UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE FLUJO DE CALOR GEOTÉRMICO A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8-OLI-TIRS EN LA CUENCA SEDIMENTARIA LLANOS ORIENTALES

ANAMARÍA PAEZ CUERVO

VALENTINA KALIGARI TORRES

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA

BOGOTÁ D.C

SEPTIEMBRE 2021

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE FLUJO DE CALOR GEOTÉRMICO A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8-OLI-TIRS EN LA CUENCA SEDIMENTARIA LLANOS ORIENTALES

Autoras:

ANAMARÍA PAEZ CUERVO

VALENTINA KALIGARI TORRES

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CATASTRAL Y GEODESTA

Directora:

Ph.D. ERIKA SOFÍA UPEGUI CARDONA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA

BOGOTÁ D.C

SEPTIEMBRE 2021

Nota de aceptación:

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del Director

Erika Sofia Upegui Cardona

_____

Firma del Jurado

Bogotá D.C. Septiembre 2021

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 12

ABSTRACT 13

1. INTRODUCCIÓN 14

1.1. INTRODUCCIÓN 14

1.2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 15

1.3. JUSTIFICACIÓN 16

1.4. OBJETIVOS 17

1.4.1. OBJETIVO GENERAL 17

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 17

1.5. ALCANCES 18

2.1. GLOSARIO 19

2.1.1. Geotermia 19

2.1.2. Flujo de calor geotérmico (GHF) 19

2.1.3. Flujo de calor radiativo (RHF) 20

2.1.4. Radiación térmica 20

2.1.5. Anomalías térmicas 21

2.1.6. Transmisividad atmosférica 21

2.1.7. Percepción remota 21

2.1.8. Landsat 8 OLI-TIRS 22

2.1.9. Sensor TIRS 23

2.1.10. Resolución radiométrica 23

2.1.11. Resolución espectral 24
2.1.12. Espectro electromagnético 24
2.1.13. Radiancia espectral 24
2.1.14. Albedo 25
2.1.15. Emisividad 27
2.1.16. Índice de vegetación normalizado (NDVI) 28
2.1.17. Temperatura de Brillo y Temperatura Superficial Terrestre 29
2.1.18. DEM 30
2.1.19. Corrección radiométrica 31
2.1.20. Corrección geométrica 31
2.1.21. Corrección atmosférica 31
2.1.22. Corrección geoidal 32
2.1.23. Correlación 33
2.1.24. Regresión lineal 34
2.2. MARCO TEÓRICO 35
2.2.1. Situación energética internacional y la energía geotérmica 35
2.3. ESTADO DEL ARTE 39
2.4. MARCO LEGAL 41
3. MATERIALES Y MÉTODOS 43
3.1. ZONA DE ESTUDIO 43
3.2. DATOS DISPONIBLES 47
3.2.1. Imágenes Landsat 8 48
3.2.2. Modelos Digitales de Elevación 50

3.2.3. Mapa preliminar de flujo de calor en la cuenca de los llanos orientales 51
3.2.4. Transmisividad atmosférica 53
3.3. METODOLOGÍA 54
3.3.1. FASE 1 55
3.3.1.1. Enmascaramiento de las imágenes 55
3.3.1.2. Correcciones atmosférica y radiométrica..... 56
3.3.1.3. Cálculo del índice de vegetación normalizado (NDVI)..... 56
3.3.1.4. Emisividad..... 57
3.3.1.5. Radiancia..... 57
3.3.1.6. Temperatura de brillo..... 57
3.3.1.7. Recuperación de la temperatura de la superficie terrestre (LST)..... 57
3.3.2. FASE 2 58
3.3.2.1. Temperatura ambiente 59
3.3.2.2. Flujo de calor radiativo (RHF) 60
3.3.2.3. Corrección Geoidal 60
3.3.2.4. Áreas de Radiación Solar..... 60
3.3.2.5. Albedo..... 61
3.3.2.6. Flujo de calor geotérmico (GHF) 61
3.3.3. FASE 3 61
3.3.3.1. Validación 61
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS..... 63
4.1. Índice de vegetación normalizado..... 63
4.2. LST..... 67

4.3. Emisividad 72
4.4. RHF 74
4.5. Albedo 76
4.6. Radiación solar 78
4.7. GHF 79
4.8. VALIDACIÓN 81
5. CONCLUSIONES 84
6. BIBLIOGRAFÍA 86

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Demanda de energía primaria mundial entre 1971 y 2009 expresada en Mtoe. 36

Ilustración 2. Sistema geotérmico ideal. 37

Ilustración 3. Localización zona de estudio 44

Ilustración 4. Mapa geológico cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales..... 47

Ilustración 5. Cobertura de las imágenes Landsat para la zona de estudio 49

Ilustración 6. Cobertura de Modelos Digitales de Elevación en el área de estudio 50

Ilustración 7. Mapa preliminar de flujo de calor geotérmico de la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales..... 52

Ilustración 8. Metodología del proyecto 54

Ilustración 9. Flujo de trabajo, Fase 1..... 55

Ilustración 10. Flujo de trabajo, Fase 2..... 59

Ilustración 11. Índice de vegetación en la zona de estudio 65

Ilustración 12. Visualización en la zona urbana del índice de vegetación..... 66

Ilustración 13. Histograma del NDVI..... 67

Ilustración 14. Temperatura superficial del suelo con la banda 10 68

Ilustración 15. Temperatura superficial del suelo con la banda 11 69

Ilustración 16. Visualización en la zona urbana para el LST..... 70

Ilustración 17. Histograma LST Banda 10..... 71

Ilustración 18. Histograma LST Banda 11..... 72

Ilustración 19. Emisividad de la zona de estudio 73

Ilustración 20. Visualización en la zona urbana de la emisividad..... 74

Ilustración 21. Flujo de calor radiativo en la zona de estudio 75
Ilustración 22. Comparación LST y RFH 76
Ilustración 23. Albedo en la zona de estudio..... 77
Ilustración 24. Radiación solar en la zona de estudio 78
Ilustración 25. Visualización en la zona urbana de la radiación solar 79
Ilustración 26. Flujo de calor geotérmico del área de estudio 80
Ilustración 27. Correlación GHF obtenido y GHF del Servicio Geológico Colombiano 83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Bandas sensor Landsat 8 OLI-TIRS..... 22

Tabla 2. Clasificación de emisividad según la cobertura del suelo 28

Tabla 3. Imágenes satelitales adquiridas..... 48

Tabla 4. Transmisividad atmosférica. 53

Tabla 5. Clasificación índice de vegetación..... 64

Tabla 6. Coeficiente de correlación de Pearson 81

TABLA DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
DEM	Modelo digital de elevación (por sus siglas en ingles)
GHF	Flujo de calor geotérmico (por sus siglas en ingles)
LST	Temperatura superficial terrestre (por sus siglas en ingles)
NDVI	Índice normalizado de vegetación (por sus siglas en ingles)
PDI	Procesamiento Digital de Imágenes
RHF	Flujo de calor radiativo (por sus siglas en ingles)
SGC	Servicio Geológico Colombiano
TIRS	Sensor térmico infrarrojo (por sus siglas en ingles)

RESUMEN

Este documento presenta una metodología que permite estimar el flujo de calor geotérmico (GHF) en la cuenca sedimentaria Llanos Orientales clasificada como una zona de baja y/o media entalpía, a partir, del procesamiento digital de imágenes satelitales Landsat 8-OLI-TIRS, empleando como principal insumo infrarrojos térmicos (TIR) con los cuales se obtienen productos como la temperatura superficial de la tierra (LST) e índices de vegetación (NDVI) que relacionados con los modelos digitales de elevación se implementaron para obtener la temperatura ambiente de la zona de estudio y así mismo, el cálculo de la radiación solar del área. Dichas variables climatológicas y topográficas son de gran importancia ya que al ser combinadas durante el procesamiento eliminan errores en las imágenes debido a la nubosidad o a la alta incidencia solar en la escena. La metodología permite identificar puntos con anomalías de temperatura que determinan zonas de potencial explotación geotérmica, cuyos resultados obtuvieron una correlación positiva alta con respecto a la información obtenida del Servicio Geológico Colombiano (SGC).

PALABRAS CLAVE: Flujo de calor, Infrarrojo Térmico, Índice de vegetación, Geotermia y Entalpia.

ABSTRACT

This document presents a methodology that allows estimating the geothermal heat flux (GHF) in the Llanos Orientales sedimentary basin classified as a low and / or medium enthalpy area, based on the digital processing of Landsat 8-OLI-TIRS satellite images, Using thermal infrared (TIR) as the main input, with which products such as the earth's surface temperature (LST) and vegetation indices (NDVI) are obtained, which, related to digital elevation models, were implemented to obtain the ambient temperature of the area. of study and likewise, the calculation of the solar radiation of the area. Said climatological and topographic variables are of great importance since, when combined during processing, they eliminate errors in the images due to cloudiness or high solar incidence in the scene. The methodology allows to identify points with temperature anomalies that determine areas of potential geothermal exploitation, whose results obtained a high positive correlation with respect to the information obtained from the Colombian Geological Service (SGC).

