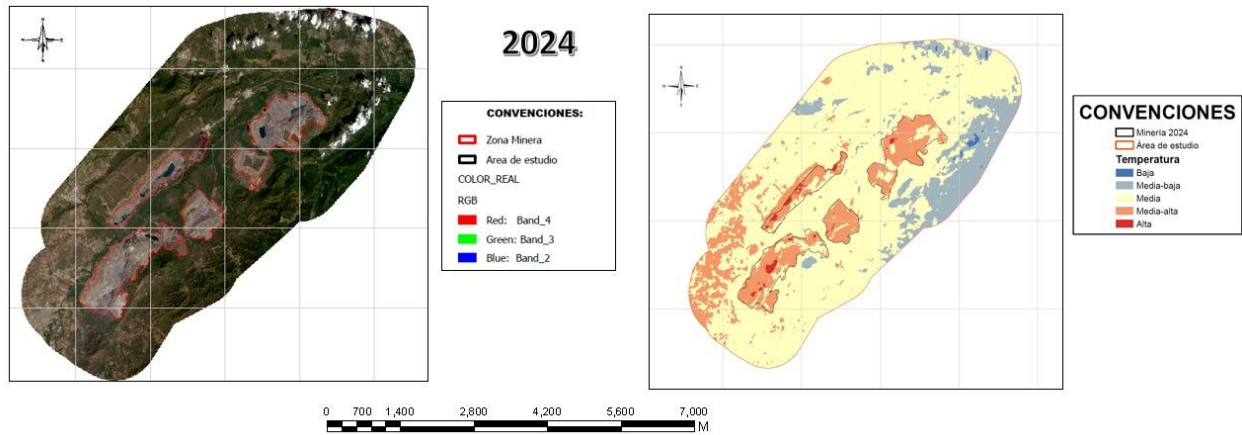
*Actividades mineras y el LST 2003.*



Fuente: Autores.

**Figura 7**

*Actividades mineras y el LST 2024.*



Fuente: Autores.

Se evidencia que las actividades que han provocado variaciones significativas en la temperatura superficial terrestre (LST) están relacionadas con la pérdida de cobertura vegetal, como ocurre en el área de estudio, incluyendo las áreas intervenidas con la actividad minera.

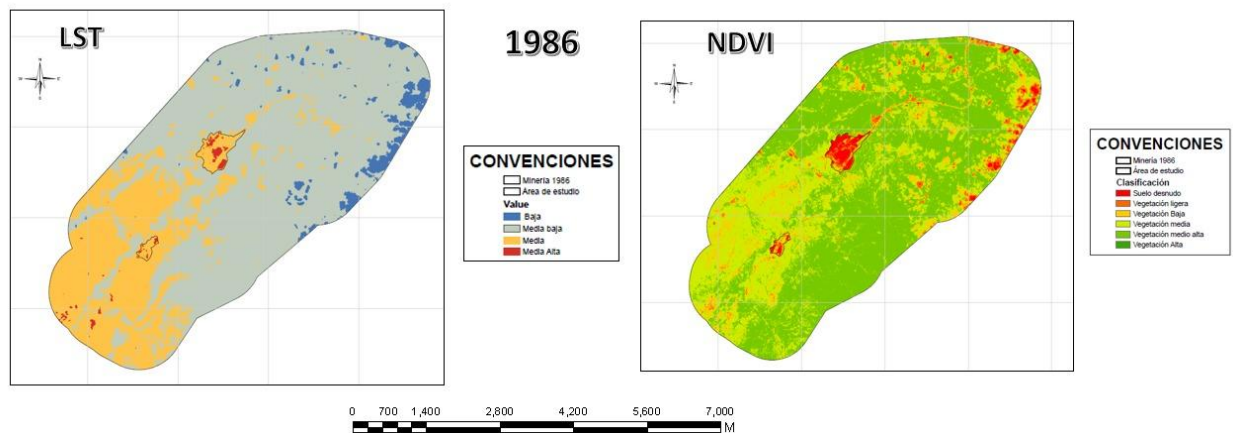
### 7.3 Impacto sobre el Índice de Vegetación (NDVI)

El análisis de la temperatura de la superficie terrestre (LST) para los años 1986, 2003 y 2024 ha confirmado que la actividad minera en el proyecto El Cerrejón ha tenido un efecto de impacto. Esto se observó principalmente en las áreas intervenidas donde se ha removido la vegetación natural y se han alterado las coberturas del suelo; consecuentemente estas áreas han quedado expuestas a una mayor absorción de radiación solar. Antes de que se llevarán a cabo las

actividades mineras en la zona de estudio se observaban temperaturas LST notablemente más bajas; esto sugiere que la extracción minera a cielo abierto ha sido responsable del aumento de la temperatura especialmente en las zonas cercanas a los socavones. En estos lugares la falta de vegetación reduce la capacidad del suelo para regular la temperatura lo que ocasiona un incremento significativo en el calor en la superficie terrestre. (Ver Figura 8, Figura 9 y Figura 10).

**Figura 8**

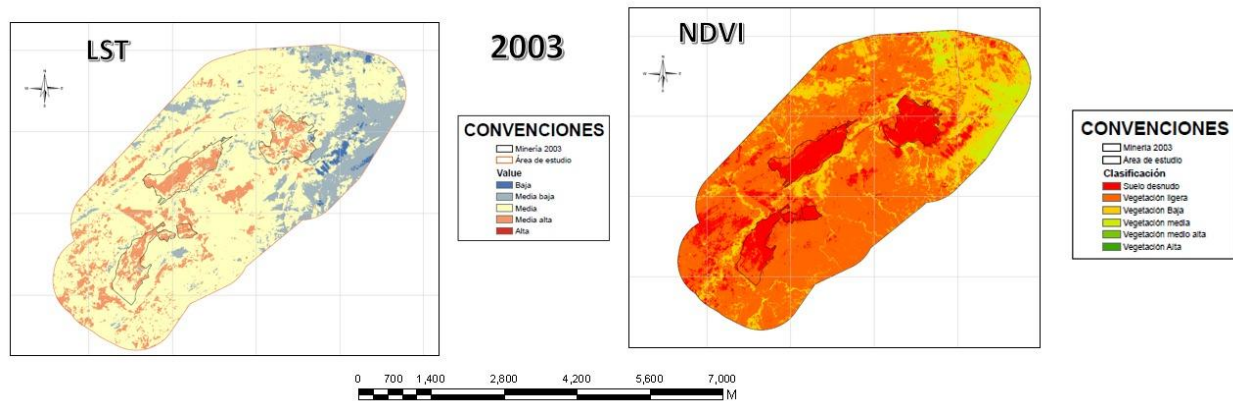
*NDVI y el LST 1986.*



Fuente: Autores.

**Figura 9**

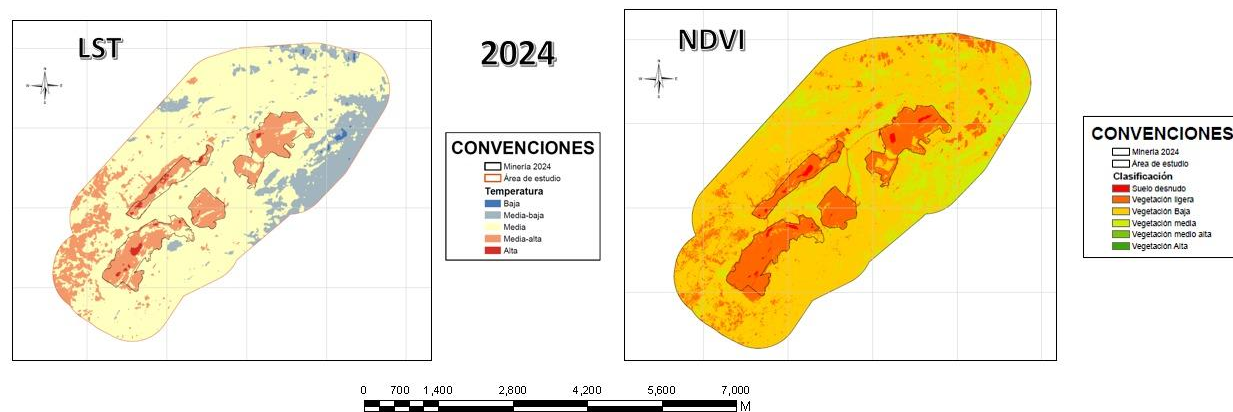
*NDVI y el LST 2003.*



Fuente: Autores.

**Figura 10**

*NDVI y el LST 2024. Fuente Los Autores*



Fuente: Autores.

Las propiedades químicas del carbón al reaccionar con el oxígeno genera combustión espontanea, la cual libera energía en forma de calor y con este el aumento de las temperaturas

---

debido a las características del mineral (Gutiérrez et al., 2018); también se da el aumento de temperatura en áreas adyacentes debido a cambios en el uso de cobertura para el avance en este tipo de minería y a la modificación de la topografía de la superficie. (Zhang & Kuenzer, 2007), lo que también puede estar influenciando en el cambio de temperatura. La minería de carbón no solo altera directamente la temperatura de la superficie en el área de la mina, sino que también tiene un efecto de arrastre.

## **7.4 Correlación entre Actividades Mineras y LST**

### **7.4.1. Análisis comparativo de la relación entre LST y NDVI (1984, 2003 y 2024)**

El coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) es una estadística que mide la relación lineal entre dos variables. En otras palabras,  $r$  mide qué tan grande y en qué dirección los cambios en  $x$  son asociados con cambios en  $y$ . Su valor oscila entre  $-1$  y  $1$ .

- Un valor de  $r = 1$  implica una correlación positiva perfecta, lo que significa que un aumento en  $x$  está directamente correlacionado con un aumento en  $y$ .
- Un valor de  $r = -1$ , simboliza una correlación negativa perfecta. Esto implica que un aumento en  $x$  está directamente correlacionado con una disminución en  $y$ .
- Un valor de  $r = 0$  implica que no hay correlación.

La Tabla 3 indica cuánto se puede decir acerca de los valores de r.

**Tabla 3**

*Valores que entrega el coeficiente de correlación de Pearson*

<b>Valor de r</b>	<b>Interpretación</b>
-1.00	Correlación negativa perfecta
$-1.00 < r \leq -0.50$	Correlación negativa fuerte
$-0.50 < r \leq -0.30$	Correlación negativa moderada
$-0.30 < r < 0$	Correlación negativa débil
0	No hay correlación
$0 < r \leq 0.30$	Correlación positiva débil
$0.30 < r \leq 0.50$	Correlación positiva moderada
$0.50 < r < 1.00$	Correlación positiva fuerte
1	Correlación positiva perfecta

Fuente:

Los gráficos que ilustran muestran cómo varía la relación entre la temperatura superficial terrestre (LST) y el índice vegetativo normalizado (NDVI) a lo largo de tres años clave: 1986, 2003 y 2024. En la Tabla 4 se evidencia los resultados de correlación a través de los años.

**Tabla 4***Correlación de Pearson para los años 1986, 2003, 2024*

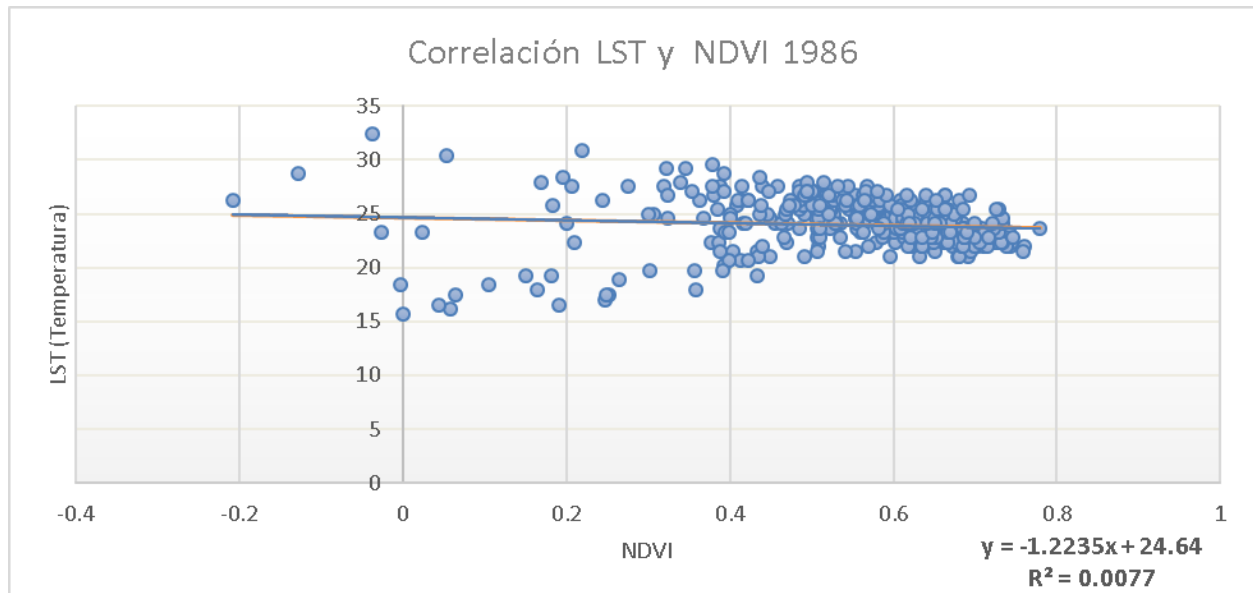
<b>Año</b>	<b>Valor de r</b>	<b>Interpretación según la tabla</b>
1986	-0.0877	Correlación negativa débil (cerca a nula)
2003	-0.555	Correlación negativa moderada-fuerte
2024	-0.720	Correlación negativa fuerte

Fuente: Mind the Graph. (2023).

En el año 1986, en la figura 11 la correlación entre el NDVI y la temperatura superficial del terrestre (LST) es débil es cercana a cero  $r=-0.0877$ , con solo un 0.77 % de la variabilidad en LST explicada por los cambios en la vegetación dado por el coeficiente de determinación  $R^2=0.0077$ . La pendiente negativa de la tendencia es  $-1.2235$  indica una relación inversa casi inexistente, lo que sugiere que el aumento en la cobertura vegetal tenía un impacto mínimo en la temperatura superficial.

**Figura 11**

*Correlación entre el LST y el NDVI 1986.*

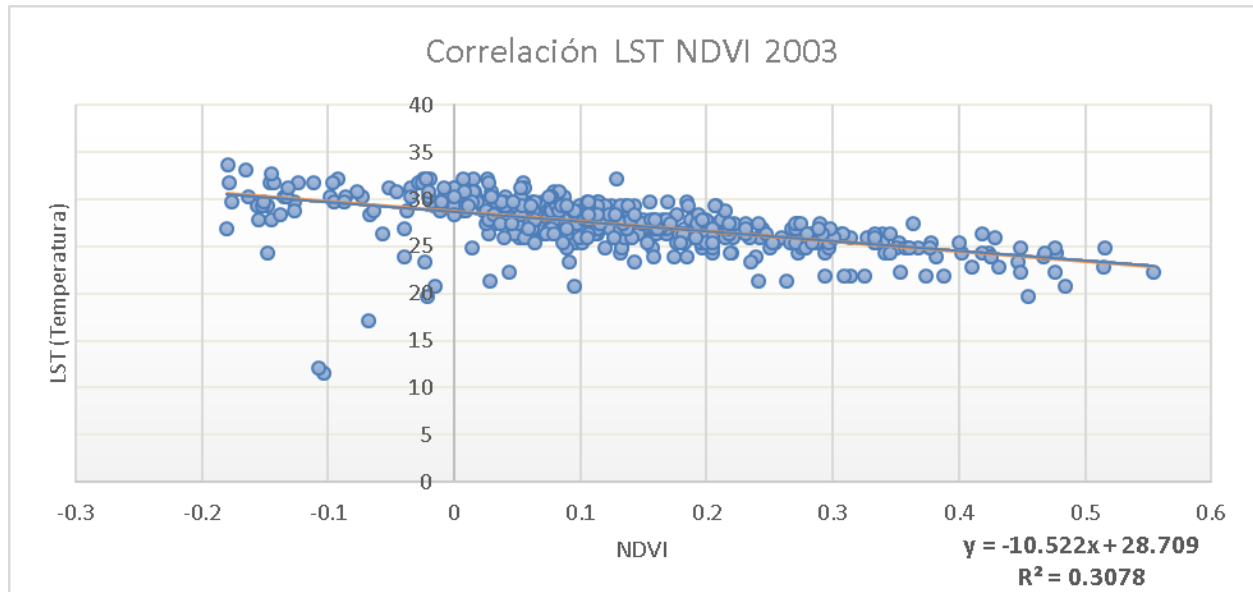


Fuente: Autores.