KEYWORDS: Heat flux, termal infrared, vegetation index, geotermal, enthalpy.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente grandes extensiones de la superficie terrestre son reconocidas de manera secuencial y periódica mediante los sensores remotos (Mather, 1991). Cada uno de ellos ha sido diseñado para cumplir programas específicos, es decir, cumplen tareas con objetivos concretos en diferentes campos (Catuna R., 1995). Esta técnica ha evolucionado en los últimos años, además ha ampliado su campo de aplicación pues generó una progresión en lo relativo a la cantidad, variedad y calidad de la información disponible, posibilitando, que diferentes disciplinas se interesen en explorar su uso y aplicación. (Chuvieco, 2016)

Como una herramienta empleada en variedad de ámbitos, la percepción remota es de utilidad en el estudio de la Geotermia, siendo esta, el insumo, para las mediciones de temperatura en áreas de exploración geotérmica, desempeñando un papel importante en la caracterización de los componentes de un sistema geotérmico (reservorio, fuente de calor, capa sello, zonas de recarga y descarga), teniendo en cuenta como parámetros de procesamiento la radiación solar, difusividad térmica, albedo, pendiente, relieve, vegetación, clima, entre otros. (Matiz-León et al., 2018).

En este sentido, la geotermia como recurso energético requiere de un análisis de su potencial, sin embargo, en Colombia la implementación de este recurso se ha visto afectada debido a que los estudios para la exploración y el modelamiento de este son altamente especializados y costosos, por lo cual disminuye su atractivo para potenciales desarrolladores de proyectos y su competitividad en el mercado. (Marzolf, 2014) Es así, como la teledetección asumida como un método alternativo sugiere una contribución en la caracterización de anomalías de temperatura a partir de información extraída por percepción remota que radica en el aporte de este insumo en la etapa de exploración de recursos geotérmicos de la zona de estudio que permita una toma decisiones informada, abriendo camino a la explotación de este recurso en diferentes actividades como generación de calefacción, en la industria textil, agricultura y turismo, entre otros. (Matiz-León et al., 2018)

Teniendo en cuenta lo anterior, en este proyecto se implementa y adapta una metodología para la estimación de flujo de calor geotérmico, tomando como insumo imágenes satelitales Landsat 8 OLI – TIRS de la cuenca sedimentaria de los llanos orientales, que posterior a la

implementación de correcciones atmosféricas como la radiancia y reflectancia con las cuales se eliminan los efectos que producen diferentes factores provenientes del sol y fenómenos atmosféricos que generan ruido en las imágenes, se procesan para obtener la estimación de flujo de calor geotérmico, dicho flujo permite determinar la cantidad de calor que emana la tierra y con ello localizar zonas con anomalías geotérmicas, para a continuación, empleando como método de comparación, la correlación lineal de Pearson, validar los resultados con los productos generados por el SGC (Servicio Geológico Colombiano).

1.2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El flujo de calor geotérmico es la variación de la temperatura por la conductividad térmica del medio (generalmente roca) desde el centro de la tierra hacia la superficie, teniendo como unidad de medida los vatios (W) por metro cuadrado (m2). Este representa sólo el calor procedente de debajo de la superficie terrestre y no incluye ningún efecto de calefacción solar directos o indirectos acumulados. Es considerado, además, un recurso generador de energía. (Savage et al., 2010). A lo largo del tiempo, la energía geotérmica ha sido de gran utilidad para la subsistencia humana, empleada en actividades como la calefacción, agricultura, turismo, acuicultura y con grandes temperaturas, en la generación de electricidad a poblaciones donde el acceso a esta es limitado, entre otras (Rabelo et al., 2002). Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario encontrar metodologías de estimación de flujo de calor geotérmico a partir de imágenes satelitales de infrarrojo térmico (TIRS) en áreas de baja y/o media entalpia[1]

En la actualidad, países como Islandia, Nueva Zelanda, Francia, Japón y China (en Europa y Asía), Canadá, Estados Unidos (Norte América), Costa Rica, Nicaragua, El Salvador, Guatemala y México (Centroamérica), hacen uso intensivo de la energía geotérmica en diferentes actividades económicas tanto de alta como baja y media entalpia (Fridleifsson & Haraldsson, 2011). En el caso de Colombia, los recursos geotérmicos están comenzando a incluirse en los nuevos proyectos de ley nacionales donde la energía geotérmica se define como fuente no convencional de energía renovable, con lo cual se busca aumentar la

[1] La entalpía, está definida como la energía térmica de los fluidos que se encuentran debajo de la superficie terrestre interpretada a través de la temperatura, por medio de la cual se clasifica en entalpía baja, media y alta. Según esta clasificación, varían los usos en los que se puede implementar este recurso. (Dickson & Fanelli, 2003)

investigación y exploración, por esta razón se crea la necesidad de encontrar estudios a bajo costo que logren identificar las zonas con posible potencial geotérmico dentro del territorio nacional. Considerando lo expuesto anteriormente, se plantea la hipótesis de estimar el flujo de calor geotérmico a partir de imágenes del satélite Landsat 8 OLI TIRS, desde el Procesamiento Digital de Imágenes (en adelante PDI) tomando como zona de estudio la cuenca sedimentaria de los Llanos orientales.

Desde allí, surge la pregunta de investigación ¿Cómo implementar el PDI como metodología para la estimación del flujo de calor geotérmico en la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales haciendo uso de las imágenes satelitales Landsat 8-OLI-TIRS?

1.3. JUSTIFICACIÓN

En Colombia, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) durante el año 2009 realizó un estudio para elaborar un mapa preliminar de los gradientes geotérmicos presentes en el país, en cuyos resultados obtenidos la mayor anomalía de gradiente geotérmico en ambiente sedimentario encontrada se localiza en la cuenca Llanos Orientales. En las conclusiones de dicho estudio, se propone realizar una nueva investigación a partir del análisis de las propiedades de transferencia de calor de las rocas que conforman el basamento y la cobertura sedimentaria, generando mapas de concentración de los elementos que correspondan con el fin de determinar el origen de esta anomalía (Alfaro Valero et al., 2009).

Para el año 2010, se realiza la estimación del mapa de flujo de calor para la cuenca sedimentaria Llanos Orientales a partir de mediciones de temperatura a la profundidad máxima registrada (Bottom Hole Temperature BHT) por sus siglas en inglés, en alrededor de 4600 pozos perforados en su mayoría por el sector petrolero, corregidas por el método empírico de la AAPG (American Association of Petroleum Geologists), y la temperatura promedio en superficie. No obstante, los costos de exploración e instalación de la geotermia son altos, esto reduce su atractivo para potenciales promotores de proyectos y su competitividad en el mercado, por lo cual, se considera necesario establecer algunos mecanismos con los cuales el mercado hará el reconocimiento, a este recurso (Marzolf, 2014). En este ámbito la implementación de diversas áreas de la Geomática contemplan una serie de procesos sistemáticos que permiten generar una metodología de modelado y análisis dirigida a integrar los atributos de la superficie terrestre del territorio colombiano (Matiz-León et al., 2018). Es así, que se consideran como insumo alternativo para la

estimación de las temperaturas superficiales del suelo, algunos sistemas satelitales de observación terrestre los cuales cuentan con sensores que permiten el registro de las longitudes de onda del infrarrojo termal (TIR) en los niveles digitales de las imágenes capturadas alrededor de la tierra (Siahaan et al., 2011). Estos sensores remotos con detección del TIR, proporcionan un método para cartografiar y cuantificar de una manera ágil las características geotérmicas superficiales que apoyan la exploración y evaluación de nuevos recursos y el cálculo del flujo de calor geotérmico del área de estudio (Matiz-León, 2015).

Es por ello que, la aplicación de una metodología basada en el procesamiento digital de imágenes satelitales para la determinación de zonas con posible potencial geotérmico aparece como una alternativa en los estudios de investigación y exploración de dicho recurso energético. Asimismo, la determinación de establecer que el área de estudio fuera la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales se debe a que los estudios realizados por el Servicio Geológico Colombiano cuentan con gran detalle en la estimación del flujo de calor geotérmico, estos resultados se muestran en un mapa que sirve como dato de validación para los resultados obtenidos durante la aplicación de la metodología planteada en el presente documento además, es una zona de alto interés debido a las anomalías de gradiente geotérmico encontradas a lo largo de la cuenca.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Implementar el PDI como metodología para la estimación del flujo de calor geotérmico en la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales haciendo uso de las imágenes satelitales Landsat 8-OLI-TIRS.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar las anomalías de temperatura superficial a través del PDI para la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales.

Identificar las anomalías de flujo de calor geotérmico con base al cálculo de la temperatura superficial para la cuenca sedimentaria Llanos Orientales.

Validar el flujo de calor calculado a partir de las imágenes satelitales Landsat 8-TIRS con el mapa de flujo de calor terrestre en la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales.

1.5. ALCANCES

La metodología planteada en el estudio busca estimar el flujo de calor geotérmico en la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales en Colombia a partir del procesamiento digital de imágenes Landsat 8 y modelos digitales de elevación ALOS PALSAR, con el fin de realizar una investigación exploratoria que sirva como primer insumo para distintos entes privados o gubernamentales que estén interesados en realizar un estudio preliminar en zonas con posible potencial geotérmico.