Para 2003, en la figura 12 la correlación negativa se hace más fuerte con un valor moderado de  $r = -0.555$ . De esta manera, el 30.78 % de la variabilidad en LST se asocia con el NDVI. La línea de tendencia recibe una pendiente,  $b = -10.522$ , lo que significa que el NDVI influyó sobre la LST más en 2003 que en 1986. En este periodo, los valores bajos de NDVI menores  $< 0.01$  estuvieron ligados a temperaturas medias superiores a  $30^{\circ}\text{C}$ , lo que podría estar relacionado con la deforestación, el crecimiento urbano y el cambio climático.

**Figura 12**

*Correlación entre el LST y el NDVI 2003.*

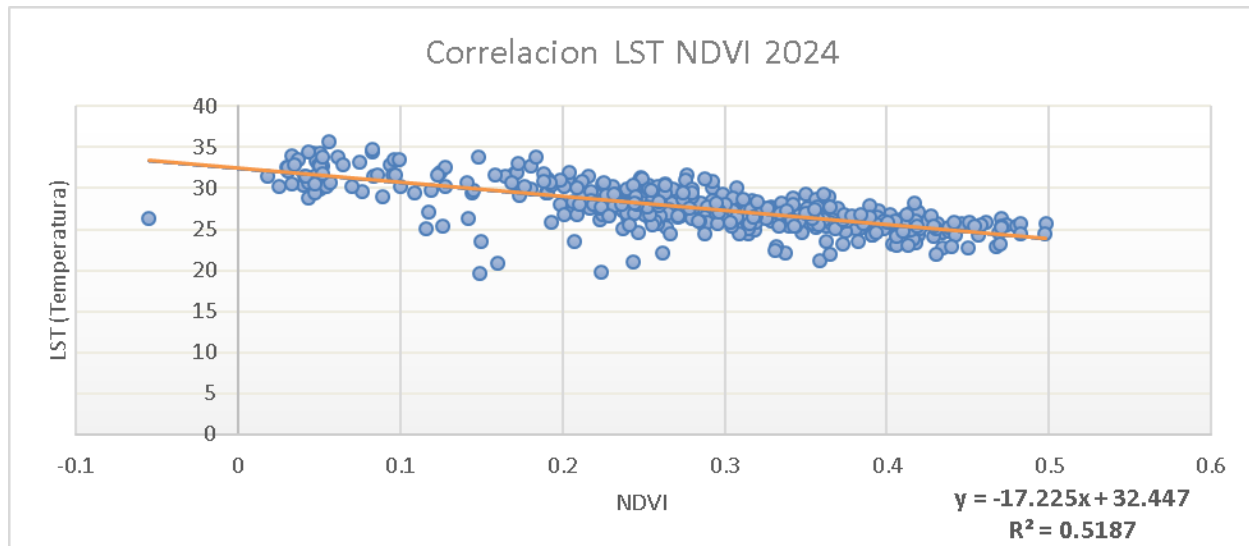


Fuente: Autores.

La correlación se intensifica en el año 2024 como se muestra en la figura 13 con un  $r = -0.720$ , el coeficiente de determinación es  $R^2 = 0.5187$  lo que significa un total de 51.87 % de la variabilidad en LST se explica por el NDVI. La pendiente de la tendencia es  $-17.225$  es la más pronunciada de los tres periodos, evidenciando que el aumento del NDVI tiene un impacto significativo en la reducción de la temperatura superficial. Las zonas con  $NDVI > 0.4$  registraron temperaturas inferiores a  $25^{\circ}\text{C}$ , mientras que aquellas con  $NDVI < 0.1$  superaron los  $32^{\circ}\text{C}$ , reflejando el impacto significativo de la vegetación en la mitigación del calor.

**Figura 13**

*Correlación entre el LST y el NDVI 2024. Fuente Los Autores.*



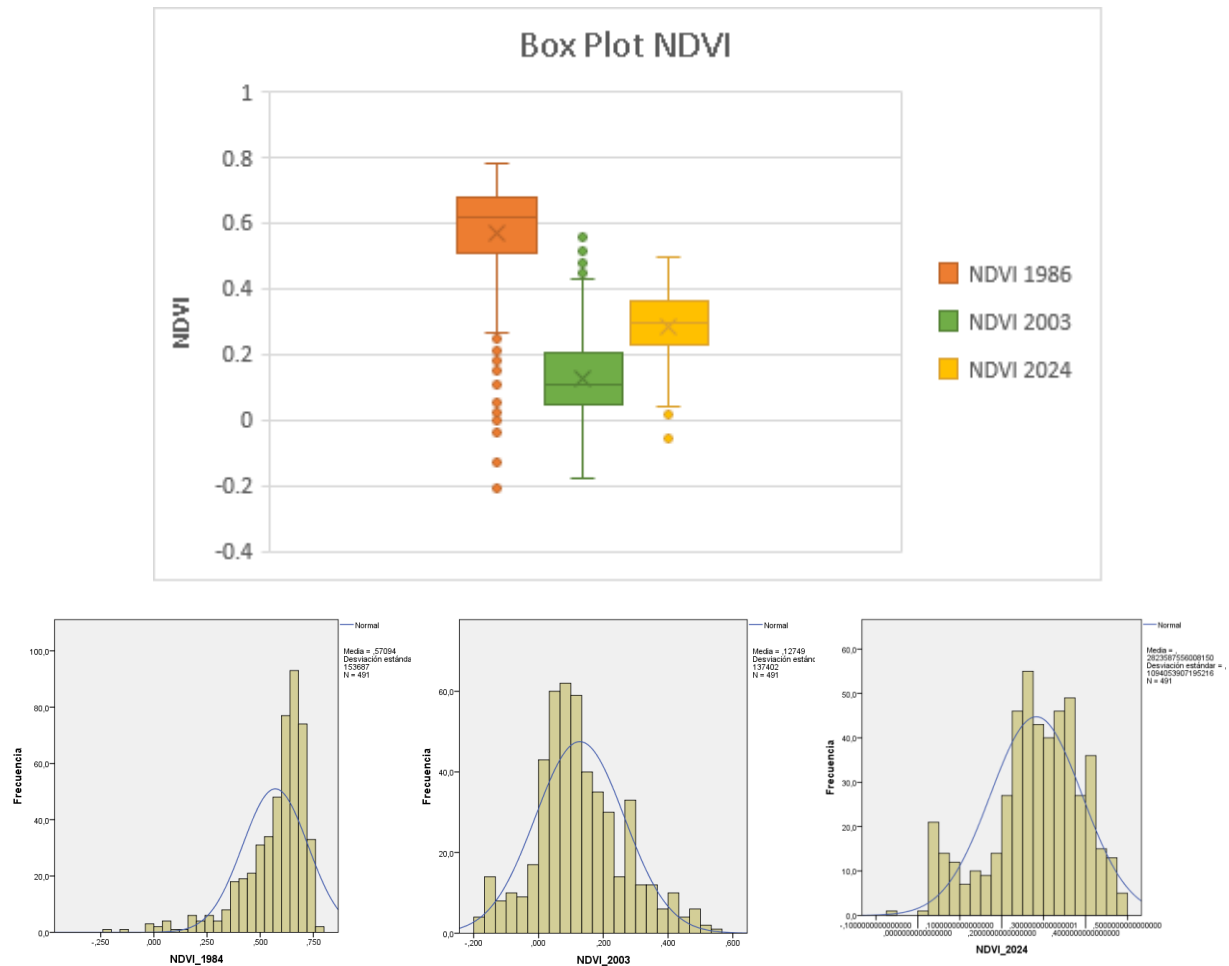
Fuente: Autores.

**b. Análisis Comparativo de los Box Plots del NDVI y LST**

Los gráficos tipo Box Plot son útiles para identificar tendencias generales, distribución de datos y presencia de valores atípicos.

**Figura 14**

*Análisis estadístico del NDVI.*



Fuente: Autores.

Los datos del NDVI correspondientes al año 1984 muestran una mayor variabilidad, incluyendo valores negativos que indican zonas con una cobertura de vegetación escasa. Sin embargo, los valores centrales (mediana y media) sugieren una mayor presencia de vegetación en comparación con años posteriores. Respecto a los valores atípicos detectados en el análisis de datos se observa un número considerable de valores negativos extremos e indica una mayor

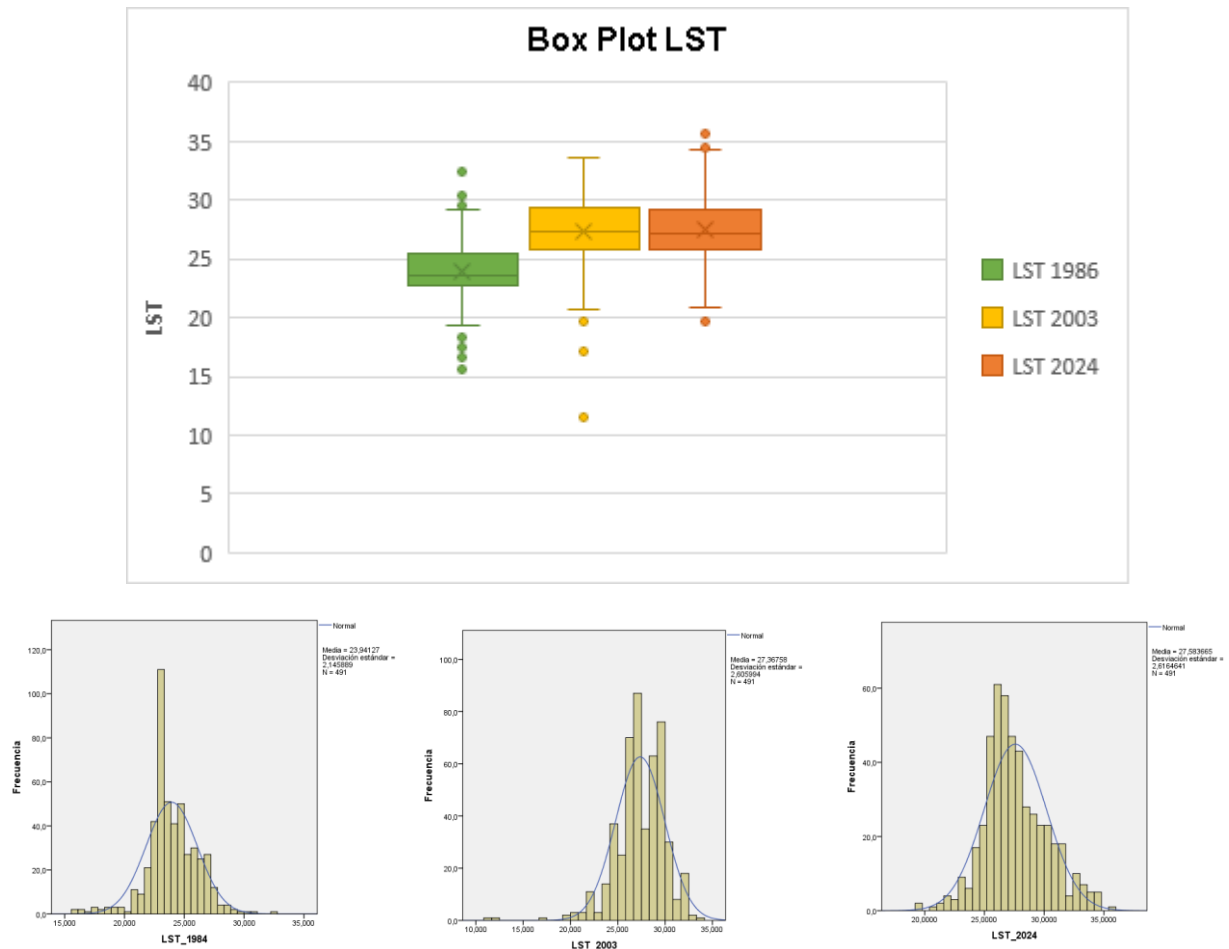
heterogeneidad en la cobertura vegetal, probablemente asociada con la degradación ambiental. El pico del histograma se desplaza más hacia la derecha, lo que indica una mayor frecuencia de valores altos de NDVI.

En 2003, se observa una disminución en la mediana del NDVI, junto a una concentración de valores más bajos en su distribución, lo que sugiere un efecto en la vegetación causada posiblemente por el incremento de las actividades mineras. Respecto a los datos atípicos, estos indican la presencia de áreas con vegetación abundante, resaltando una potencial recuperación del medio ambiente debido a las actividades de rehabilitación que ha venido realizando la mina El Cerrejón (Pérez Díaz, 2022). La distribución del histograma empieza a desplazarse hacia valores de NDVI inferiores con relación a 1984.

Se nota un incremento en los índices del Índice de Varianza Normalizada (NDVI) para el año 2024. El pico está un poco más centrado, pero aún persiste un cierto desequilibrio negativo. Pese a los valores reducidos, la información presenta una uniformidad más elevada, con una reducción en la cantidad de puntos extremos de los bigotes. Esto podría ocurrir mediante la recuperación del entorno o la regeneración naturales en algunas zonas. El histograma se orienta hacia valores aún más reducidos, con un pico ubicado en valores NDVI de valor inferior. La asimetría es menos notable, lo que señala una mayor uniformidad en los valores de NDVI.

**Figura 15**

*Análisis estadístico LST.*



Fuente: Autores.

Respecto al LST de 1984, se nota una reducción en las temperaturas superficiales. Las zonas verdes absorben más radiación y exhiben temperaturas inferiores en comparación con las áreas sin vegetación. Los valores atípicos más bajos son frecuentes, probablemente vinculados con zonas verdes, cuerpos de agua o condiciones meteorológicas, mientras que los valores atípicos más altos sugieren la presencia de áreas expuestas o deterioradas. La distribución

presenta una desproporción negativa, con la mayoría de los valores se agrupando en un intervalo bajo de 20°C a 25°C.

Para el año 2003, la mediana del LST experimenta un incremento significativo, con un rango más extenso hacia valores Altos. Este incremento podría estar relacionado con la reducción de la vegetación y la exposición del suelo que probablemente está vinculado con la consolidación de las operaciones mineras. Los valores atípicos inferiores podrían ser interpretados como consecuencia de la vegetación que disminuye las temperaturas, cuerpos hídricos o microclimas que provocan anomalías. La distribución de los datos se inclina hacia valores superiores, con un pico principal en torno a 25°C a 30°C aproximadamente.