En la primera parte del documento se hace una contextualización al lector acerca de las temáticas principales que aborda la investigación como lo son la geotermia y la percepción remota, además de una breve explicación de la legislación y estudios previos de la temática planteada tanto en el país como en el contexto global. A continuación, se presentan los materiales y métodos aplicados para el desarrollo del estudio, describiendo el área de interés, los insumos implementados y la metodología planteada, la cual se divide en tres fases que buscan cumplir con los objetivos planteados anteriormente, por último se presenta el análisis de los resultados obtenidos y validación del flujo de calor obtenido con la información determinada por el SGC.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. GLOSARIO

2.1.1. Geotermia

Es el campo de la ciencia dedicado al estudio del calor existente bajo la superficie terrestre. El origen de este calor está relacionado con la estructura interna del planeta y los procesos físicos que allí ocurren, permitiendo la generación de energía geotérmica, caracterizada por ser una fuente no convencional y renovable. A pesar de que este calor está presente en cantidades enormes y prácticamente inagotables en la corteza terrestre, sin mencionar las partes más profundas de nuestro planeta, se distribuye de manera desigual, rara vez se concentra y, a menudo, en profundidades demasiado grandes para ser explotadas industrialmente, por lo cual son necesarios estudios previos de exploración geotérmica (Barbier, 2002).

2.1.2. Flujo de calor geotérmico (GHF)

Las diferencias de temperatura en un sistema dado inducen un flujo de calor geotérmico. Para que este exista, se requiere no solo una diferencia de temperatura, sino también un medio a través del cual fluye el calor. El calor puede fluir a través de materiales sólidos (en cuyo caso se llama conducción), a través de gases y líquidos (que se llama convección) y a través de ondas electromagnéticas (que se llama radiación). El flujo de calor depende de la diferencia de temperatura y el coeficiente de transferencia térmica (Kou, 2019). La Ecuación 1 define el flujo de calor con respecto a la diferencia de temperatura y el coeficiente de transferencia térmica:

$$HF = \Delta T \cdot HTC \qquad \textit{(Ecuación 1)}$$

Donde, HF es el flujo de calor dado en W/m^2, ΔT es la variación de temperatura en K y HTC es el coeficiente de transferencia térmica (Kou, 2019). No obstante, la ecuación implementada dentro de la metodología planteada, es la siguiente:

$$GHF = RHF - (SR(1-\alpha)) \qquad \textit{(Ecuación 2)}$$

Donde, GHF es el flujo de calor geotérmico dado en W/m^2, SR es la radiación solar dada en W/m^2 y α es el Albedo, el cual no posee unidades y toma valores entre -1 y 1. (Eskandari et al., 2015).

2.1.3. Flujo de calor radiativo (RHF)

El flujo de calor de radiación (RHF) constituye el calor que fluye por conducción y que es emitido desde la superficie terrestre, por consiguiente, es un flujo de procedencia geotérmica. En él se hallan además valores de radiación solar directos, que son los reflejados e indirectos los cuales son irradiados otra vez. Es dependiente del gradiente de temperatura y de la conductividad térmica de los medios, se expresa en W/m^2. (Mia et al., 2012)

El flujo de calor radiactivo teórico se calcula utilizando la ecuación de Stefan-Boltzmann (Bromley et al., 2011):

$$RHF = \tau\sigma\varepsilon A(T_s^4 - T_a^4) \qquad \textit{(Ecuación 3)}$$

Donde, RHF= Flujo de calor radiactivo (W/m^2), τ = transmisividad atmosférica, σ = constante de Stefan-Boltzmann, ε = emisividad, A = Área (m^2), T_s = temperatura de la superficie terrestre (K), T_a= temperatura ambiente (K) (Eskandari et al., 2015).

2.1.4. Radiación térmica

Consiste en el transporte de energía calorífica que puede tener lugar tanto en presencia de materia como en ausencia de ésta (en el vacío). No exige, en consecuencia, la presencia de

materia. Este proceso tiene carácter de *onda electromagnética térmica*; es decir, cualitativamente es una onda electromagnética (que en el vacío se propaga a la velocidad de la luz), y de manera concreta de un determinado rango de frecuencias. La emisión tiene lugar en todas direcciones y al incidir en un cuerpo éste puede actuar reflejándola, absorbiéndola (con aumento de la energía interna, incremento de la temperatura) o transmitiéndola. Se denomina *radiación térmica* a la que resulta exclusivamente de la temperatura (puede haber radiación debido a bombardeo de electrones, a descargas eléctricas, etc) (Martinez, 1992)

2.1.5. Anomalías térmicas

Las anomalías térmicas son los valores atípicos superiores o inferiores al promedio de temperatura en una zona de estudio específica, es decir, la diferencia entre el valor observado o previsto y el valor medio histórico. (Higuera, 2018)

2.1.6. Transmisividad atmosférica

El coeficiente de transmisividad atmosférica a la radiación térmica se establece usando los primordiales elementos del aire que absorben radiación térmica, el vapor de agua y el dióxido de carbono. La energía térmica que logre ser trasmitida por medio del aire será toda aquella que sea emitida menos la que ambos anteriores elementos absorban, por esta razón este coeficiente continuamente va a ser menor a uno y sólo puede considerarse como la unidad una vez que sea primordial hacer una estimación inmediata y no se cuenten con los datos necesarios para estimarla(Higuera, 2018).

2.1.7. Percepción remota

La percepción remota o teledetección es la ciencia y el arte de obtener información sobre un objeto, área o fenómeno mediante el análisis de datos adquiridos por un dispositivo que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Lillesand et al., 2015). Utilizando varios sensores, se recolectan de forma remota datos que pueden ser analizados para obtener información sobre los objetos, áreas o fenómenos que se investigan (Lillesand et al., 2015).

2.1.8. Landsat 8 OLI-TIRS

El sistema Landsat 8 gira alrededor de la Tierra en una órbita casi polar sincrónica con el sol, a una altitud de 705 km (438 millas), inclinada a 98,2 grados, y completa una órbita terrestre cada 99 minutos. El satélite tiene un ciclo de repetición de 16 días con un tiempo de cruce ecuatorial: 10:00 am +/- 15 minutos. Adquiere alrededor de 740 escenas por día, con una superposición de franja que varía desde el 7% en el ecuador hasta un máximo de aproximadamente el 85 % en latitudes extremas. El tamaño de una escena de Landsat 8 es de 185 km x 180 km.

Las imágenes Landsat 8 obtenidas por el sensor (OLI) y (TIRS) constan de nueve bandas espectrales, con una resolución espacial de 30 metros para las bandas de 1 a 7 y 9, 15 metros para la banda pancromática (banda 8), 100 metros para las bandas térmicas (Bandas 10 y 11). (*Landsat 8 Overview | Landsat Science*, s. f.)

Tabla 1. Bandas sensor Landsat 8 OLI-TIRS

Landsat-8 OLI and TIRS Bands (um)		
30 m Coastal/Aerosol	0.435 – 0451	Band 1
30 m Blue	0.452 – 0.512	Band 2
30 m Green	0.533 – 0.590	Band 3
30 m Red	0.636 – 0.673	Band 4
30 m NIR	0.851 – 0.879	Band 5
30 m SWIR-1	1.566 – 1.651	Band 6
100 m TIR-1	10.60 – 11.19	Band 10
100 m TIR-2	11.50 – 12.51	Band 11
30 m SWIR-2	2.107 – 2.294	Band 7
15 m Pan	0.503 – 0.676	Band 8
30 m Cirrus	1.363 – 1.384	Band 9

Fuente: (Landsat 8 Overview | Landsat Science, s. f.)

Cada una de las bandas con las que cuenta el sensor es usada para diferentes fines, por ejemplo la banda 1 (azul-profundo) es útil para estudios costeros y aerosoles, la banda 9 es útil para la detección de cirrus y las dos bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie. (Ariza, 2013).

2.1.9. Sensor TIRS

El sensor de infrarrojos térmico (TIRS) mide la temperatura de la superficie terrestre en dos bandas térmicas con una nueva tecnología que aplica la física cuántica para detectar el calor.

TIRS utiliza fotodetectores de infrarrojos de pozo cuántico (QWIP) para detectar longitudes de onda largas de luz emitida por la Tierra cuya intensidad depende de la temperatura de la superficie. Estas longitudes de onda, llamadas infrarrojas térmicas, están mucho más allá del alcance de la visión humana. (*Thermal Infrared Sensor (TIRS) | Landsat Science*, s. f.).

La cámara termográfica funciona en modo *pushbroom*, es decir barrido, con dos canales infrarrojos: 10,8 µm y 12 µm. Las dos bandas espectrales se logran mediante filtros de interferencia que cubren el Focal Plane Assembly (FPA). La implementación de la escoba de empuje aumenta la sensibilidad del sistema al permitir tiempos de integración más largos. Los dos canales permiten el uso de la técnica de "ventana dividida" para ayudar a distinguir entre la temperatura de la superficie de la Tierra y la de la atmósfera.

2.1.10. Resolución radiométrica

Esta clase de resolución se refiere al número de niveles digitales o los intervalos de magnitud utilizados para manifestar los datos recogidos que son capturados por medio del sensor, es decir, representa la capacidad de discriminar pequeñas variaciones en la radiación que se detecta, principalmente se expresa en el número de bits que almacena cada pixel de la imagen, determinando los niveles de energía que tienen la posibilidad de ser

captados. Generalmente entre más grande sea el número de niveles más grande es el detalle con el que se va a poder manifestar esa información. (Chuvieco, 2016).

2.1.11. Resolución espectral

La resolución espectral constituye el número y ancho de las bandas espectrales registradas por el sensor, que se manifiestan en longitudes de onda. Entre más diminuto sea el intervalo más grande va a ser la resolución espectral ya que la investigación discriminante aumenta y dejará diferenciar recursos con más detalle en relación con su comportamiento espectral, de esta forma es que un sensor es mejor según el tamaño que tenga un número más grande de bandas.