Para el año 2024, las temperaturas superficiales alcanzan su máximo nivel, presentando una variabilidad reducida. Este patrón muestra una presencia creciente de zonas expuestas. La distribución continúa orientándose hacia valores más elevados, llegando a un máximo cercano a 27°C. Se nota un ligero incremento en la dispersión hacia los extremos (tanto altos como bajos), lo que indica que en el año 2024 existirán áreas con mayor variabilidad térmica.

## **7.5 Correlación entre LST y NDVI**

Las tablas muestran las transiciones entre diferentes categorías de vegetación y suelo desnudo (indicadores del NDVI) y los cambios en rangos de temperatura superficial (representados en es de 1 a 5.

Entre 1986 y 2003 (Tabla 3) Los cambios más representativos se dan de vegetación medio alta a vegetación ligera, donde el cambió de temperatura del nivel 2-3 representa 2473,6 ha, seguido de la vegetación media a suelo desnudo, donde el cambio del nivel 3-4 representa una transición de 1306,94 ha, de la misma forma sucede con los cambios de vegetación media a vegetación ligera que para los niveles de temperatura 3-3 (se mantiene en temperatura) pero existe un cambio en vegetación media a vegetación ligera con 1495,2 ha.

**Tabla 5**

*NDVI VS LST comparación entre los años 1986 y 2003.*

COMPARACIÓN	CAMBIO LST (RANGOS)											
	1-3	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	3-2	3-3	3-4	3-5	4-3	4-4
S DESNUDO - S	0	0	13,58	0	0,91	0	3,62	200,0	192,7	0,91	81,46	122,1
DESNUDO								2	8			9
S DESNUDO - V	0	0	0,91	0	0	0	1,81	128,5	2,72	0	53,40	0,91
LIGERA								2				
S DESNUDO - V BAJA	0	0	0,91	0	0	0	0	0,91	0	0	0	0
V LIGERA - S	0	0	0	1,81	5,43	0	4,53	145,7	247,0	0,91	6,34	29,87
DESNUDO								2	9			

COMPARACIÓN		CAMBIO LST (RANGOS)										
V LIGERA - V LIGERA	2,7 2	0	0,91	4,53	0,91	0	0	104,0 9	2,72	0	8,15	3,62
V LIGERA - V BAJA	0	0	0	0	0	0	0	3,62	0	0	0	0
V BAJA - S DESNUDO	0	0	2,72	53,40	66,07	0	9,96	305,9 2	500,5 1	0,91	0	9,05
V BAJA - V LIGERA	0	0	0	57,02	0,91	0	1,81	271,5 3	45,25	0	0,91	2,72
V BAJA - V BAJA	0	0	0,91	0,91	0	0	0	9,96	0	0	0	0
V MEDIA - S DESNUDO	0	3,62	22,63	677,0 0	838,1 1	2,72	31,68	868,8 8	1306, 94	1,81	0	2,72
V MEDIA - V LIGERA	0	0	9,96	826,3 4	28,96	0	0	1495, 20	119,4 7	0	0	0,91
V MEDIA - V BAJA	0	0	4,53	41,63	0	0	0	40,73	0	0	0	0
V MEDIO ALTA - S DESNUDO	0	9,05	111,3 3	1046, 28	846,2 5	2,72	0	56,12	77,84	0	0	0
V MEDIO ALTA - V LIGERA	0	0	17,20	2473, 60	45,25	0	0	227,1 8	12,67	0	0	0
V MEDIO ALTA - V BAJA	0	0	14,48	159,3 0	0	0	0	13,58	0	0	0	0
V MEDIO ALTA - V MEDIA	0	0	3,62	8,15	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autores.



COMPARACIÓN				CAMBIO LST (RANGOS)												
V LIGERA - S				1,8			0,9	60,	6,3		8,1					
DESNUDO	0	0	0	1	0	0	1	64	4	0	5	0	0	0	0	0
V LIGERA - V				7,2	10,			731		116	18,	140	28,			
LIGERA	0	0	0	4	86	0	0	,31		,76	10	,29	06	0	0	0
V LIGERA - V				10,	0,9			102		209	41,	30,				
BAJA	0	0	0	86	1	0	0	4,5		,98	63	77	0	0	0	0
V LIGERA - V				0,9				4,5		0	0	0	0	0	0	0
MEDIA	0	0	0	1				3								
V BAJA - S							0,9	4,5								
DESNUDO	0	0	0	0	0	0	1	3		0	0	0	0	0	0	0
V BAJA - V				1,8	2,7			30,	181	1,8						
LIGERA	0	0	0	1	2	0	0	77	,92	1	0	0	0	0	0	0
V BAJA - V				0,9	1,8			31,	12,							
BAJA	0	0	0	1	1	0	0	68	67	0	0	0	0	0	0	0
V BAJA - V				13,				6,3								
MEDIA	0	0	0	58	0	0	0	4		0	0	0	0	0	0	0
V MEDIA - V				0,9	0,9			0,9	5,4							
LIGERA	0	0	0	1	1	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0
V MEDIA - V					1,8			0,9	0,9							
BAJA	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autores.

Durante el periodo de 1986 a 2024 (Tabla 6), los cambios de vegetación baja y media a suelo desnudo muestran un incremento en los grados de temperatura. Por ejemplo, la variación entre vegetación media y suelo desnudo en NIVEL 3-3 (133,95 ha) y NIVEL 2-3 (90,51 ha) muestra un calentamiento considerable en zonas anteriormente ocupadas por vegetación media, lo que reafirma el impacto de la desaparición de vegetación en el incremento de la temperatura. Las especies de vegetación ligera y baja son las más activas en cuanto a transiciones. Por ejemplo, la transición entre vegetación ligera y vegetación baja en NIVEL 3-3 es notable (197,31 ha) y conserva un peso significativo incluso en niveles de temperatura más elevados, como en NIVEL 3-5. (9,96 ha). Los cambios desde suelo desnudo o vegetación ligera hacia vegetación baja o vegetación media están menos representados y con valores bajos. Por ejemplo, suelo desnudo - vegetación baja en NIVEL 3-3 alcanza un valor moderado (273,34 ha), pero en rangos más cálidos como NIVEL 3-4 (4,53 ha).

**Tabla 7**

*NDVI VS LST comparación entre los años 1986 y 2024.*

COMPARACIÓN	CAMBIO LST (RANGOS)									
	1-3	3-3	3-4	3-5	4-3	4-4	2-2	2-3	2-4	2-5
S DESNUDO -S DESNUDO	0	8,15	0	0	0	0	6,34	7,24	0	0
S DESNUDO -V LIGERA	0	75,12	162,92	7,24	54,31	83,27	0	1,81	0,91	0
S DESNUDO -V BAJA	0	273,34	4,53	0	118,57	1,81	0	0	0	0

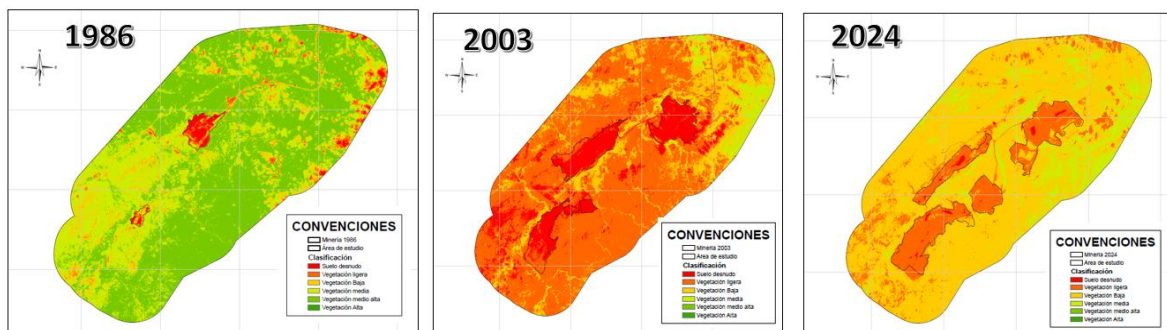
COMPARACIÓN	CAMBIO LST (RANGOS)									
V LIGERA -S DESNUDO	0	13,58	0,91	0	0	0	0	1,81	0	0
V LIGERA -V LIGERA	0	63,36	201,83	20,82	10,86	19,01	0	0	5,43	0
V LIGERA -V BAJA	2,72	197,31	9,96	0	18,10	0	0	6,34	0	0
V LIGERA -V MEDIA	0	0,91	0	0	0	0	0	0	0	0
V BAJA -S DESNUDO	0	45,25	2,72	0	0	0	0	4,53	0	0
V BAJA -V LIGERA	0	174,68	625,41	70,60	1,81	10,86	0	36,20	70,60	0
V BAJA -V BAJA	0	177,40	49,78	0	0	0	0	63,36	6,34	0
V BAJA -V MEDIA	0	0	0	0	0	0	0	0,91	0	0
V MEDIA -S DESNUDO	0	133,95	9,05	0	0	0	1,81	90,51	2,72	0
V MEDIA -V LIGERA	0	633,56	2422,91	247,99	0,91	2,72	0	294,15	1431,84	33,49
V MEDIA -V BAJA	0	295,06	122,19	0	0	0	0	391,00	204,55	0
V MEDIA -V MEDIA	0	0	0	0	0	0	0	5,43	0	0
V MEDIO ALTA -S DESNUDO	0	12,67	1,81	0	0	0	0	82,36	8,15	0
V MEDIO ALTA -V LIGERA	0	102,27	223,56	12,67	0	0	0	545,77	3004,88	51,59
V MEDIO ALTA -V BAJA	0	28,06	6,34	0	0	0	0	735,83	279,67	0
V MEDIO ALTA -V MEDIA	0	0	0	0	0	0	0	28,06	0	0

Fuente: Autores.

Los resultados de la (Tabla 7) proporcionan información relevante acerca de cómo las operaciones mineras podrían afectar la temperatura de la superficie terrestre. Esto contribuye a una comprensión más profunda de los posibles impactos ambientales del proyecto minero El Cerrejón, estableciendo así un marco inicial para futuras investigaciones y estrategias de gestión ambiental.

**Figura 16**

*Comparación NDVI 1986 - 2003 – 2024.*



Fuente: Autores.

**Tabla 8**

*Áreas de comparación NDVI para los años 1986 - 2003 – 2024.*

COMPARACIÓN	AÑO					
	1986		2003		2024	
Nombre	Área (Ha)	%	Área (Ha)	%	Área (Ha)	%

COMPARACIÓN	AÑO						
	1986		2003		2024		
NDVI	Suelo Desnudo	1206,9	1,37%	12575,	14,26%	454,649	0,52%
		1		3			
	Vegetación Ligera	2457,6	2,79%	54417,	61,70%	59924,2	67,94%
				9			
	Vegetación Baja	6967,5	7,90%	17207,	19,51%	15783,5	17,89%
				5			
	Vegetación Media	29284,	33,20	3999,2	4,53%	12041	13,65%
	6	%	5				
Vegetación Medio	48284,	54,74	0,7380	0,00%	0	0,00%	
Alta	9	%	3				
Vegetación Alta	0,2718	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	
	47						

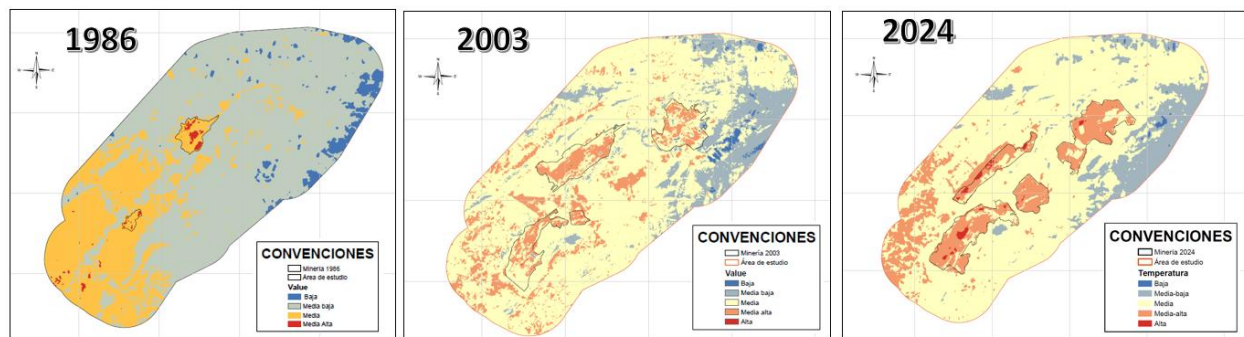
Fuente: Autores.

La comparación temporal del (NDVI) entre 1986 y 2024, tal como se ilustra en la Figura 16, muestra alteraciones importantes en la vegetación de la región estudiada durante esas fechas particulares. En 1986, las zonas de Vegetación Medio Alta y Vegetación Media predominaban, abarcando alrededor del 87% del territorio analizado, lo que indicaba la existencia de un ecosistema en estado de conservación relativa. No obstante, para el año 2003, se registró un

descenso considerable en estas coberturas; la Vegetación Medio Alta casi desapareció y la Vegetación Media experimentó una disminución significativa del 33.20%, según la **Tabla 8** al 4.53%. Además, se observó un incremento significativo en la Vegetación Ligera, desde aproximadamente el 2.79 % en 1986 hasta un impresionante 61.70 % en 2003, lo que evidencia un proceso acelerado de degradación del ecosistema. Con respecto al año 2024, se observa una mejora marginal en la Vegetación Media (13.65%), mientras que la Vegetación Ligera continúa experimentando un incremento hasta alcanzar el 67.94%. No obstante, la desaparición completa de las categorías de Vegetación Medio Alta y Vegetación Alta indica una modificación significativa en la estructura del Ecosistema.

**Figura 17**

*Comparación LST 1986 - 2003 – 2024.*



Fuente: Autores.

**Tabla 9**

*Áreas de clasificación de temperaturas para los años 1986, 2003, 2024, la clasificación de temperatura se realiza según Segura y Bejarano, 2019.*

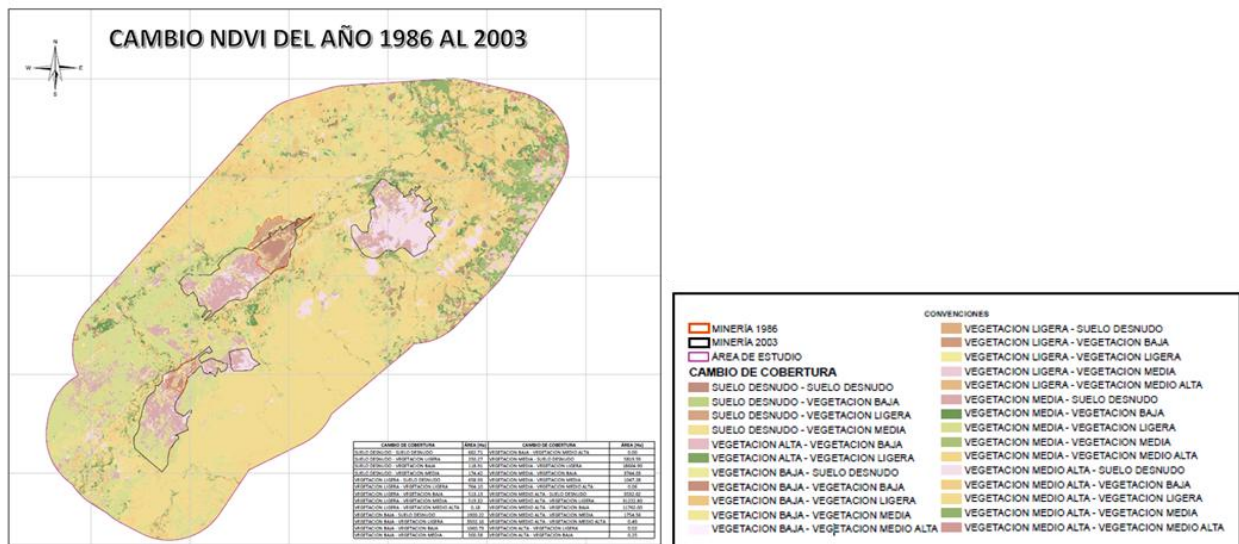
COMPARACIÓN	AÑO						RANGOS	
	1986		2003		2024			
Temperatura	AREA (Ha)	%	AREA (Ha)	%	AREA (Ha)	%		
Baja	3047,341	3,45%	705,1787	0,80%	189,616	0,21%	1	<20
Media - Baja	59909,04	67,92%	12463,47	14,13%	10759,88	12,20%	2	25-30
Media	24801,09	28,12%	64033,45	72,60%	61971,09	70,26%	3	30-35
Media - Alta	448,9322	0,51%	10989,18	12,46%	14838,74	16,82%	4	35-40
Alta	0	0,00%	12,06482	0,01%	447,7899	0,51%	5	>40

Fuente: Autores.

El análisis comparativo de la temperatura superficial durante los años 1986 y 2003 hasta 2024, ilustrado en la Figura 17 evidenció un incremento significativo en las categorías de temperatura más altas y una disminución en las categorías de temperatura más bajas previamente observadas. En 1986, la categoría de temperatura Media-Baja predominaba, abarcando el 67,92%

del área examinada, seguida por la categoría Media, que constituía el 28,12%, tal como se ilustra en la Tabla 9. En el año 2003, se observó una modificación notable en las temperaturas medias-bajas, con una disminución del 14.13%, mientras que las temperaturas medias experimentaron un incremento del 72.60%. Además, se documentaron temperaturas aún más elevadas: la categoría de medias-altas experimentó un incremento del 12.46%, y se comenzó a evidenciar la categoría de altas, aunque en porcentajes mínimos. En el año 2024, se observa una tendencia ascendente en las categorías más elevadas de temperaturas: la categoría Media-Alta registra un incremento del 16.82%, mientras que la categoría Alta registra un incremento del 0.51%. En contraste, la temperatura en la categoría Baja casi se extingue al pasar del 3.45 % en 1986 al 0.21% en 2024.

**Figura 18**  
*Cambio NDVI 1986-2003.*



Fuente: Autores.

**Figura 19**

*Cambio en las zonas mineras 1986-2003.*



Fuente: Autores.

**Tabla 10**

*Cambio NDVI Área total 1986-2003.*

<b>Cambio</b>	<b>Cambio NDVI Total 1986-2003</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>	<b>Grado De Cambio</b>
SI	Vegetación Medio Alta - Vegetación Ligera	31222,8	35,41%	-3
SI	Vegetación Media - Vegetación Ligera	18664,9	21,17%	-2
SI	Vegetación Medio Alta - Vegetación Baja	11762	13,34%	-2
SI	Vegetación Media - Suelo Desnudo	5819,59	6,60%	-3
SI	Vegetación Media - Vegetación Baja	3744,03	4,25%	-1
SI	Vegetación Medio Alta - Suelo Desnudo	3532,62	4,01%	-4

<b>Cambio</b>	<b>Cambio NDVI Total 1986-2003</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>	<b>Grado De Cambio</b>
SI	Vegetación Baja - Vegetación Ligera	3502,16	3,97%	-1
SI	Vegetación Baja - Suelo Desnudo	1900,22	2,16%	-2
SI	Vegetación Medio Alta - Vegetación	1754,56	1,99%	-1
Media				
NO	Vegetación Baja - Vegetación Baja	1060,73	1,20%	0
NO	Vegetación Media - Vegetación Media	1047,28	1,19%	0
NO	Vegetación Ligera - Vegetación Ligera	764,095	0,87%	0
NO	Suelo Desnudo - Suelo Desnudo	662,705	0,75%	0
SI	Vegetación Ligera - Suelo Desnudo	658,927	0,75%	-1
SI	Vegetación Ligera - Vegetación Media	519,322	0,59%	2
SI	Vegetación Ligera - Vegetación Baja	513,127	0,58%	1
SI	Vegetación Baja - Vegetación Media	500,576	0,57%	1
SI	Suelo Desnudo - Vegetación Ligera	250,273	0,28%	1
SI	Suelo Desnudo - Vegetación Media	174,424	0,20%	3
SI	Suelo Desnudo - Vegetación Baja	118,906	0,13%	2
NO	Vegetación Medio Alta - Vegetación	0,491901	0,00%	0
Medio Alta				
SI	Vegetación Alta - Vegetación Baja	0,253987	0,00%	-3
SI	Vegetación Ligera - Vegetación Medio	0,184508	0,00%	3
Alta				

<b>Cambio</b>	<b>Cambio NDVI Total 1986-2003</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>	<b>Grado De Cambio</b>
SI	Vegetación Media - Vegetación Medio Alta	0,061378	0,00%	1
SI	Vegetación Alta - Vegetación Ligera	0,01786	0,00%	-4
SI	Vegetación Baja - Vegetación Medio Alta	0,000243	0,00%	2

Fuente: Autores.

**Tabla 11**

*Cambio NDVI Área de estudio 1986-2003.*

<b>Cambio</b>	<b>Cambio NDVI Minas 1986-2003</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>	<b>Grado</b>
SI	Vegetación Media - Suelo Desnudo	3362,33	38,22%	-3
SI	Vegetación Medio Alta - Suelo Desnudo	1935,44	22,00%	-4
SI	Vegetación Media - Vegetación Ligera	854,549	9,71%	-2
SI	Vegetación Baja - Suelo Desnudo	822,642	9,35%	-2
NO	Suelo Desnudo - Suelo Desnudo	640,345	7,28%	0
SI	Vegetación Ligera - Suelo Desnudo	443,096	5,04%	-1
SI	Vegetación Medio Alta - Vegetación Ligera	263,49	3,00%	-3
SI	Suelo Desnudo - Vegetación Ligera	180,527	2,05%	1

---

SI	Vegetación Baja - Vegetación Ligera	173,185	1,97%	-1
NO	Vegetación Ligera - Vegetación Ligera	93,8007	1,07%	0
SI	Vegetación Medio Alta - Vegetación Baja	10,3808	0,12%	-2
SI	Vegetación Media - Vegetación Baja	10,2013	0,12%	-1
NO	Vegetación Baja - Vegetación Baja	4,34578	0,05%	0
SI	Vegetación Ligera - Vegetación Baja	2,08862	0,02%	1
SI	Suelo Desnudo - Vegetación Baja	1,03789	0,01%	2
SI	Vegetación Medio Alta - Vegetación Media	0,056915	0,00%	-1

---

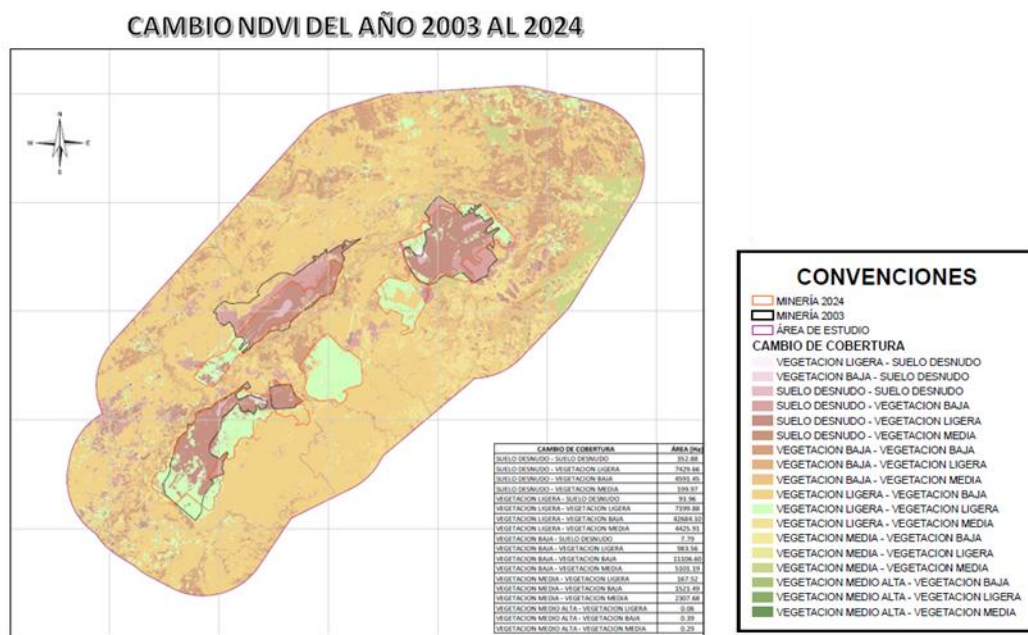
Fuente: Autores.

La evaluación de los datos obtenidos de las dos tablas, que ilustran la variación en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) entre 1986 y 2003, evidencia una tendencia evidente hacia la degradación de la cobertura vegetal, tanto en la superficie total como en las regiones mineras. Los cambios más notables comprenden la transición de vegetación de alta densidad a vegetación de baja densidad (-3) en un 35,41% de la superficie, así como la transición de vegetación de alta densidad a suelo desnudo (-3) que impacta el 6,60% de la superficie. Además, se evidencia la transición de vegetación de alto grado a vegetación baja (-2) en el 13,34% del área examinada. En la Tabla 10, que muestra la superficie total, la mayoría de las modificaciones detectadas se relacionan con el paso de la vegetación más compacta hacia coberturas más suaves o incluso terreno desnudo. Adicionalmente, otras transiciones de vegetación de calidad media a baja o a terreno desnudo, con grados de cambio desfavorables, muestran una disminución general de la calidad y volumen de la vegetación en la zona.

En la Tabla 11, que muestra las alteraciones sucedidas en las zonas mineras, muestra un patrón similar, aunque con una mayor incidencia de cambios hacia el terreno desnudo. La transformación más destacada es el paso de vegetación media a suelo desnudo (-3), que representa el 38,22% de la superficie, seguida por el paso de vegetación medio-alta a suelo desnudo (-4), que abarca el 22,00% de la superficie. Aunque se observan algunos incrementos en el Índice de Variación de la Vegetación (NDVI), como la transición de terreno desnudo a vegetación leve (+1), estos son menores en comparación con los cambios negativos, lo que sugiere que las zonas mineras siguen mostrando un notable deterioro vegetal. El nivel de alteración adversa de dichas áreas es más marcado que en el área general.

**Figura 20**

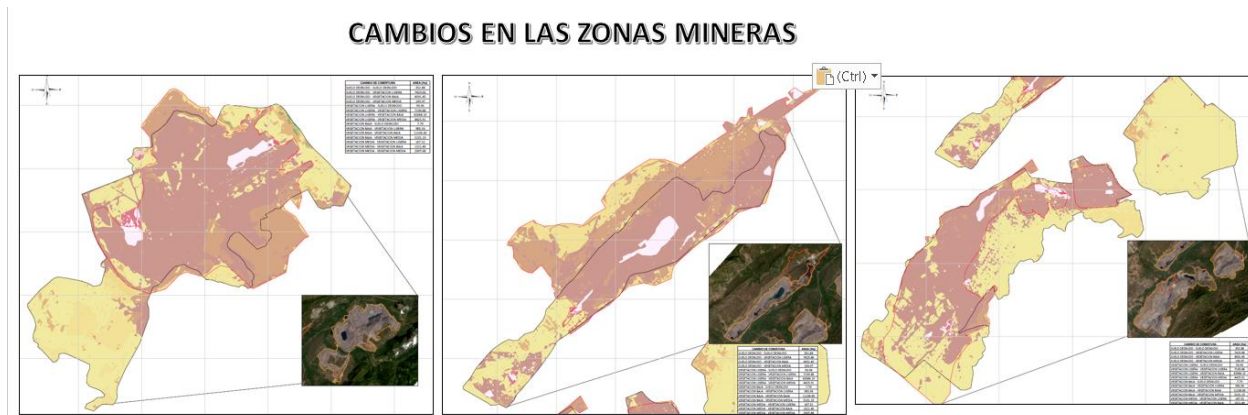
*Cambio NDVI 2003 – 2024.*



Fuente: Autores.

**Figura 21**

*Cambio en las zonas mineras 2003 – 2024.*



Fuente: Autores.

**Tabla 12**

*Cambio NDVI Área de estudio 2003-2024.*

<b>Cambio</b>	<b>Cambio NDVI Total 2003-2024</b>	<b>Área</b>	<b>%</b>	<b>Grado Cambio</b>
SI	Vegetación Ligera - Vegetación Baja	42684,1	48,41%	1
NO	Vegetación Baja - Vegetación Baja	11106,6	12,60%	0
SI	Suelo Desnudo - Vegetación Ligera	7429,66	8,43%	1
NO	Vegetación Ligera - Vegetación Ligera	7199,88	8,17%	0
SI	Vegetación Baja - Vegetación Media	5101,19	5,79%	1

<b>Cambio</b>	<b>Cambio NDVI Total 2003-2024</b>	<b>Área</b>	<b>%</b>	<b>Grado Cambio</b>
SI	Suelo Desnudo - Vegetación Baja	4591,45	5,21%	2
SI	Vegetación Ligera - Vegetación Media	4425,91	5,02%	2
NO	Vegetación Media - Vegetación Media	2307,68	2,62%	0
SI	Vegetación Media - Vegetación Baja	1521,49	1,73%	-1
SI	Vegetación Baja - Vegetación Ligera	983,558	1,12%	-1
NO	Suelo Desnudo - Suelo Desnudo	352,88	0,40%	0
SI	Suelo Desnudo - Vegetación Media	199,972	0,23%	3
SI	Vegetación Media - Vegetación Ligera	167,52	0,19%	-2
SI	Vegetación Ligera - Suelo Desnudo	93,9555	0,11%	-1
SI	Vegetación Baja - Suelo Desnudo	7,7873	0,01%	-2
SI	Vegetación Medio Alta - Vegetación Baja	0,38944	0,00%	-2
SI	Vegetación Medio Alta - Vegetación Media	0,2894	0,00%	-1
SI	Vegetación Medio Alta - Vegetación Ligera	0,05919	0,00%	-3

Fuente: Autores.

**Tabla 13***Cambio NDVI Área minas 2003-2024.*

<b>Cambio</b>	<b>Antes - Luego Minas 2003-2024</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>	<b>Grado</b>
SI	Suelo Desnudo - Vegetación Ligera	5907,17	43,00%	1
NO	Vegetación Ligera - Vegetación Ligera	4542,17	33,06%	0
SI	Suelo Desnudo - Vegetación Baja	1545,57	11,25%	2
SI	Vegetación Ligera - Vegetación Baja	1000,26	7,28%	1
NO	Suelo Desnudo - Suelo Desnudo	344,666	2,51%	0
SI	Vegetación Baja - Vegetación Ligera	218,635	1,59%	-1
SI	Vegetación Ligera - Suelo Desnudo	82,0658	0,60%	-1
NO	Vegetación Baja - Vegetación Baja	42,7587	0,31%	0
SI	Vegetación Baja - Vegetación Media	21,9493	0,16%	1
SI	Suelo Desnudo - Vegetación Media	9,30561	0,07%	3
SI	Vegetación Media - Vegetación Ligera	8,80571	0,06%	-2
SI	Vegetación Ligera - Vegetación Media	7,55129	0,05%	2
SI	Vegetación Baja - Suelo Desnudo	4,50444	0,03%	-2
SI	Vegetación Media - Vegetación Baja	2,72967	0,02%	-1
NO	Vegetación Media - Vegetación Media	0,00318	0,00%	0

Fuente: Autores.