Una vez que se poseen bandas anchas varios recursos entraran en aquel rango de longitudes de esta forma que en algunas ocasiones no es viable distinguir los comportamientos de ciertos objetos en concreto, implicando con ello la pérdida o el desconocimiento de información que logre ser detectada y analizada por medio de percepción remota. (Chuvieco, 2016).

2.1.12. Espectro electromagnético

Corresponde al reparto de las de ondas contenidas en las radiaciones electromagnéticas. El Espectro Electromagnético (EM) está formado por una secuencia de ondas como por ejemplo las microondas, luz visible, luz infrarroja, luz ultravioleta, relámpagos x y relámpagos gamma; es fundamental conocer la conducta del espectro electromagnético por medio de la radiación de los objetos (cuerpos de agua, vegetación, suelos, etcétera.) que se hallan en la tierra debido a que posibilita discriminar su estado, basado en las firmas espectrales que los representan; las longitudes de onda más representativas para los estudios basados en percepción remota se hallan entre 300 y 400 nanómetros (nm), luz ultravioleta y la zona del visible e infrarrojo entre 400 nm y 1 micrómetro (μm). (Chuvieco, 2016).

2.1.13. Radiancia espectral

La radiancia es la cantidad de energía electromagnética que pasa a través o es emitida desde un área en particular, confinada en un ángulo sólido en una dirección específica. El ángulo sólido tiene su vértice en la apertura del sistema sensor o del sistema óptico y base en la fuente o superficie de reflexión. (Briziela et al., 2007) La radiancia está definida en la Ecuación 4:

$$L = \frac{d^2\phi}{dAd\Omega\ cos\,\theta} \qquad \textit{(Ecuación 4)}$$

Donde, L es la radiancia dada en (Wm^2sr^{-1}), θ es el flujo radiante o potencia dado en (W), A es el área de la fuente dado en (m^2) y Ω es el ángulo solido (sr). (Briziela et al., 2007).

Los niveles digitales de la imagen son proporcionales a la radiancia, pero son multiplicados por un factor de conversión que permite almacenar los datos en formatos más compactos. Para revertir la compresión sólo es necesario multiplicar los valores de cada banda por el factor de compresión, ya sea un factor único para toda la imagen o un factor específico por cada banda según haya dispuesto el fabricante del sensor, en ciertos casos incluso proporciona una fórmula que debe aplicarse a los datos para revertir esta compresión (Aguilar Arias et al., 2014).

En el caso del Landsat 8, se usó la guía de calibración realizada por Chander et al, 2009, donde se realiza el cálculo de la radiancia teniendo en cuenta las constantes LMAX, LMIN, Qcalmax y Qcalmin bandas 10 y 11 por medio de un Raster Calculator aplicando la siguiente formula.

$$L\lambda = \left(\frac{LMAX\lambda - LMIN\lambda}{Qcalmax - Qcalmin}\right)(Qcal - Qcalmin) + LMIN\lambda \qquad \text{(Ecuación 5)}$$

2.1.14. Albedo

El albedo absoluto se puede definir como la relación entre la radiación solar reflejada por una superficie, integrada sobre todas las longitudes de onda de la luz solar, dividido entre la radiación solar incidente sobre esa misma superficie, también integrada sobre todas las

longitudes de ondas de la luz solar. (Vera Mella, 2006)

El albedo varía con el tipo de cubierta terrestre, la cual presenta una característica espectral y una reflectividad bidireccional propias. El albedo de un suelo varía con el color, la humedad, el contenido de materia mineral y orgánica, y el estado de la superficie. Los suelos con tonalidades claras poseen un albedo mayor que los oscuros, por lo tanto, los suelos arenosos poseen un albedo mayor que los arcillosos.(Vera Mella, 2006).

Los datos de satélite constituyen una herramienta importante para determinar el albedo, además de que estos datos poseen una adecuada cobertura tanto espacial como temporal. En este estudio se supone que la reflexión de la superficie terrestre es Lambertiana. Aunque la radiancia en el límite superior de la atmósfera no es Lambertiana, la radiancia del satélite puede ser simulada y el albedo puede ser determinado considerando esta superficie. Esta aproximación imita el procedimiento general para convertir la radiancia derivada del satélite en albedo. Teniendo en cuenta esa suposición, la reflectividad ρ de una superficie puede definirse como:

$$\rho\,(\lambda) = \frac{\pi\, L(\lambda)}{\mu E(\lambda)} \quad \textit{(Ecuación 6)}$$

Donde: $L(\lambda)$ es la radiacia espectral reflejada por la superficie ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$), $\pi\, L(\lambda)$ es la radiancia espectral reflejada; $\mu = \cos\theta$, donde θ es el ángulo cenital solar, E es la irradiancia espectral incidente proveniente del sol ($Wm^{-2}sr^{-1}$) y $\mu E(\lambda)$ es la parte de la irradiancia espectral incidente que impacta en la superficie.

El albedo α se define como la reflectividad hemisférica representativa para una banda espectral determinada. De forma similar a la anterior ecuación.

$$\alpha = \frac{\pi L}{\mu E} \qquad \textit{(Ecuación 7)}$$

Donde L es la integral de la radiancia espectral pesada por la función filtro de la banda ($Wm^{-2}sr^{-1}$) y E la integral de la irradiancia espectral pesada por la función filtro de la

banda (Wm^{-2}). Esos dos términos pueden ser escritos como:

$$\pi L = \int_{\lambda inf}^{\lambda sup} \pi L\,(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad \textit{(Ecuación 8)}$$

$$\mu E = \int_{\lambda inf}^{\lambda sup} \mu E S(\lambda) d\lambda \qquad \textit{(Ecuación 9)}$$

Donde $S(\lambda)$ es la respuesta espectral de la función filtro y $\lambda_{inf}, \lambda_{sup}$ son los extremos de las longitudes de onda espectral de la banda. (Vera Mella, 2006).

2.1.15. Emisividad

La emisividad de una superficie se define como la relación entre la radiación emitida por una superficie y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. (Vanhellemont, 2020) Por lo general, la emisividad se modela utilizando un método de clasificación de imágenes, el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y / o la fracción de cobertura vegetal (FVC) si se dispone de imágenes ópticas multiespectrales concurrentes. (Vanhellemont, 2020).

La Pv (porción de vegetación) como parámetro de entrada en la estimación de emisividades por parte de Sobrino se calcula a partir del NDVI con la siguiente ecuación (Hantson et al., 2011) :

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}\right)^2 \textit{(Ecuación 10)}$$

Donde los valores de NDVImax = 0.5 y NDVImin = 0.2 fueron propuestos por Sobrino y Raissouni (2000) para una aplicación global, así mismo plantea el cálculo de la emisividad

de tres formas distintas teniendo en cuenta el valor los valores obtenidos en el índice de vegetación (Hantson et al., 2011).

$$NDVI < 0.2 = 0.95 \quad \textit{(Ecuación 11)}$$

$$0.2 \leq NDVI \leq 0.5 = 0.979 + 0.004 * P_V \quad \textit{(Ecuación 12)}$$

$$NDVI > 0.5 = 0.99 \textit{ (Ecuación 13)}$$

Los valores de emisividad se pueden clasificar de la siguiente manera, de acuerdo con la cobertura que tenga el suelo:

Tabla 2. Clasificación de emisividad según la cobertura del suelo

Cobertura	Emisividad
Agua	0.0991
Construcción	0.962
Bosque	0.986
Cultivos y parcelas	0.971
Vegetación escasa	0.957
Suelo desnudo	0.97
Suburbano medianamente construido	0.957

Fuente: (Soto-Soto et al., 2020)

2.1.16. Índice de vegetación normalizado (NDVI)

El NDVI es un índice derivado, que surge a través de la respuesta de la vegetación en relación con el espectro electromagnético, es decir, los valores de NDVI son el reflejo de la relación de la banda roja y una banda en el infrarrojo cercano (NIR). Estas propiedades hacen que el NDVI se constituya en una valiosa herramienta para la evaluación de cubiertas vegetales, así como para estudiar la clasificación, dinámica vegetal y sus aspectos fenológicos. (Olivares & López-Beltrán, 2018) y está representada bajo la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{(Banda\ 5 - Banda\ 4)}{(Banda\ 5 + Banda\ 4)} \qquad \textit{(Ecuación 14)}$$

$$NDVI = \frac{(IRc - R)}{(IRc + R)} \qquad \textit{(Ecuación 15)}$$

Dónde NDVI es el índice de vegetación resultado que oscila entre -1 y 1, cuyos valores menores a 0, 1 se interpreta como suelos desnudos o cuerpos de agua, mayores a estos va en relación equivalente a la cobertura vegetal, entre más alto los valores indican la actividad fotosintética de las diversas coberturas (matorrales, bosque templado, selva y actividad agrícola). IRc representa la banda del infrarrojo cercano y R a la banda del rojo. (Olivares & López-Beltrán, 2018)

2.1.17. Temperatura de Brillo y Temperatura Superficial Terrestre

Los datos de la banda térmica se pueden convertir de radiancia espectral a temperatura de brillo efectiva. La temperatura de brillo asume que la superficie de la Tierra es un cuerpo negro (es decir, la emisividad espectral es 1) e incluye los efectos atmosféricos (absorción y emisiones a lo largo de la trayectoria) (Alipour-Fard et al., 2003). La fórmula de conversión de la radiancia espectral a la temperatura de brillo es:

$$T_B = \frac{K2}{Ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)} \qquad \textit{(Ecuación 16)}$$

Donde K1 y K2 son las constantes de calibración previas al lanzamiento. La temperatura calculada no es la temperatura superficial real, sino la temperatura de brillo en la parte superior de la atmósfera, por lo tanto, no refleja la temperatura superficial efectiva y se requieren algoritmos más desarrollados, así como un procesamiento previo de datos adicional, como la corrección atmosférica, para lograr la temperatura superficial real (Eskandari et al., 2015).

$$LST = \frac{T_B}{1+\left(\lambda * \frac{T_B}{\rho}\right) ln\, \varepsilon} \qquad \textit{(Ecuación 17)}$$

La temperatura superficial terrestre reúne los resultados obtenidos de temperatura de brillo T_B, la emisividad ε, longitud de onda de las bandas térmicas λ y ρ= 14380 m K que es el resultado obtenido a partir de:

$$\rho = \frac{h * c}{\sigma} \qquad \textit{(Ecuación 18)}$$

Donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz y σ es la constante de Boltzmann.