Los resultados señalan que las alteraciones en la cobertura vegetal se encuentran primordialmente asociadas con la transición de la vegetación ligera hacia la vegetación baja, lo que

constituye el 48,41% del área afectada y un grado de cambio de +1, lo que sugiere un incremento pequeño en el índice vegetal. Otras categorías que experimentan cambios favorables comprenden la transformación de suelos desnudos a vegetación ligera (+1) y de vegetación baja a vegetación media (+1), las cuales, en conjunto, representan el 14,21% del área afectada.

No obstante, existen categorías en las cuales se ha registrado una reducción de la vegetación, tales como la transición de vegetación media a vegetación baja (-1) y de vegetación ligera a suelo desnudo (-1). No obstante, estas modificaciones adversas constituyen un porcentaje inferior en el total de las áreas alteradas. Las zonas con valores negativos más pronunciados son las que se extienden desde la vegetación medio alta hasta la vegetación ligera (-3) y la vegetación baja hasta el suelo desnudo (-2), aunque constituyen un porcentaje marginal del área total (menos del 1%).

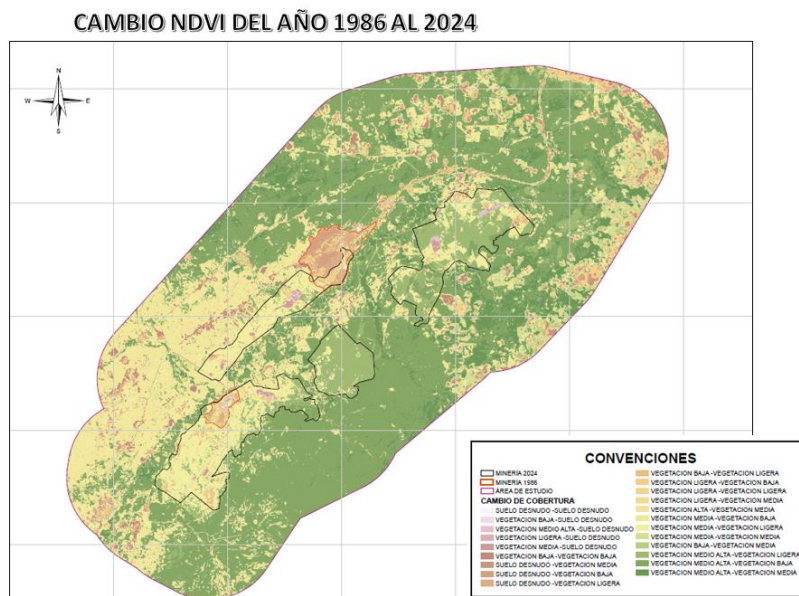
En la Tabla 12, muestra a las zonas impactadas por la actividad minera, las transformaciones del NDVI presentan patrones Parecidos, con un 43% del área transitando de suelo desnudo a vegetación ligera (+1). Esta modificación representa una restauración aproximada de la vegetación en las regiones mineras, aunque el grado de transformación en dichas zonas continúa siendo relativamente bajo. Asimismo, se evidencian cambios hacia la vegetación baja, como la transición de suelo desnudo a vegetación baja (+2), que constituye un 11,25% del área.

La revisión de las clases que presentan una pérdida de vegetación en la **Tabla 13** revela una reducción en la cobertura vegetal, tal como se observa en la transición de vegetación ligera a

suelo desnudo (-1), que impacta el 0,60% del área. En términos generales, las zonas mineras presentan una Inclinación hacia la regeneración vegetal; Sin embargo, las alteraciones adversas continúan siendo más reducidas en comparación con el área total.

**Figura 22**

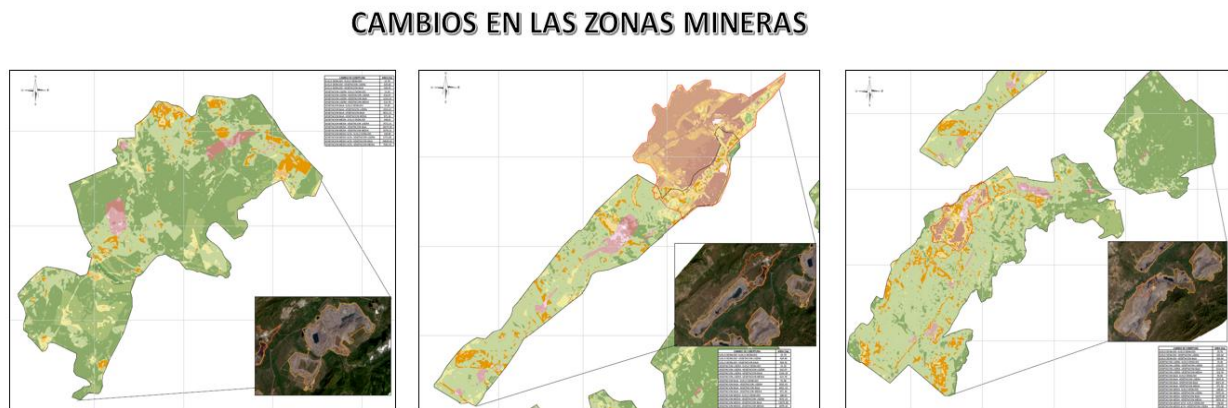
*Cambio NDVI 1986 – 2024.*



Fuente: Autores.

**Figura 23**

*Cambio en las zonas mineras 1986 – 2024.*



Fuente: Autores.

**Tabla 14**

*Cambio NDVI Área de estudio 1986-2024.*

<b>Cambio</b>	<b>Cambio NDVI Total 1986-2024</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>%</b>	<b>Grado Cambio</b>
SI	Vegetación Medio Alta -Vegetación Baja	34829,4	39,50%	-2
SI	Vegetación Media -Vegetación Baja	19275,9	21,86%	-1
SI	Vegetación Medio Alta -Vegetación Media	7581,59	8,60%	-1
SI	Vegetación Media -Vegetación Ligera	7072,33	8,02%	-2
SI	Vegetación Medio Alta -Vegetación Ligera	5753,88	6,53%	-3

<b>Cambio</b>	<b>Cambio NDVI Total 1986-2024</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>%</b>	<b>Grado Cambio</b>
NO	Vegetación Baja -Vegetación Baja	4021,33	4,56%	0
NO	Vegetación Media -Vegetación Media	2679,1	3,04%	0
SI	Vegetación Baja -Vegetación Ligera	1915,41	2,17%	-1
SI	Vegetación Ligera -Vegetación Baja	1214,24	1,38%	1
SI	Vegetación Baja -Vegetación Media	971,362	1,10%	1
SI	Vegetación Ligera -Vegetación Media	615,777	0,70%	2
NO	Vegetación Ligera -Vegetación Ligera	610,072	0,69%	0
SI	Suelo Desnudo -Vegetación Baja	564,555	0,64%	2
SI	Suelo Desnudo -Vegetación Ligera	429,475	0,49%	1
SI	Vegetación Media -Suelo Desnudo	248,629	0,28%	-3
SI	Suelo Desnudo -Vegetación Media	186,658	0,21%	3
SI	Vegetación Medio Alta -Suelo Desnudo	108,89	0,12%	-4
SI	Vegetación Baja -Suelo Desnudo	55,9566	0,06%	-2
NO	Suelo Desnudo -Suelo Desnudo	25,7899	0,03%	0
SI	Vegetación Ligera -Suelo Desnudo	15,3551	0,02%	-1
SI	Vegetación Alta -Vegetación Media	0,271847	0,00%	-2

Fuente: Autores.

**Tabla 15**

*Cambio NDVI Total 1986-2024.*

<b>Cambio</b>	<b>Cambio NDVI Minas 1986-2024</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>	<b>Grado</b>
SI	Vegetación Media -Vegetación Ligera	4730,73	38,22%	-2
SI	Vegetación Medio Alta -Vegetación Ligera	3782,33	30,56%	-3
SI	Vegetación Baja -Vegetación Ligera	918,371	7,42%	-1
SI	Vegetación Medio Alta -Vegetación Baja	684,068	5,53%	-2
SI	Suelo Desnudo -Vegetación Baja	400,361	3,23%	2
SI	Suelo Desnudo -Vegetación Ligera	393,35	3,18%	1
SI	Vegetación Media -Vegetación Baja	383,836	3,10%	-1
NO	Vegetación Ligera -Vegetación Ligera	311,711	2,52%	0
SI	Vegetación Media -Suelo Desnudo	240,861	1,95%	-3
SI	Vegetación Ligera -Vegetación Baja	215,197	1,74%	1
NO	Vegetación Baja -Vegetación Baja	109,039	0,88%	0
SI	Vegetación Medio Alta -Suelo Desnudo	98,3044	0,79%	-4
SI	Vegetación Baja -Suelo Desnudo	54,6908	0,44%	-2
SI	Vegetación Medio Alta -Vegetación Media	15,6784	0,13%	-1
NO	Suelo Desnudo -Suelo Desnudo	15,04	0,12%	0

Cambio	Cambio NDVI Minas 1986-2024	Área (Ha)	%	Grado
SI	Vegetación Ligera -Suelo Desnudo	14,8649	0,12%	-1
NO	Vegetación Media -Vegetación Media	7,5024	0,06%	0
SI	Vegetación Baja -Vegetación Media	1,52833	0,01%	1
SI	Vegetación Ligera -Vegetación Media	0,344657	0,00%	2

Fuente: Autores.

En la **Tabla 14**, que muestra el área total de terreno examinado, se observan variaciones en la cobertura vegetal entre los años 1986 y 2024 que indican una tendencia general a la reducción de vegetación en el área estudiada. Los mayores cambios negativos se evidencian en las transiciones de “Vegetación Medio Alta - Vegetación Baja” (-2) y “Vegetación Media - Vegetación Baja” (-1), las cuales representan aproximadamente un 39.50% y un 21.86%, respectivamente. Estos cambios indican una reducción considerable de la vegetación en zonas que van desde alta a baja densidad vegetal y en la transición de áreas de vegetación media a baja densidad vegetal. También es relevante señalar que áreas más pequeñas han experimentado disminuciones en categorías como “Vegetación Medio Alta - Vegetación Ligera” (- 3) y “Vegetación Media - Suelos Descubiertos” (- 3), aunque su impacto en términos porcentuales es más reducido.

En relación con las modificaciones positivas en el entorno natural, se evidencian aumentos en la cobertura vegetal en determinadas áreas. Las zonas que evidencian una transición hacia una mayor densidad de vegetación comprenden la transición de "Vegetación Ligera - Vegetación Baja"

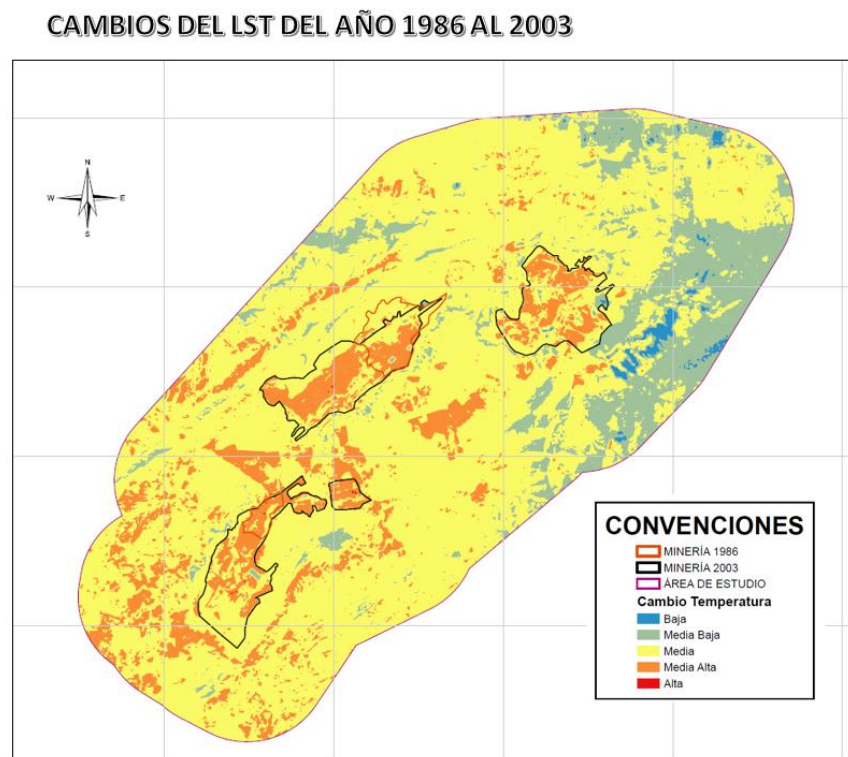
(+1), que engloba un 1.38% del territorio, y la transición hacia "Suelo desnudo - Vegetación baja" (+2), que abarca un 0.64% del espacio total. Estos cambios indican una recuperación parcial o un incremento en la vegetación; no obstante, en términos generales, persisten las modificaciones adversas.

Por otra parte, la **Tabla 15**, muestra tendencias similares, pero ligeramente distintas. Al igual que en la Tabla 13, las transiciones de "Vegetación Media - Vegetación Ligera" (-2) y "Vegetación Medio Alta - Vegetación Ligera" (-3) son las más significativas, representando el 38,22 % y el 30,56 % de los cambios en esta región. Estos cambios indican una notable disminución de vegetación en las zonas cercanas a las actividades mineras.

No obstante, en las regiones mineras también pueden observarse ciertos incrementos en el volumen de vegetación existente. El incremento en la categoría "Terreno sin cobertura vegetal - Vegetación escasa" (+2), que constituye un 3,23 % del área minera, indica una iniciativa de rehabilitación en áreas específicas. Además, se observan indicadores de mejora moderada en las categorías de "Terreno sin cobertura vegetal - Vegetación escasa" (+1) y "Vegetación escasa - Vegetación baja" (+1), aunque estos aumentos son más modestos si se contrastan con las pérdidas registradas.

**Figura 24**

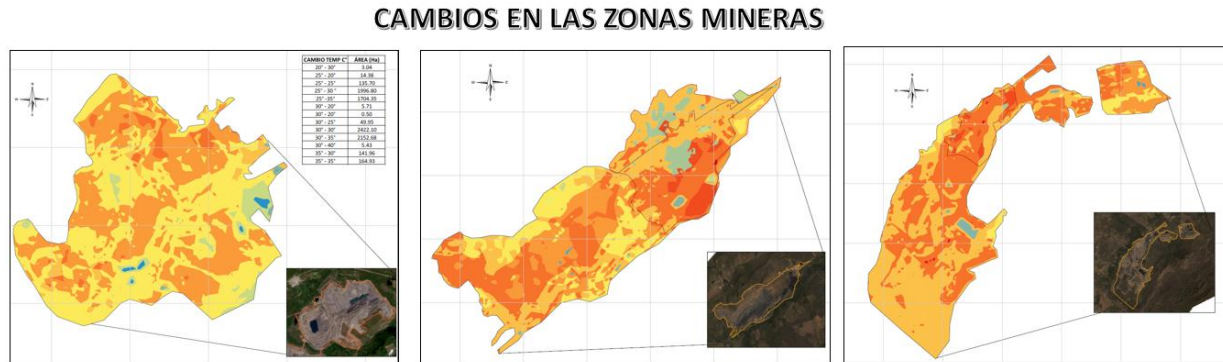
*Cambio LST 1986-2003.*



Fuente: Autores.