2.1.18. DEM

Los modelos de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) son productos estándar del análisis fotogramétrico digital de fotografías aéreas o imágenes satelitales. (Miller & Small, 2003) Son una representación 3D de una superficie continua, que generalmente hace referencia a la superficie de la tierra. La aplicación de los DEM se extiende a campos tan diversos como la geografía, la hidrología, la ecología, los estudios de impacto ambiental y la cartografía en general. (Wu et al., 2008)

2.1.19. Corrección radiométrica

Fallos en los sensores que captan la imagen satelital, generan pixeles incorrectos, generando errores, por lo cual es necesario implementar la calibración radiométrica. Se han estudiado dos alternativas: la corrección radiométrica absoluta utilizando un modelo analítico, y la corrección mediante una transformación de niveles basada en el histograma (corrección radiométrica relativa). La primera se descartó porque el modelo requerido es extremadamente complejo, con multitud de parámetros (algunos de ellos desconocidos) relativos a la órbita del satélite, las condiciones atmosféricas locales, variaciones estacionales y geométricas, nubosidad, lluvia, etc. (van Genderen, 2016). Por tanto, se ha implementado el segundo enfoque, denominado especificación de histograma, que consiste en modificar el nivel de intensidad de un píxel de la imagen a corregir mediante una transformación tal que el histograma de la imagen resultante presente un histograma similar al de la imagen de referencia. (Ambrosio et al., 2002)

2.1.20. Corrección geométrica

Alteraciones en el movimiento del satélite y el mecanismo de captación de los sensores, generan distorsiones en la imagen global captada, por lo que se aplica la corrección geométrica de las imágenes. Este proceso conlleva la transformación de las coordenadas de los píxeles de la segunda imagen de tal forma que coincidan de manera precisa con las de la primera (imagen de referencia). Se realiza mediante una transformación polinomial de segundo grado que se obtiene a partir de un conjunto de pares de puntos de control de ambas imágenes. (Ambrosio et al., 2002)

2.1.21. Corrección atmosférica

Eliminar los efectos de la atmósfera en la región térmica es el paso esencial necesario para utilizar imágenes de banda térmica para estudios de temperatura. La señal emitida que deja un objetivo en el suelo es atenuada y mejorada por la atmósfera. Con un conocimiento adecuado de la atmósfera, se puede utilizar un modelo de transferencia radiativa para estimar la transmisión y la radiancia ascendente y descendente. Una vez que se conocen estos parámetros, es posible convertir el espacio que alcanza la radiancia en una radiancia que deja la superficie. (Barsi et al., 2003) En el presente caso de estudio, se aplicó el

método de transformación coseno (COST) de corrección atmosférica por sustracción de objetos oscuros. (Chavez, 1996).

2.1.22. Corrección geoidal

En el momento de captar imágenes por medio de un satélite o un sensor aéreo, la información de ubicación, la altura en específico, usualmente se mide sobre un modelo elíptico de la tierra, no obstante, muchos Modelos Digitales de Terreno disponibles se modelan mediante un modelo ortométrico, esto genera dos valores de elevación diferentes para la misma ubicación, ya que no se miden desde la misma ubicación base, por lo tanto se hace necesaria la aplicación de una corrección geoidal, para convertir uno en el otro. (Vanicek et al., 2003)

Las alturas ortométricas se relacionan con las alturas geodésicas sobre el elipsoide geocéntrico de referencia (las alturas geodésicas son más popularmente llamadas alturas elipsoidales) por medio de la altura geoidal N. La relación entre la altura ortométrica y la altura geodésica se expresa por la ecuación:

$$N = h - H \quad \textit{(Ecuación 19)}$$

$$N = h - H^{\circ} \quad \textit{(Ecuación 20)}$$

Donde h corresponde a la altura elipsoidal, H o H° a altura ortométrica (geoide) y N a la separación geoidal. Esta expresión, resulta de gran importancia, ya que indica que no importa cuán exacto pueda ser el valor de h, es N la que dicta la exactitud final de H o H°. Las alturas geodésicas no pueden ser consideradas prácticas. Los valores de N están dados por las diferentes exactitudes de los diferentes modelos geoidales. (Vanicek et al., 2003)

2.1.23. Correlación

La correlación tiene como objetivo examinar la dirección y la fuerza de la asociación entre dos variables cuantitativas. De esta forma, es posible conocer la intensidad de la relación entre ellas y si, al aumentar el valor de una variable, aumenta o disminuye el valor de la otra variable. Para ello, es necesario el cálculo de un coeficiente de correlación. (Restrepo B & González L, 2007) El coeficiente de correlación lineal de Pearson (de tipo paramétrico) es el estimador muestral más utilizado para evaluar la asociación lineal entre dos variables X e Y.

Es un índice que mide la tendencia de los puntos a disponerse en una línea recta. Puede tomar valores entre -1 y +1. (Restrepo B & González L, 2007)

Es un método estadístico paramétrico, ya que utiliza la media, la varianza, entre otros. Por lo tanto, requiere criterios de normalidad para las variables analizadas. Está definida como la covarianza muestral entre X y Y dividida por el producto de las desviaciones típicas de cada variable:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \qquad \textit{(Ecuación 21)}$$

Donde:

S_{xy}= Covarianza de (X,Y)

S_x= Desviación estándar de la variable X

S_y= Desviación estándar de la variable Y

El coeficiente de correlación lineal r posee las siguientes propiedades:

- Es adimensional, lo cual quiere decir que carece de unidades
- Sus valores están comprendidos entre (-1,1)
- Existe una relación lineal muy fuerte cuando toma valores cercanos a 1 ó -1.

- Cuando toma como valor 0 no existe relación lineal.

2.1.24. Regresión lineal

La ecuación para una línea recta donde la variable dependiente Y está determinada por la variable independiente X es:

$$Y = a + b \qquad \textit{(Ecuación 22)}$$

Donde a representa la "ordenada Y" porque su valor es el punto en el cual la línea de regresión cruza el eje Y, es decir, el eje vertical. La b en la Ecuación 22 es la "pendiente" de la recta. Representa qué tanto cambia la variable dependiente Y por cada unidad de incremento de la variable independiente X. También se conoce como razón de cambio.

$$b = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \qquad \textit{(Ecuación 23)}$$

Tanto a como b son constantes numéricas porque para cualquier línea recta dada sus valores no cambian. (Cardona Madariaga et al., 2013)

La regresión lineal simple consiste en generar un modelo de regresión (ecuación de una recta) que permita explicar la relación lineal que existe entre dos variables. A la variable dependiente o respuesta se le identifica como Y y a la variable predictora o independiente como X. El modelo de regresión lineal simple se describe de acuerdo con la ecuación:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \varepsilon \quad \textit{(Ecuación 24)}$$

Siendo β_0 la ordenada en el origen, β_1 la pendiente y ε el error aleatorio. Este último representa la diferencia entre el valor ajustado por la recta y el valor real. Recoge el efecto de todas aquellas variables que influyen en Y pero que no se incluyen en el modelo como predictores. Al error aleatorio también se le conoce como residuo.

Una recta de regresión puede emplearse para diferentes propósitos y dependiendo de ellos es necesario satisfacer distintas condiciones. En caso de querer medir la relación lineal entre dos variables, la recta de regresión lo va a indicar de forma directa (ya que calcula la correlación). Sin embargo, en caso de querer predecir el valor de una variable en función de la otra, no solo se necesita calcular la recta, sino que además hay que verificar que el modelo sea adecuado. (Pértega Díaz & Pita Fernández, 2001).