**Figura 25**

*Cambio en las zonas mineras 1986-2003.*



Fuente: Autores.

**Tabla 16**

*Cambio LST Área de estudio 1986-2003.*

<b>Cambio</b>	<b>Cambio De Temperatura</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>	<b>Cambiotemp</b>
SI	Media Baja a Media	44783,63	50,78%	1
NO	Media a Media	18105,66	20,53%	0
NO	Media Baja a Media Baja	10357,42	11,74%	0
SI	Media a Media Alta	6540,237	7,42%	1
SI	Media Baja a Media Alta	4199,501	4,76%	2
SI	Baja a Media Baja	1966,264	2,23%	1
SI	Baja a Media	924,9483	1,05%	2
SI	Media Baja a Baja	551,1799	0,63%	-1
NO	Media Alta a Media Alta	239,36	0,27%	0

<b>Cambio</b>	<b>Cambio De Temperatura</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>	<b>Cambiotemp</b>
SI	Media Alta a Media	209,5274	0,24%	-1
NO	Baja a Baja	144,5336	0,16%	0
SI	Media a Media Baja	134,7973	0,15%	-1
SI	Media a Baja	9,276886	0,01%	-2
SI	Baja a Media Alta	8,880105	0,01%	3
SI	Media a Alta	6,350509	0,01%	2
SI	Media Baja a Alta	5,714307	0,01%	3

Fuente: Autores.

**Tabla 17**

*Cambio LST Total 1986-2003.*

<b>Cambio</b>	<b>Cambio De Temperatura</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>	<b>Cambio Temperatura</b>	<b>Cambio Temp</b>
NO	Media a Media	2422,09661	27,53%	0	30° - 30°
SI	Media a Media Alta	2152,67793	24,47%	1	30° - 35°
SI	Media Baja a Media	1996,79778	22,70%	1	25° - 30 °
SI	Media Baja a Media Alta	1704,34574	19,37%	2	25° -35°
NO	Media Alta a Media Alta	164,931204	1,87%	0	35° - 35°

Cambio	Cambio De Temperatura	Área (Ha)	%	Cambio Temperatura	Cambio Temp
SI	Media Alta a Media	141,958387	1,61%	-1	35° - 30°
NO	Media Baja a Media Baja	135,697498	1,54%	0	25° - 25°
SI	Media a Media Baja	49,946089	0,57%	-1	30° - 25°
SI	Media Baja a Baja	14,384367	0,16%	-1	25° - 20°
SI	Media Baja a Alta	5,714307	0,06%	3	30° - 20°
SI	Media a Alta	5,42597	0,06%	2	30° - 40°
SI	Baja a Media	3,038176	0,03%	2	20° - 30°
SI	Media a Baja	0,499913	0,01%	-2	30° - 20°

Fuente: Autores.

En la **Tabla 16** correspondiente al área total se aprecia una clara tendencia al aumento de la temperatura de la superficie en la mayoría de las categorías de cambio observadas. La transición de “Media Baja a Media Alta” muestra el cambio más destacado en términos de área representando el 50,78 % del total analizado y un incremento de temperatura de + 1 grado. Asimismo, el cambio “De Media Baja a Media-Alta” también refleja una alteración importante abarcando el 4,76 % del área analizada y un incremento de (+2) grados. Las transiciones hacia temperaturas más elevadas como “De Baja a Media”( +2) y “De Media Baja a Alta”( +3), aunque

---

menos comunes en términos de extensión geográfica, también muestran un incremento significativo de la temperatura, lo que indica un aumento del calentamiento superficial en dichas áreas.

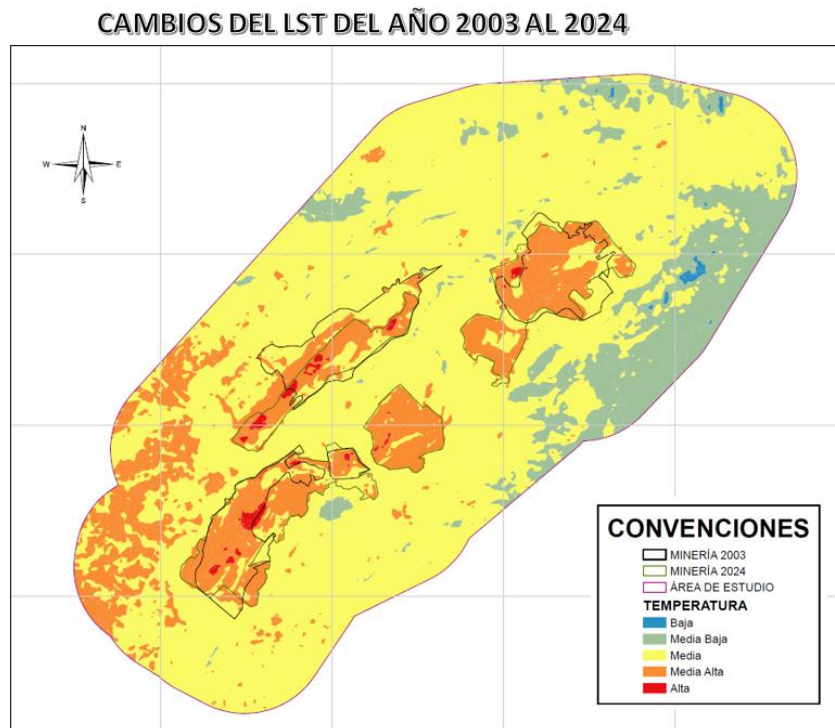
En lo que respecta las disminuciones de temperatura, se han identificado algunos sectores donde se ha notado una ligera reducción en la temperatura superficial, como en el paso de “Media Baja a Baja” (-1), y de “Media a Baja (-2), aunque estos sectores representan una proporción mucho menor del total (0,63 % y 01%, respectivamente). A partir de estas observaciones se puede deducir que el aumento de la temperatura es un fenómeno predominante en la mayoría de las áreas analizadas.

Por otro lado, en la **Tabla 17** se detectan incrementos en la temperatura superficial en las zonas afectadas por la minería; estos incrementos siguen las mismas tendencias hacia temperaturas más altas que se observan en la Tabla 16. Los cambios de “Media a Media Alta”(24.47%) y “Media Baja a Media”(22.70%) muestran un aumento moderado de temperatura (+1), lo que indica un patrón similar al presente en la tabla global. Otras zonas como “Media Baja a Media Alta”(+2) Las categorías “De Baja a Alta (+ 3)” y “También registran aumentos de temperatura”, aunque en menor proporción (19.37 % y 0.06 % respectivamente).

Además de eso hay cambios en la temperatura que disminuyen levemente como “Media Alta a Media” (-1) y “Media a Baja” (-2), aunque estas variaciones son insignificantes en comparación con los incrementos.

**Figura 26**

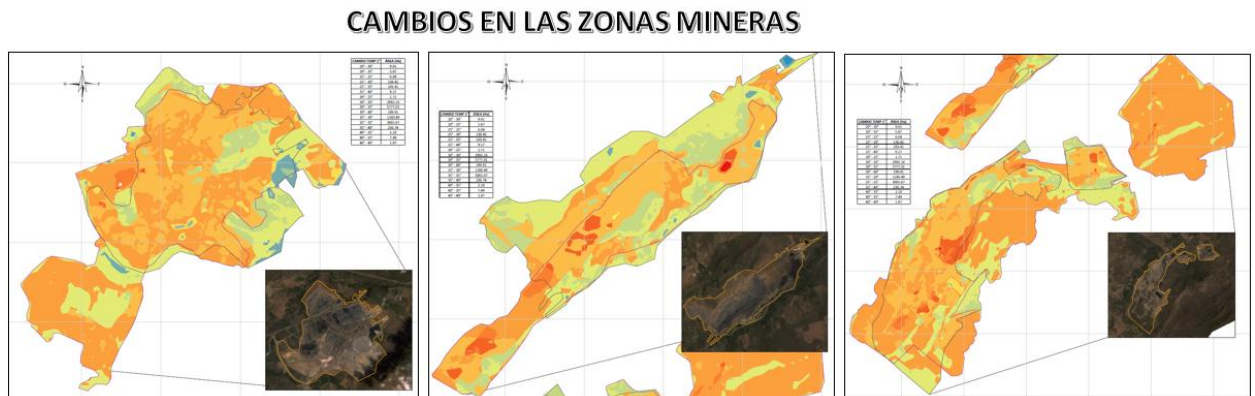
*Cambio LST 2003-2024.*



Fuente: Autores.

**Figura 27**

*Cambio en las zonas mineras 2003-2024.*



Fuente: Autores.

**Tabla 18**

*Cambio LST Área de estudio 2003-2024.*

<b>Cambio</b>	<b>Cambio De</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>	<b>Cambio</b>
	<b>Temperatura</b>			<b>Temp</b>
SI	Media Baja a Media	45515,8	51,61%	1
NO	Media a Media	15354,17	17,41%	0
SI	Media a Media Alta	9011,709	10,22%	1
NO	Media Baja a Media Baja	8514,991	9,65%	0
SI	Media Baja a Media Alta	5617,994	6,37%	2
SI	Baja a Media Baja	2173,841	2,46%	1
SI	Baja a Media	851,5414	0,97%	2
SI	Media a Alta	361,3471	0,41%	2

<b>Cambio</b>	<b>Cambio De</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>	<b>Cambio</b>
	<b>Temperatura</b>			<b>Temp</b>
SI	Media Alta a Media	241,739	0,27%	-1
NO	Media Alta a Media Alta	207,0785	0,23%	0
SI	Media Baja a Baja	167,4014	0,19%	-1
SI	Media Baja a Alta	86,3293	0,10%	3
SI	Media a Media Baja	66,93501	0,08%	-1
NO	Baja a Baja	20,14047	0,02%	0
SI	Media a Baja	2,045834	0,00%	-2
SI	Media Alta a Alta	0,113493	0,00%	1
SI	Baja a Media Alta	0,046585	0,00%	3

Fuente: Autores.

**Tabla 19**

*Cambio LST Total 2003-2024.*

<b>Cambio</b>	<b>Cambio De</b>	<b>Cambio</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>	<b>Cambio</b>
	<b>Temperatura</b>	<b>Temp</b>			<b>Temp</b>
SI	Media a Media Alta	1	5777,013514	42,05%	30° - 35°
NO	Media Alta a Media Alta	0	3065,668392	22,32%	35° - 35°
NO	Media a Media	0	2992,159876	21,78%	30° - 30°

<b>Cambio</b>	<b>Cambio De</b>	<b>Cambio</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>	<b>Cambio</b>
	<b>Temperatura</b>	<b>Temp</b>			<b>Temp</b>
SI	Media Alta a Media	-1	1180,488404	8,59%	35° - 30°
SI	Media Alta a Alta	1	236,74014	1,72%	35° - 40°
SI	Media a Alta	2	199,910629	1,46%	30° - 40°
SI	Media Baja a Media	1	138,422814	1,01%	25° - 30°
SI	Media Baja a Media	2	103,407896	0,75%	25° - 35°
	Alta				
SI	Media Baja a Alta	3	9,172048	0,07%	25° - 40°
SI	Baja a Media	2	9,014681	0,07%	20° - 30°
SI	Alta a Media Alta	-1	7,494768	0,05%	40° - 35°
NO	Media Baja a Media	0	6,03697	0,04%	25° - 25°
	Baja				
SI	Baja a Media Alta	3	5,869599	0,04%	20° - 35°
SI	Alta a Media	-2	2,181118	0,02%	40° - 35°
NO	Alta a Alta	0	1,967093	0,01%	40° - 40°
SI	Media a Media Baja	-1	1,712816	0,01%	30° - 25°

Fuente: Autores.

En la **Tabla 18** que corresponde al área total se puede observar una clara tendencia hacia el aumento de la temperatura superficial en la mayoría de las áreas analizadas. La transición más relevante incluye la transición de “Media Baja a Media”, abarcando el 51 ,61 % del área total y

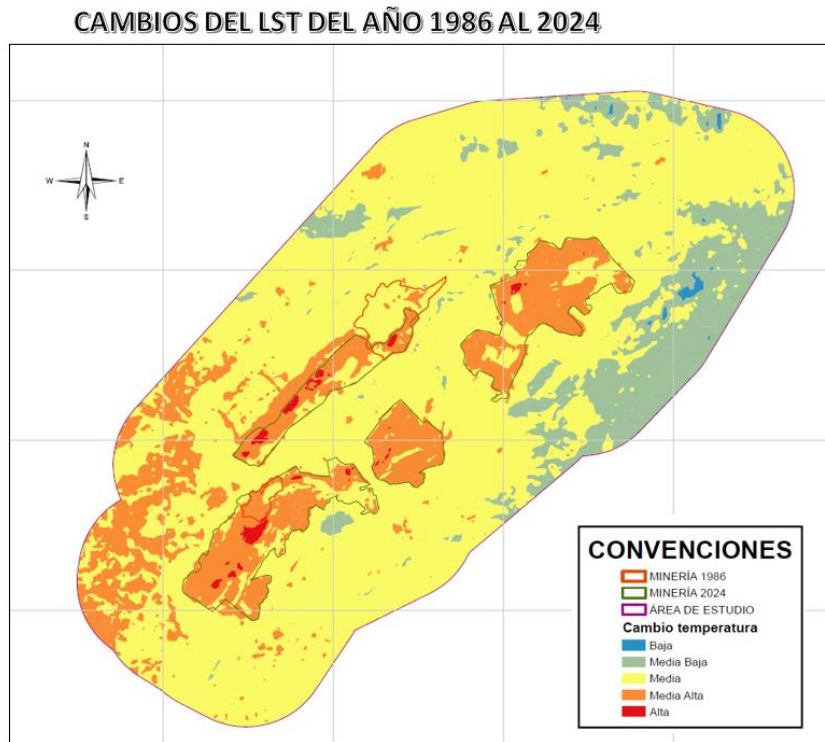
presentando un incremento de temperatura de (+1) grado superior; seguida por la transición “Media a Media Alta”(10 ,22 %) con un aumento de (+1) grado. Se pueden identificar tendencias similares en otras áreas también. Además se observan otras transiciones como “Media Baja a Media Alta" (+2) y "Baja a Media" (+2), que pese a representar una proporción menor en cuanto al área ( 6 ,37 % y 0 ,97 % respectivamente), señalan un cambio significativo en las temperaturas superficiales.

Además, se registran algunos cambios hacia una disminución de la temperatura aunque de forma algo más discreta. Por ejemplo “De Media Alta a Media", y “De Media Baja a Baja", muestran reducciones de -1 y -2 grados respectivamente; sin embargo, estas zonas constituyen una parte pequeña del área total analizada (0.27 % y 0.19 %).