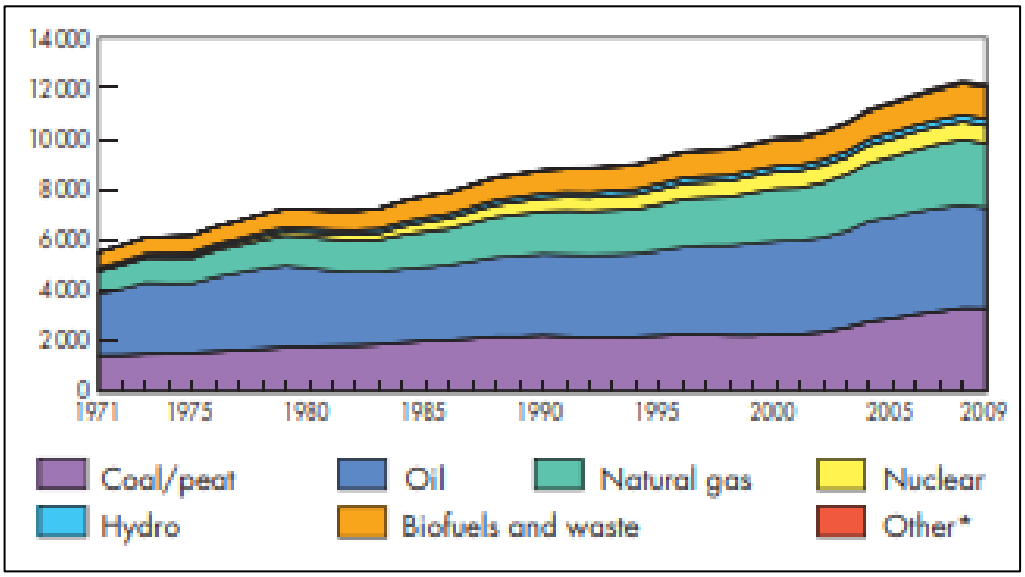
2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Situación energética internacional y la energía geotérmica

El acelerado crecimiento poblacional alrededor del todo el mundo y la demanda energética que esto conlleva ha llevado a los gobiernos de todas las naciones a encontrar métodos no convencionales de obtención de energía eléctrica renovable y amigable con el medio ambiente, acuerdos internacionales como los Acuerdos de Rio de Janeiro de 1992 y protocolos de Kioto de 1997, buscan promover que en el desarrollo de la humanidad respete y proteja el medio ambiente, estableciendo a la naturaleza como un sistema natural e independiente. (Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, 1992)

Entre 1973 y 2008 la Agencia Internacional de Energía adquirió una serie de datos estadísticos que muestran el consumo de energía global y la procedencia de dicha energía, se resalta que desde el año 2000 el consumo de energía que provenía de combustibles fósiles supero a otras fuentes como la nuclear y la hidroeléctrica llevando así a que el uso de energía fósil represente un poco más del 80% del consumo mundial como se muestra en la Ilustración 1. (Requejo Liberal, 2012)

Ilustración 1. Demanda de energía primaria mundial entre 1971 y 2009 expresada en Mtoe.



Fuente: (Requejo Liberal, 2012)

Esto genera una grande preocupación debido a que la extracción de los combustibles fósiles genera grandes emisiones de carbono afectando la atmosfera y creando daños irreparables para el medio ambiente.

El informe realizado por la Fundación para la Sostenibilidad energética y Ambiental (por sus siglas FUNSEAM) muestra las conclusiones del World Energy Outlook 2016 (WEO 2016) de la Agencia Internacional de la Energía (AIE). En este evento se recogieron los objetivos centrales de los Acuerdos de París donde participaron 195 países que trabajaran en conjunto para la disminución de emisiones de carbono y mantener bajo los 2°C el calentamiento del planeta. Bajo estas conclusiones la FUNSEAM realizó una proyección de la demanda de energía que se tendrá para el año 2040 donde muestra un crecimiento del 30% debido al constante desarrollo económico y demográfico que se viene presentando en países como India y China por su crecimiento industrial y países de América Latina y

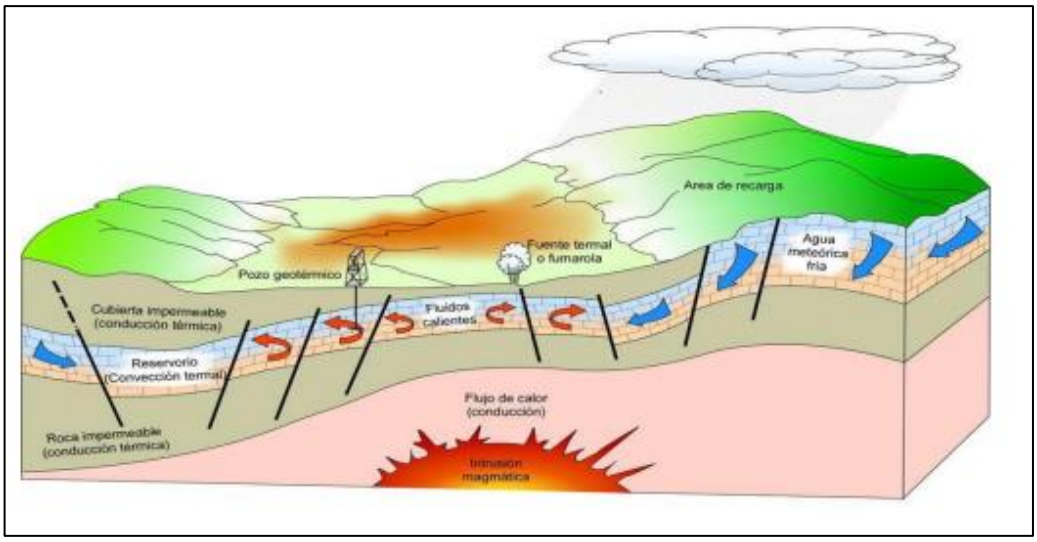
África por sus rápidos procesos de urbanización. La nueva búsqueda de recursos energéticos limpios plantea un gran desafío para cada uno de los países del globo creando la necesidad de investigación y exploración rápida y de bajo costo.

Es por ello que la energía geotérmica aparece como una alternativa energética renovable ya que esta proviene del calor que se emana desde el interior de la Tierra, el vapor que genera este flujo de calor se utiliza en algunas plantas energéticas donde este se hace pasar el por medio de bobinas que transforman la energía cinética en energía eléctrica. (Lozada Prado, 2011)

2.2.2. Sistema geotérmico

Los sistemas geotérmicos definidos por Dickson & Fanelli, 2003 constan de tres elementos principales: fuente de calor, reservorio y un fluido. Una fuente de calor puede ser zonas de gradientes de temperaturas mayores a 600°C, por otro lado, un reservorio es un volumen de rocas calientes permeables de las cuales se extrae el calor por medio de un fluido el cual se encarga de ser el medio por el cual se transfiere el calor. En la Ilustración *2* se muestra un sistema geotérmico ideal.

Ilustración 2. Sistema geotérmico ideal.



Fuente: (Dickson & Fanelli, 2003)

La producción de energía geotérmica depende en gran medida de las características geológicas y geofísicas del suelo y según el nivel de temperatura que se genere en el área se clasifican en baja, media o alta entalpia (Rabelo et al., 2002).

Las zonas con baja entalpia cuentan con temperaturas que no sobrepasan los 150°C, se caracterizan por tener bajo contenido de líquidos alcalinos y son fácilmente reconocibles por ser zonas con manantiales de agua con temperaturas medias y altas, mientras que las zonas con alta entalpia solo se encuentran los cinturones volcánicos activos o su alrededor cuentan con altos contenidos gaseosos, rocas muy lixiviadas (ha sufrido procesos de descomposición debido a la exposición de químicos), presencia de líquidos ácidos como también azufre y depósitos de yeso. Asimismo, son de fácil reconocimiento debido a la presencia de fuentes de barro termal, geiseres y fumarolas además de la poca presencia de vegetación producto de la acides del suelo.

2.2.3. Percepción remota y sus aplicaciones en exploración geotérmica

La percepción remota es la ciencia que permite obtener información de un objeto o lugar por medio de un sensor sin estar en contacto con él, de acuerdo con Chuvieco (1996) “la

teledetección no engloba sólo los procesos que permiten obtener una imagen, sino también su posterior tratamiento en el contexto de una determinada aplicación". Igualmente, las diversas aplicaciones que ofrecen las imágenes captadas por plataformas satelitales dependen de la clase de sensores que contenga dicha plataforma (ya sean térmicos, de radar, entre otros).

Los estudios en el ámbito geotérmico realizados a partir de imágenes satelitales se desarrollan por medio de sensores que tengan la capacidad de obtener información térmica como es el caso del sistema Landsat 8 que cuenta con un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS) el cual capta la radiación emitida por los cuerpos presentes en la capa terrestre y con ellos determinar por medio de su procesamiento digital insumos importantes para diferentes casos de estudio e investigación. (Ariza, 2013) Como es el caso de los estudios geotérmicos con ayuda del PDI, por medio de los productos obtenidos del procesamiento, se buscan determinar zonas con anomalías geotérmicas a través de la aplicación de técnicas de percepción remota, es así como se encuentran diferentes tipos de metodologías de procesamiento digital de imágenes como las planteada en Eskandari, Rosa y Amini (2015) donde a partir de la determinación de la temperatura superficial terrestre y junto a datos geológicos, topográficos y climáticos de la zona de estudio determino el flujo de calor geotérmico a partir de imágenes satelitales del sistema Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+).

2.3. ESTADO DEL ARTE

El crecimiento poblacional, que se ha hecho evidente en los últimos años y su demanda en el uso de energía, hace pertinente la importancia de realizar cambios significativos en los mecanismos de generación y distribución de energía, haciendo del uso de la tecnología la mejor opción para la incorporación de sistemas renovables. (Gil González, 2019). Por lo cual, cada vez existe un mayor interés en proporcionar una energía eficiente y al mismo tiempo, de bajo impacto con el medio ambiente. Es aquí, donde el recurso geotérmico se desempeña en ambos ámbitos, debido a que es una gran fuente de energía (Meer et al., 2014).