Por otro lado, en la Tabla 19 se puede notar que los sectores mineros han experimentado un aumento general en la temperatura superficial. Las transiciones de “Media a Media Alta “ (+1) y “Media Alta a Media “ (+1) abarcan el 42 ,05 % y el 8 ,59 % del área respectivamente. A medida que las áreas más cálidas son menos comunes como en el caso de “Media Baja a Media Alta “ ( + 2 ). En la tabla se aprecian aumentos significativos en las categorías “Media Baja a Alta” (+ 3), aunque en áreas más pequeñas (un 0.75 % y un 0.007 % respectivamente). Asimismo, se encuentran reducciones de la temperatura como en las transiciones de “Media Alta a Media” (-1) y “Alta a Media” (-2), aunque estas representaciones son mínimas en términos de superficie (un 8,59 % y un 0,02 %).

**Figura 28**

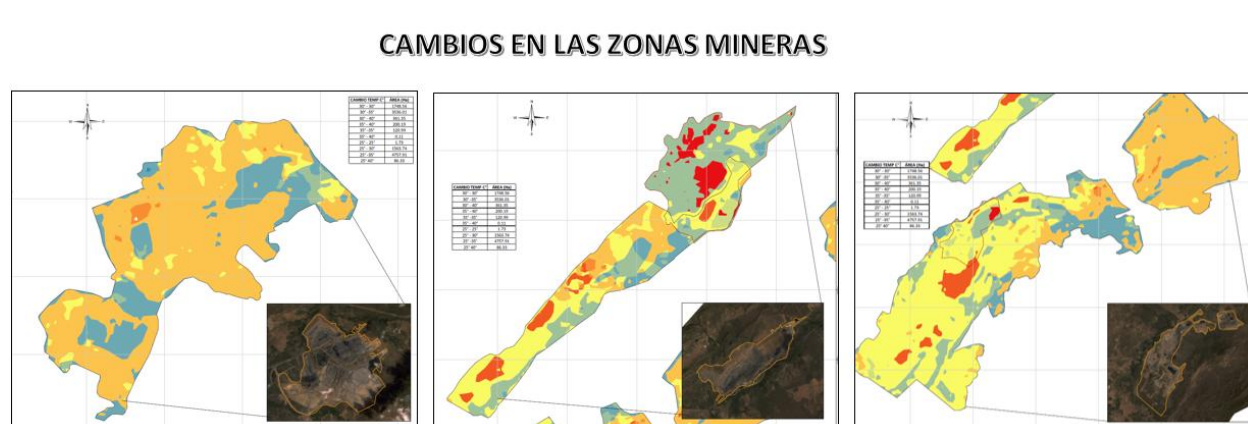
*Cambio LST 1986-2024.*



Fuente: Autores.

**Figura 29**

*Cambio en las zonas mineras 1986 – 2024.*



Fuente: Autores.

**Tabla 20**

*Cambio LST Área de estudio 1986 – 2024.*

<b>Cambio</b>	<b>Cambio De</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>	<b>Cambio</b>
	<b>Temperatura</b>			<b>Temp</b>
NO	Media a Media	51381,46	58,26%	0
SI	Media a Media Alta	9712,485	11,01%	1
NO	Media Baja a Media Baja	7627,29	8,65%	0
SI	Media Alta a Media	5725,344	6,49%	-1
NO	Media Alta a Media Alta	4998,255	5,67%	0
SI	Media Baja a Media	4641,716	5,26%	1
SI	Media a Media Baja	2658,969	3,02%	-1

---

<b>Cambio</b>	<b>Cambio De</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>	<b>Cambio</b>
	<b>Temperatura</b>			<b>Temp</b>
SI	Baja a Media Baja	439,6251	0,50%	1
SI	Media Alta a Alta	236,7401	0,27%	1
SI	Baja a Media	208,6399	0,24%	2
SI	Media a Alta	199,9106	0,23%	2
SI	Media Baja a Media Alta	112,4059	0,13%	2
SI	Media a Baja	70,29435	0,08%	-2
SI	Media Baja a Baja	68,40754	0,08%	-1
NO	Baja a Baja	50,85841	0,06%	0
SI	Media Alta a Media Baja	27,67281	0,03%	-2
SI	Media Baja a Alta	9,172049	0,01%	3
SI	Alta a Media Alta	7,494768	0,01%	-1
SI	Baja a Media Alta	5,869599	0,01%	3
SI	Alta a Media	2,602954	0,00%	-2
NO	Alta a Alta	1,967093	0,00%	0

---

Fuente: Autores.

**Tabla 21**

*Cambio LST Total 1986 – 2024.*

<b>Cambio</b>	<b>Cambio De Temperatura</b>	<b>Area (Ha)</b>	<b>%</b>	<b>Cambio Temp</b>	<b>Temp</b>
SI	Media Baja a Media Alta	4757,91114	38,44%	2	25° -35°
SI	Media a Media Alta	3536,01145	28,57%	1	30° -35°
NO	Media a Media	1748,55923	14,13%	0	30° - 30°
SI	Media Baja a Media	1563,74228	12,63%	1	25° - 30°
SI	Media a Alta	361,347116	2,92%	2	30° - 40°
SI	Media Alta a Media	200,189295	1,62%	-1	35° - 40°
NO	Media Alta a Media Alta	120,993533	0,98%	0	35° -35°
SI	Media Baja a Alta	86,329301	0,70%	3	25° 40°
NO	Media Baja a Media Baja	1,730505	0,01%	0	25° - 25°
SI	Media Alta a Alta	0,113493	0,00%	1	35° - 40°

Fuente: Autores.

En la **Tabla 20** se puede observar que la mayoría del área total no ha experimentado cambios significativos en la temperatura de superficie. Alrededor del 58.26 % del área muestra un cambio de temperatura nulo ("Media a Media"), lo que indica estabilidad térmica en esa parte del territorio. No obstante, existen varias transiciones en las que la temperatura ha variado y mayormente ha aumentado. Las transiciones más notables son aquellas de “Media” hacia “Media Alta”, representando un 11.01 % del total del área. En cuanto a los datos de temperatura

---

registrados en el estudio, se observan incrementos leves en la categoría “Media Baja a Media”, representando un aumento del 5.26%. Además de estas áreas menos significativas de incrementos registradas en temperaturas como “Media a Alta”, “Baja a Media” y “Baja a Media Baja”. A pesar de estos aumentos más notables, la temperatura registrada en estas zonas representa una proporción menor del área total (0.23%, 0.24% y un 0.50%, respectivamente).

Por otra parte, se observan también descensos de temperatura en ciertas zonas de manera más restringida. Las zonas que presentan cambios negativos abarcan “Media Alta a Media” (-1) y “Media Baja a Baja” (-1), afectando una porción reducida del área total (con un 6.49% y un 0.08%, respectivamente), así como “Media a Baja” (-2), la cual también muestra un impacto limitado.

En la **Tabla 21** se puede notar una tendencia similar en la subida de la temperatura de superficie en los sectores mineros mencionados. Los cambios más destacados son “De Media Baja a Media Alta”, que representa el 38.44%, y “De Media a Media Alta”, que alcanza el 28.57%, lo que indica un incremento de +2 y +1 respectivamente en cada caso específico. Comparadas a otras transiciones como “De Media Baja a Alta”( 3), estas representan un porcentaje significativo del área minera. Las temperaturas que oscilan entre “Media a Alta”, aunque importantes en términos de temperatura, numéricamente representan un porcentaje menor del área (con 0.70 % y 2.92 % respectivamente). Además, existen zonas con temperaturas más bajas como “Media Alta a Media”, aunque su impacto se ve restringido (representando un total de 1.62 %).

## 8. Conclusiones

La vegetación ha experimentado un notable deterioro entre los años 1986 y 2024 en diversas zonas cercanas a la mina El Cerrejón debido a la pérdida de vegetación densa, caso similar a lo que ocurre con otros factores como el desarrollo urbano, la actividad agrícola y en general actividades que requieran descapote, las cuales también contribuyen con la reducción de la cobertura vegetal. Estos cambios tienen un impacto en el aumento de la temperatura en superficie terrestre y pueden ser causados por múltiples variables ambientales adicionales. A pesar de que ha habido una ligera mejora en la vegetación promedio en los últimos años, la reducción en la cobertura y por consiguiente en el NDVI indica una relación con la LST.

Hay una relación inversamente proporcional entre la disminución del índice de vegetación (NDVI) y el aumento de la LST. Se ha observado un aumento constante en la temperatura en la mayor parte del área de estudio; especialmente un incremento significativo en las temperaturas medias y altas que podrían estar relacionados al cambio climático y/o los cambios en la cobertura del suelo como sucede en áreas mineras. La disminución de las temperaturas más bajas refleja un desplazamiento hacia climas más cálidos que está vinculado al aumento de áreas donde se ha modificado el uso del suelo debido a actividades humanas.

La utilización de imágenes satelitales de los satélites Landsat 5, 7 y 8 en conjunto al uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) se componen como una herramienta efectiva para monitorear y evaluar las variaciones en la Temperatura Superficial Terrestres (LST) en el tiempo y espacio. Este método ha permitido la obtención de información precisa y detallada sobre las

diversas fluctuaciones de la LST, lo que facilita el análisis de los patrones térmicos vinculados a la actividad minera y su área de influencia.

El análisis de los datos mapeados muestra cómo la temperatura de la superficie terrestre ha experimentado cambios en respuesta al aumento de las actividades mineras a lo largo del tiempo. En 1986 antes del incremento en la actividad minera los valores de LST mostraban una tendencia uniformemente baja en general y constante en cuanto a temperatura superficial. Sin embargo, los mapas correspondientes a los años 2003 y 2024 muestran un incremento gradual en las temperaturas superficiales que coincide en gran medida con la pérdida de cobertura vegetal, que en algunos sectores del área de estudio coincide con el crecimiento de la minería.

La comparación visual de los mapas muestra de manera evidente un aumento en la temperatura superficial terrestre en las áreas afectadas directamente por la actividad minera y sus alrededores, lo cual sugiere cambios en las condiciones superficiales, cobertura y paisaje debido a la explotación minera; sin embargo, se produce un comportamiento similar con otras actividades humanas presentes en el área de estudio como lo es la densificación urbana o el cambio de uso del suelo con destinación agropecuaria.

La resolución temporal y espacial de las imágenes de Landsat junto a la capacidad de análisis geoespacial de los sistemas de información geográfica (SIG) dio como resultado una evaluación exhaustiva del impacto ambiental de las actividades mineras en El Cerrejón. Esta metodología respalda la toma de decisiones fundamentadas y ayuda en el desarrollo de estrategias más eficientes para mitigar el impacto ambiental.

El análisis multitemporal ha demostrado que las áreas mineras más activas en la región analizada registran temperaturas más altas en comparación a aquellas no alteradas por la minería que presentan buena cobertura vegetal, indicando una posible conexión entre la cantidad de vegetación y la temperatura superficial terrestre (LST). La deforestación y los cambios en la cobertura del suelo asociados a la actividad minera podrían estar contribuyendo al incremento de las temperaturas en esas áreas impactadas.

La dispersión de los valores de LST aumenta con el tiempo, tal como lo muestran los rangos Inter cuartil del Box Plot. En 2024, se identifican áreas con temperaturas más extremas, posiblemente debido a la combinación de factores como:

- Degradación de suelos y pérdida de vegetal
- Efectos del cambio climático.

Los datos muestran un aumento gradual en las temperaturas medias a lo largo del tiempo. En 1984 predominaban temperaturas más frescas (entre 20°C y 25°C), mientras que en 2003 y 2024 las temperaturas se desplazaron hacia valores más elevados (entre 25°C y 35°C). Este incremento podría estar relacionado a la expansión de actividades mineras a cielo abierto que implican la eliminación de la vegetación y la exposición del suelo aumentando así la absorción y liberación de calor en la superficie.

Entre los años 2003 y 2024 se pudo apreciar una leve recuperación en la vegetación en áreas específicas de vegetación escasa o baja; sin embargo, esta regeneración es limitada. Las zonas mineras también muestran cierta recuperación de la vegetación, pero mantienen una densidad menor debido a la naturaleza de las actividades realizadas y su continuo desarrollo.

El análisis de la relación inversa entre el NDVI y LST en los años 1986, 2003 y 2024, arroja que, a pesar de la tendencia, es baja. En 1986, la correlación es prácticamente inexistente, en 2003 se refuerza levemente y en 2024 alcanza el mayor valor registrado hasta la fecha. Estos valores indican que la cobertura vegetal y la temperatura superficial no necesariamente tienen una fuerte relación y sugieren que otros elementos, como la actividad humana, urbanización, cambio de uso de suelo y cambio climático influyen más en la variabilidad térmica. Por ende, no quiere decir que un NDVI más elevado en determinada área implica menores T y LST.

Finalmente, hay que recordar que el NDVI no es el único factor que influye en el LST y, por ende, no es afirmativo. Como lo demuestran los valores de correlación encontramos, los factores humanos también inciden en el LST como la actividad agrícola, el desplazamiento del terreno, el cambio del uso de suelos y la resolución tanto temporal como espacial de las imágenes satelitales. Para disminuir la incertidumbre y tener conclusiones precisas habría que involucrar otras variables, como el uso de suelos, las condiciones climáticas y la topografía.

## 9. Recomendaciones

Se recomienda que, para dar mayor amplitud al análisis de la variabilidad de la LST, se considere ampliar la gama de factores que influyen directa o indirectamente sobre el comportamiento de los valores de dicho factor, el cual puede llegar a fluctuar motivado por variables no consideradas en el presente estudio.

Para precisar el análisis del comportamiento de la LST es prudente ampliar el rango de tiempo objeto de estudio, así como aumentar la cantidad de imágenes satelitales para analizar, con el fin de facilitar la evidencia de patrones, periodicidad, u otras variables que se relacionen con la variable que se está analizando.

Utilizar capas de información más detallada que se relacionen con los proyectos ejecutados con La mina el Cerrejón para analizar cómo es el comportamiento en las áreas categorizadas como restituidas.

Incluir en la metodología de trabajo una fase de campo para la obtención de información primaria que permita contrastar de manera eficiente la información secundaria aportada por el análisis de las imágenes satelitales; en su defecto se podría acudir a instituciones como el IDEAM para obtener información de mayor precisión. En caso de no ser posible, mejorar la resolución espacial de las imágenes satelitales puede ayudar a obtener resultados más precisos.

Realizar un análisis que involucre de manera directa el componente socioeconómico con el objetivo de evidenciar como el cambio en los niveles de LST han impactado en el desarrollo y calidad de vida de las comunidades asentadas en el área de influencia.

Evaluar las iniciativas de restauración ecológica o rehabilitación del suelo en las áreas mineras afectadas. Esto podría incluir el seguimiento de cómo la reforestación o la restauración de la vegetación afecta el LST y el NDVI a lo largo del tiempo.

Replicar esta metodología en otras zonas mineras del país o del mundo para realizar estudios comparativos sobre el impacto de la minería en LST y NDVI.

Incluir dentro del análisis la evaluación de la variable LST, con el objetivo de evidenciar como el comportamiento de esta impacta en las condiciones de la biodiversidad y el microclima del área de influencia de proyectos mineros.

Usar nuevas tecnologías de los Sistemas de Información Geográfica, el Machine Learning u otras tecnologías con el fin de establecer modelos predictivos que permitan generar alertas tempranas para la toma de decisiones que prevengan cambios drásticos en la variable LST.

## 10. Referencias

*Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). Comunicaciones. (n.d.). PIS - Proyecto Mina el Cerrejón. Gov.co. Retrieved November 5, 2024, from [https://www.anla.gov.co/01\\_anla/proyectos/proyecto-de-interes-en-seguimiento-proyecto-mina-el-cerrejon](https://www.anla.gov.co/01_anla/proyectos/proyecto-de-interes-en-seguimiento-proyecto-mina-el-cerrejon)*

*Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2023). Comunicaciones proyectos de interés en seguimiento. Explotación de carbón bloque central del cerrejón zona norte. Mina el cerrejon (Áreas integradas). from <https://www.anla.gov.co/proyectos-de-interes-en-seguimiento/pis-explotacion-de-carbon-bloque-central-del-cerrejon-zona-norte-mina-el-cerrejon>.*

*Agencia Nacional de Minería ANM. (n.d.). Gov.co. Retrieved November 5, 2024, from <https://www.anm.gov.co/>*

Aguirre Forero , S. E. y Piraneque Gambasica , N. V. y Fernández , T. M. (2022). Suelo y cambio climático. Editorial Unimagdalena. <https://10.21676/9789587464993>

Aldana, K. (2022). Análisis Multitemporal De La Erosión Producida Por La Explotación Minera A Cielo Abierto En Soacha, Cundinamarca. Universidad Antonio Nariño.

Alonso, D. (2015). 6 opciones para descargar imágenes Landsat GRATIS. MappingGIS. <https://mappinggis.com/2015/05/como-descargar-imagenes-landsat/>

Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). <https://www.unspider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>

Bajjali, W., & Bajjali, W. (2018). Geodatabase. *ArcGIS for Environmental and Water Issues*, 103-116.

Benavides, M. Á. (2022-06-15). Análisis multitemporal del impacto de la explotación a cielo abierto en la mina “El Cerrejón” de los años 2000 y 2020 Recuperado de:

<http://hdl.handle.net/10654/43707>

Betancourt Herrera, P. A., & Campos Carrasco, C. (2022b). Análisis de la variación de Temperatura de la Superficie Terrestre (TLS) y del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el área de influencia indirecta del Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) Desierto de la Tatacoa. En *La Universidad De Cundinamarca*.

Facultad de Ciencias Agropecuarias. Retrieved October 28, 2024, de:

<https://hdl.handle.net/20.500.12558/4793>

Bernal, N. (2021). Análisis de la pérdida de cobertura arbórea en el complejo del cerrejón en los municipios albania, barranca y hatonuevo (la guajira) desde el 2001 hasta 2018.

Universidad Militar Nueva Granada

Bian, Z., et al. (2017). *The impact of mining activities on surface temperature and vegetation cover*. Environmental Earth Sciences.

Chaddad, F., A.O. Mello, F., Tayebi, M., Safanelli, J. L., Campos, L. R., Accorsi Amorim, M.

T., Barbosa De Sousa, G. P., Ferreira, T. O., Ruiz, F., Greschuk, L. T., Rosin, N. A., Fim

Rosas, J. T., & Demattê, J. A. M. (2022). *Impact of mining-induced deforestation on soil surface temperature and carbon stocks: a case study using remote sensing in the Amazon*

*Rainforest*. Sciences Direct. Retrieved October 28, 2024, from

<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103983>.

- Chander, G., et al. (2009). *Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors*. En prensa en *Remote Sensing of Environment*.
- Congreso de la República de Colombia, (2001). E. C. (n.d.). Ley 686 de 2001. *Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones*. Gov.Co. Retrieved November 5, 2024, from [https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ley\\_685\\_2001\\_0.pdf](https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ley_685_2001_0.pdf)
- Congreso de la República de Colombia. (1993). Ley 99 de 1993: Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se establece el Sistema Nacional Ambiental y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 41.146. Recuperado de: <http://www.suin-juriscol.gov.co>
- Di Gregorio, A., et al. (2018). *Trends in Surface Temperature and Their Impact on Vegetation*. Earth Observation Handbook.
- Diego Segura & Farly Bejarano. (2019). *Análisis del índice normalizado de diferencia de vegetación (NDVI) en la zona sur del departamento del Tolima*. Universidad de Ibagué, Tolima, Colombia. 50.
- Elvidge, C. D., et al. (1997). *Mapping Mining Impacts Using Remote Sensing*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.
- Español, V. en. (n.d.). La minería y los ODS : Responsible Mining Foundation.org. Retrieved November 12, 2024, from [https://www.responsibleminingfoundation.org/app/uploads/RMF\\_CCSI\\_Mining\\_and\\_SD\\_Gs\\_SP\\_Sept2020.pdf](https://www.responsibleminingfoundation.org/app/uploads/RMF_CCSI_Mining_and_SD_Gs_SP_Sept2020.pdf)
- ESRI. (2024). Galería de índices. ArcGIS Pro. Retrieved November 5, 2024, <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/data/imagery/indices-gallery.htm>
- Franco, J. C., & Franco, J. C. (2018). Impacto Ambiental de la Minería: impacto social y ambiental en contextos de dependencia económica. *Virtualpro. Procesos Industriales*, 1(201).

- Franco, Rodolfo, 2016. Análisis multitemporal vectorial en ArcGIS Desktop. Obtenido de <https://rodolfofrancoweb.com>
- Galvis Causil, S., & Prada Castellanos, R. V. (2017). *uso de imágenes satelitales landsat 8 para la estimación de temperatura superficial de la tierra, caso de estudio: Ibagué – Tolima* [tesis]. Universidad de Manizales.
- García-Santos, V., Cuxart, J., Martínez-Villagrasa, D., Jiménez, M., & Simó, G. (2018). Comparison of Three Methods for Estimating Land Surface Temperature from Landsat 8-TIRS Sensor Data. *Remote Sensing*, 10(9), 1450. <https://doi.org/10.3390/rs10091450>
- GeoInnova. (2019, Marzo 13). Minería a cielo abierto y sus impactos en el medio ambiente. (n.d.). Ocmal.org. Retrieved February 13, 2025, from <https://www.ocmal.org/mineria-a-cielo-abierto-y-sus-impactos-en-el-medio-ambiente/>
- Getis, A., & Ord, J. K. (1992). *The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics*. Geographical Analysis.
- Gobernación de La Guajira. (2024) División política administrativa, Retrieved november 15, 2024, from <https://www.laguajira.gov.co/LaGuajira/Paginas/Division-Politica-Administrativa.aspx>
- Gonzales, S, (2022). Impacto ambiental de la explotación minera del carbón a cielo abierto en Colombia. Universidad Militar Nueva Granada.
- Goudie, A. S. (2018). Human impact on the natural environment. John Wiley & Sons.
- Gutiérrez, G. A., Cotes, D. A., & Bastidas, M. J. (2018), Estudio de la Combustión Espontánea del Carbón durante el Acopio en la Mina El Hatillo, ubicada en Cesar, Colombia. Universidad de La Guajira, Riohacha-Colombia.

- 
- Gutman, G., & Ignatov, A. (1998). *The Derivation of Surface Temperature from AVHRR Data*. International Journal of Remote Sensing.
- He, J., Zhao, W., Li, A., Wen, F., & Yu, D. (2019). The impact of the terrain effect on land surface temperature variation based on Landsat-8 observations in mountainous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 40(5-6), 1808-1827.
- Hidalgo García, D., & Arco Díaz, J. (2021). Spatial and Multi-Temporal Analysis of Land Surface Temperature through Landsat 8 Images: Comparison of Algorithms in a Highly Polluted City (Granada). *Remote Sensing*, 13(5), 1012.  
<https://doi.org/10.3390/rs13051012>
- Hinojosa, B. et al (2021). Temperatura de la superficie terrestre y escenarios climáticos por el cambio de uso de suelo en los municipios metropolitanos del departamento de Santa Cruz, Bolivia. In *Ecología En Bolivia* (pp. 17–28) [Journal-article]
- IPMA. (n.d.). *Product tutorial on land surface temperature (LST)*. Eumetrain.org. Retrieved November 5, 2024, from <https://resources.eumetrain.org/data/4/460/index.htm>
- Jie, L, et al. (2021). Radiometric quality improvement of hyperspectral remote sensing images: a technical tutorial on variational framework. *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 15, Issue 03, 031502, <https://doi.org/10.1117/1.JRS.15.031502>.
- Jiménez-Muñoz, J. C., et al. (2014). *Comparison of Landsat 5 TM and Landsat 8 TIRS for Temperature Retrieval*. *Remote Sensing of Environment*.
- Jin, M., et al. (2005). *Validation of Surface Temperature Data Using Meteorological Data*. *Journal of Climate*.
- Judd, C. M., & McClelland, G. H. (1989). *Data Analysis: A Model Comparison Approach*. Harcourt Brace.

- Khan, R., Li, H., Basir, M., Chen, Y. L., Sajjad, M. M., Haq, I. U., ... & Hassan, W. (2022). *Monitoring land use land cover changes and its impacts on land surface temperature over Mardan and Charsadda Districts, Khyber Pakhtunkhwa (KP), Pakistan*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(6), 409.
- Lambin, E. F., et al. (2001). *Remote Sensing and GIS Applications in Landscape Change and Environmental Impact Assessment*. Remote Sensing of Environment.
- Medina Solarte, Y. M. (2023). *Estimación y análisis comparativo de las islas de calor urbano en los municipios de El Cerrito y Palmira en el Valle del Cauca* [TESIS]. Universidad de Manizales.
- Mejía Ladino, G. E., & Venegas Zambrano, W. Y. (2020). Análisis Multitemporal De La Temperatura Superficial De Áreas Degradadas Y De Reserva Forestal Del Municipio De Zipaquirá. In Universidad Antonio Nariño, Facultad De Ingeniería Ambiental Y Civil.
- Mind the Graph. (2023, octubre 10). Correlación de Pearson: Comprender las matemáticas detrás de las relaciones. Recuperado de <https://mindthegraph.com/blog/es/pearson-correlation/>
- Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible. Colombia. (2015). Decreto 1076 del 26 de mayo de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Decreto-1076-de-2015.pdf>
- Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible. Colombia. (N.d.-e). Gov.Co. Retrieved November 5, 2024, from <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Decreto-1076-de-2015.pdf>  
<https://www.andi.com.co/Uploads/res-751-de-2017.pdf>  
<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/ley-99-1993.pdf>

- 
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2021). Informe sobre la gestión ambiental en Colombia. Retrieved November 5, 2024, Recuperado de: <https://www.minambiente.gov.co>.
- Ministerio de Minas y Energía (MME). república de Colombia, decreto 2655 DE 1988, [https://www.anm.gov.co/sites/default/files/decreto\\_2655\\_de\\_1988.pdf](https://www.anm.gov.co/sites/default/files/decreto_2655_de_1988.pdf)
- (N.d.-g). Minsus.net. Retrieved November 12, 2024, from <https://minsus.net/mineria-sustentable/wp-content/uploads/2022/05/practicas-lideres-avances-y-desafios-pendientes-de-los-mecanismos-de-reclamo-operacionales-mineros-en-la-region-andina-mayo-2022.pdf>
- Pablos, M., Martínez-Fernández, J., Piles, M., Sánchez, N., Vall-Llossera, M., & Camps, A. (2016). Multi-Temporal Evaluation of Soil Moisture and Land Surface Temperature Dynamics Using in Situ and Satellite Observations. *Remote Sensing*, 8(7), 587. <https://doi.org/10.3390/rs8070587>.
- Pérez Díaz, V. (29 de agosto de 2022). El trabajo de rehabilitación que hace la minera Cerrejón en su zona de operación. La República <https://www.larepublica.co/especiales/las-mas-vendedoras-en-costa-caribe-2021/el-trabajo-de-rehabilitacion-que-hace-la-minera-cerrejon-en-su-zona-de-operacion-3433829>
- Pontius Jr, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, ecosystems & environment*, 101(2-3), 251-268.
- Sánchez, Y.; Martínez Graña, A.; Santos- Francés, F. (2021). Remote Sensing Calculation of the Influence of Wildfire on Erosion in High Mountain Areas. *Agronomy* 2021, 11, 1459. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081459>

Stebbins, R. A. (2001). *Exploratory Research in the Social Sciences*. SAGE Publications.

Schober, P., et al. (2018). *Understanding Correlation Coefficients in Medical Research*.

Anesthesia & Analgesia.

Schodde, R. (2017). *Long-term trends in mineral exploration*. Society of Economic Geologists.

Strzempko, J., & Pontius Jr, R. G. (2023). *The Flow Matrix Offers a Straightforward Alternative to the Problematic Markov Matrix*. *Land*, 12(7), 147.

Taati, L., Sunardi, S., Syauqiah, I., & Jauhari, A. (2024). The Effect of Coal Mining Activities on Soil Surface Temperatures in Forested Areas. EAI. <https://doi.org/10.4108/eai.2-11-2023.2347953>

Tatipamul, R. (2019). *application of geospatial technology in environmental and disaster management*. *Physio-Géo*. 01. 143-145.

Última, y. E., Constitucional, E., & De denominación, y. P. de D. V. y. A. ya P. D. Y. Q. H. S. E.

P. R. P. Q. ya no E. o. Q. H. C. (n.d.). *administrativas en Minería*. Bcn.Cl. Retrieved November 12, 2024, from

[https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/24808/1/Listado\\_de\\_legislaci%C3%B3n\\_minera\\_final.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/24808/1/Listado_de_legislaci%C3%B3n_minera_final.pdf)

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). *MARCO LEGAL MINERO*. (n.d.). Gov.Co.

Retrieved November 5, 2024, from

[http://www.upme.gov.co/guia\\_ambiental/carbon/gestion/politica/marco/marco.htm](http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/politica/marco/marco.htm)

Riveros Rueda, O. R., & Ruiz Chica, N. R. (2020). Zonas potenciales de captación de agua subterránea para consumo humano y riego en el corregimiento de Puente Bomba, La Guajira [TESIS]. Universidad de Manizales.

- 
- Ulloa, A., Godfrid, J., Damonte, G., Quiroga, C., & López, A. P. (2020). Monitoreos hídricos comunitarios: conocimientos locales como defensa territorial y ambiental en Argentina, Perú y Colombia. *Íconos - Revista de Ciencias Sociales*, 69.  
<https://doi.org/10.17141/iconos.69.2021.4489>
- Vargas, R., et al. (2021). *Multitemporal analysis of surface temperature using Landsat imagery*. *Journal of Environmental Management*.
- Varade, D.M., Maurya, A.K., & Dikshit, O. (2018). Development of Spectral Indexes in Hyperspectral Imagery for Land Cover Assessment. *IETE Technical Review*, 36, 475 – 483.
- Villarreal. 2022. Conflictos socioambientales relacionados con la extracción de carbón: Análisis de caso El Cerrejón – Guajira. *Boletín Informativo*. Vol. 9 No. 2 - 2022. Pg 155-160
- Wulder, M. A., et al. (2019). *Landsat and Sentinel-2 Data Continuity: Characterization, Calibration, and Cross-Calibration*. *Remote Sensing of Environment*.
- Zapata S, Lopez V, (2023). Extracción del carbón mineral en Colombia y su impacto ambiental. Tecnológico de Antioquia Institución Universitaria.
- Zhang, J., & Kuenzer, C. (2007). Thermal surface characteristics of coal fires 1 results of in-situ measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 63(3-4), 117-134.
- Zhu D, Chen T, Zhen N, Niu R. Monitoring the effects of open-pit mining on the eco-environment using a moving window-based remote sensing ecological index. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2020 May;27(13):15716-15728. doi: 10.1007/s11356-020-08054-2. Epub 2020 Feb 21. PMID: 32086733.