La energía geotérmica se refiere no solo a la empleada en la producción de electricidad, sino, que existe una gran variedad de usos como la climatización piscinas, calefacción, aguas termales, usos en agricultura, acuicultura o en el sector industrial. (Marzolf, 2014) Es considerada una forma de energía limpia y renovable, ya que se estima que el flujo de calor

al interior de la tierra es cercano a 42 millones de megavatios de energía, por lo tanto, esta fuente es ilimitada según la Asociación de Energía Geotérmica de Estados Unidos – Geothermal Energy Association (GEA). Por ejemplo, los sistemas de climatización a partir de geotermia de baja entalpía en viviendas están muy desarrollados en el norte de EE.UU, Canadá, Japón, Austria, Suiza, Grecia, Australia y Europa, pero existen pocos antecedentes en Latinoamérica. No obstante, en países como Brasil, el flujo de calor geotérmico de media y baja entalpia (temperaturas entre 4°C y 177°C), este recurso es aprovechado en actividades turísticas como parques acuáticos, balnearios y centros de recreación, actividades agrícolas como siembra de vegetales y otros cultivos; pasteurización de leche y deshidratación de cebolla y ajo, actividades industriales como secado de lana y madera, fabricación de papel y teñido de telas (Rabelo et al., 2002).

Por otro lado, en países como México, existen divisiones especializadas en el campo de la geotermia; la Gerencia de Geotermia pertenece a la División de Energías Alternas y tiene la misión de participar en el proceso de innovación tecnológica en el sector energético mediante el desarrollo, implementación y aplicación de técnicas y productos que permitan un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos del subsuelo, sin detrimento del medio ambiente. (Robles- Algarin & Rodríguez- Álvarez, 2018)

En conexión con lo expuesto, los autores refieren que la Gerencia de Geotermia (GG) del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) nació con el objeto de apoyar los esfuerzos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en la exploración, desarrollo y explotación de los recursos geotérmicos de México. Durante los 24 años de actividad de la Gerencia, no solamente se han efectuado trabajos en los campos geotérmicos de México, sino que también se han desarrollado proyectos o servicios en países como Argentina, Bolivia, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Estados Unidos, Guatemala, Haití, Jamaica, Nicaragua, Panamá, Perú y República Dominicana. Los resultados de los trabajos desarrollados han colocado al IIE a la vanguardia en el campo de la geotermia en Latinoamérica y, en muchos casos, sus investigadores han obtenido resultados comparables, e incluso superiores, a los de los países más avanzados.

En el caso puntual de Colombia, debido a sus condiciones climáticas, su ubicación en el trópico y en las montañas de los Andes, es un país con un alto potencial para el desarrollo de las energías renovables en sus diferentes regiones, principalmente para la energía eólica, solar, biomasa, geotérmica y pequeñas centrales hidroeléctricas. Sin embargo, debe crear las condiciones necesarias para propiciar su desarrollo para así poder consolidarse como un país líder en reducción de la huella de carbono con capacidad para exportar energías

limpias. (Arellano G, 2001) Además, particularmente, en la cuenca sedimentaria de los llanos orientales sus características geológicas proporcionan las condiciones necesarias para la maduración de hidrocarburos. Por esta razón, el flujo de calor también ha sido objeto de estudio en la investigación del petróleo. (Bachu et al., 1995)

Una investigación apoyada por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y el Instituto Colombiano de Electricidad (ICEL) concluyó que Colombia tiene al menos 9 áreas de interés para generar energía geotérmica o utilizar vapor directamente para la producción industrial o la industria turística. (Mejía et al., 2012) Los estudios realizados en Colombia se elaboraron tomando los datos de 318 pozos, a partir de temperaturas de formación y la temperatura superficial; esta última obtenida a partir de recursos climatológicos. Las temperaturas de formación fueron estimadas con temperaturas de fondo de pozo (BHT) (Alfaro Valero et al., 2010). Sin embargo, se evidencian pocos estudios realizados con sistemas de sensores remotos que abarquen una extensa zona de estudio como lo es la cuenca Llanos.

Tradicionalmente, el calor se puede medir directamente con taladros a través de los termopares (Sorey, 1991), por estimación de otras medidas indirectas tales como flujo de cloruro (Friedman & Norton, 2007), o mediante la utilización de sensores remotos digitales térmicos (Boomer et al., 2002). Este último, la teledetección por infrarrojos térmicos (TIR) con imágenes satelitales se ha aplicado para derivar la temperatura de la superficie terrestre (LST) en diversas disciplinas. El Landsat Thematic Mapper (TM) y Enhanced Thematic Mapper plus (ETM +) se han utilizado ampliamente para la detección remota de volcanes y exploración geotérmica (Qin et al., 2011), monitoreo de volcanes activos (Harris et al., 2004) e inactivos, medida del calor radiactivo y geotérmico, por medio del procesamiento de imágenes Landsat 8 TIRS (bandas 10 y 11) del área geotérmica objeto de estudio (Savage et al., 2010) .

2.4. MARCO LEGAL

El 27 de julio del año 2021 se aprobó la ley 2099 del 2021 llamada la “Ley de Transición Energética” , la cual tiene como propósito dinamizar el mercado energético, promover la obtención de energía eléctrica por medio de fuentes no convencionales de energía y también fortalecer los servicios públicos tanto de gas combustible como de energía eléctrica. (Yáñes et al., 2021) Asimismo, con la entrada en vigencia de esta ley se busca

mejorar los incentivos de las inversiones en energías renovables no convencionales que entre las más destacadas se encuentran la energía eólica, solar, geotérmica y también reconoce el hidrogeno azul y verde como una fuente no convencional de energía renovable (Coneo Rincón, 2021).

En el artículo 21 de la ley se habla del desarrollo de la energía geotérmica en el país considerándola como una Fuente no Convencional de Energía Renovable- FNCER, buscando aprovechar el recurso de alta, media y baja temperatura, es por ello que se crea el registro geotérmico en el cual se inscriben los proyectos que buscan explotar o explotar los recursos geotérmicos encontrados en el país con el fin de generar energía eléctrica, la entidad encargada de administrar este registro debe velar porque los nuevos proyectos que se empiecen o ya se encuentren en ejecución no se encuentren en la misma zona, además de establecer los plazos, requisitos y obligaciones que tendrá las organizaciones para obtener, permanecer o en el dado caso perder dicho.

El ministerio de ambiente será el organismo encargado de determinar los parámetros ambientales que deberán cumplir los proyectos geotérmicos, buscando generar el menor impacto ambiental y el marco de las licencias ambientales para los casos puntuales a los que deban aplicarse.

Por último, se determinan algunas acciones por las cuales se pueden acarrear sanciones a las compañías o entidades que exploten el recurso de forma inadecuada, entre las acciones resalta la importancia de la conservación del recurso geotérmico, no cumplir los plazos pactados por el Ministerio de Minas y Energía e incumplir las normas técnicas (Ley 2099, 2021).

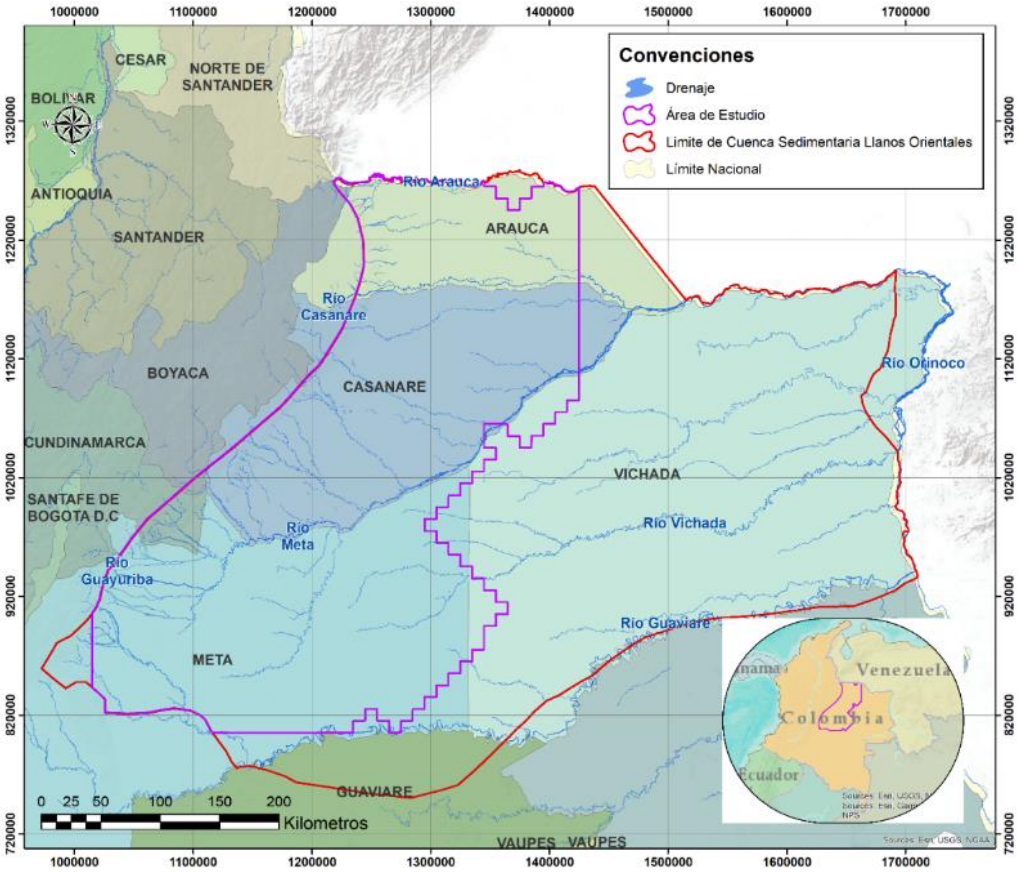
3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ZONA DE ESTUDIO

La cuenca Llanos Orientales se encuentra al noreste de Colombia en la región oriental. Es una depresión topográfica plana, de orientación suroeste - noreste, con alturas que oscilan entre 200 y 500 metros, que se desarrolló en el flanco occidental del Escudo de Guyana. Cubre una extensión de 225.603 km2 (22.560.327 hectáreas) (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2012). Sus límites geomorfológicos son: en el norte la frontera entre Venezuela y Colombia por la cuenca Apure - Barinas, por el sur la Serranía de La Macarena y el Arco del Vaupés, por el oeste con la cordillera Oriental y el sistema de fallas Guaicaramo y por el este limita con el Escudo de Guyana (Barrero et al., 2007) y comprende los departamentos de Casanare, Arauca, Meta y Vichada, ciudades principales como Villavicencio, Puerto Carreño, Yopal y Arauca así mismo con afluentes hídricos importantes como el Rio Meta, Rio Guayuriba, Rio Guaviare, Rio Vichada, Rio Casanare y el Rio Arauca.

En la Ilustración *3* se delimita espacialmente la zona de estudio, donde se muestra la ocupación de esta misma frente al área de toda la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales y asimismo su cobertura en los departamentos de Meta, Vichada, Arauca y Casanare como también se resaltan los ríos más importantes de la región como lo es el Rio Meta que atraviesa gran parte del área de interés.

Ilustración 3. Localización zona de estudio



Fuente: Elaboración Propia

Estos departamentos, se caracterizan por tener una temperatura promedio de entre 29,08°C y 30,87°C. El comportamiento de la temperatura máxima media durante el año es de tipo monomodal, registrándose un periodo de máximas altas y otro de máximas bajas, coincidentes con las temporadas seca y lluviosa, respectivamente (Hurtado M., 2010)

En Casanare, Arauca y Meta, el período de temperaturas máximas altas ocurre entre noviembre y abril, con máximo en febrero-marzo, y el de temperaturas máximas bajas, que coincide con la temporada lluviosa, tiene lugar desde mayo hasta octubre, con mínimo a mitad de año, en los meses de junio-julio. Por otro lado, en Vichada el periodo de temperaturas máximas altas tiene lugar desde diciembre hasta marzo, con máximo en febrero, mientras que el periodo de temperaturas máximas bajas se presenta desde abril hasta noviembre, con mínimos a mitad de año, en junio-julio (Hurtado M., 2010).

Además, la economía de la región se basa especialmente en el sector primario, enfocado hacia la obtención de recursos de la naturaleza, siendo la ganadería, la minería y la agricultura las actividades principales. La ganadería es una de las principales fuentes de la economía del área, dicha zona resulta muy útil para el desarrollo de esta actividad gracias a que el ecosistema presente con extensas llanuras y sabanas cubiertas de pastos que son un alimento esencial para el ganado. Los departamentos que aportan un alto porcentaje a la economía de la región en cuanto a la ganadería son el Meta, Casanare y Arauca. A parte de la crianza del ganado vacuno en cantidad masiva también se hace con los caballos siendo esta región muy popular también por la crianza de estos, además tras la crianza de estos animales, del cual se logra producir leche y carne.

Por otro lado, la explotación minera es uno de los sectores económicos que en los últimos años ha tenido aumento, pues cada vez son más los pozos petrolíferos descubiertos en los departamentos de Arauca y Casanare, siendo las zonas más productoras de petróleo no solo de la región Orinoquia sino también de Colombia; lo cual convierte a este sector en uno de los que más aportan a la economía de los llanos orientales y del país. Así como el petróleo hay más yacimientos de otros recursos como sal y carbón, siendo igualmente una de las regiones con reservas de este tipo más importantes.

Esta actividad económica es otra de las que hacen parte de la economía de esta zona siendo una fuente de empleo importante para esta región del país ya que también va de la mano con las actividades de ganadería. Sí hablamos de agricultura estamos refiriéndonos a aquellas tareas mediante las cuales se producen alimentos, fibras y cebos, como el café, flores cortadas, bananos, arroz, tabaco, maíz, caña de azúcar, cacao en grano, semillas oleaginosas, plátano, hortalizas, entre otros. (Viloria, 2009)

En cuanto al régimen geotérmico de cualquier cuenca sedimentaria está determinado por el clima, las propiedades térmicas de las rocas y la fuerza e interacción de diversas fuentes de

calor y mecanismos de transferencia mediante los cuales el calor terrestre se transporta a la superficie. En ausencia de actividad volcánica y tectónica, las principales fuentes de calor en la cuenca no deformada de los Llanos son el calor que fluye hacia arriba desde el manto y el calor que se genera internamente por la desintegración de elementos radiactivos. Otras fuentes de calor, como los cambios de fase y las reacciones químicas, son menores. Los principales mecanismos de transferencia de calor en una cuenca sedimentaria son la convección mediante el movimiento de fluidos y la conducción. (Bachu et al., 1995)

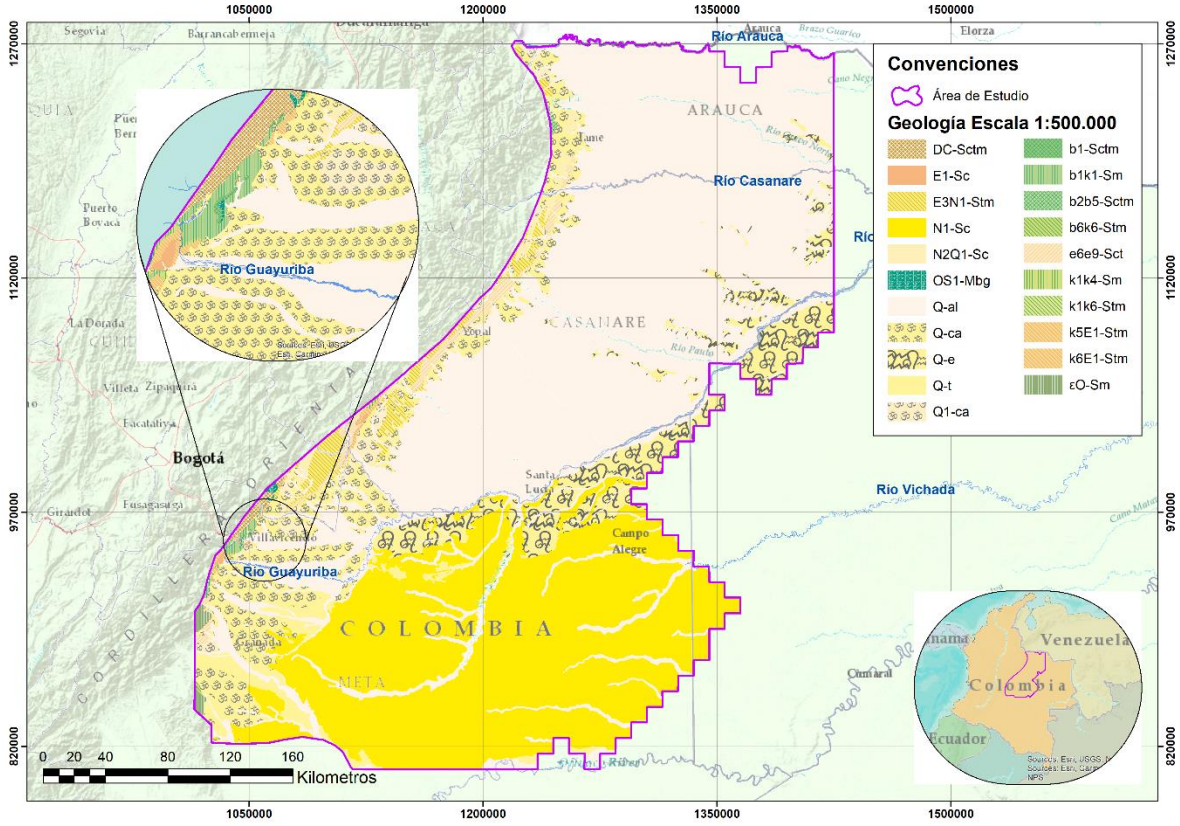
La cuenca de los Llanos, se relaciona estructural y estratigráficamente con las cuencas del Valle Medio del Magdalena y Cordillera Oriental, ya que comparten la misma historia geológica y los procesos que las originaron. Esta cuenca tiene origen durante el paleozoico en una cuenca de apertura en donde se forman fallas de tipo normal y se generan espacios de acomodación necesarios para que los sedimentos del Cretacico inicien su depositación; debido a los procesos que llevaron al levantamiento de las cordilleras, los sedimentos sufrieron una gran deformación debido a fallas como Guaicaramo, Yopal y el sistema de fallas Cusiana-Tamara y pliegues como los sinclinales de Nazareth y Nunchia, y el anticlinal del Guavio. En esta zona, se encuentran rocas del Cenozoico que registran el crecimiento del Orógeno de la Cordillera Oriental desde finales del Eoceno Este, el cual consiste principalmente de un relleno de rocas siliciclásticas procedentes de la erosión de la Cordillera Oriental al occidente y del escudo de la Guyana al oriente con un eje deposicional que migra en la cuenca (Duarte et al., 2017). La geometría de la cuenca y las relaciones de traslape de los estratos del Cenozoico sobre las rocas más antiguas, indican que la cuenca de los Llanos constituye un sistema de antepaís adyacente a un Orógeno, que corresponde a la Cordillera Oriental. Las fases de deformación y la configuración de las cargas tectónicas a lo largo de la Cordillera Oriental han cambiado durante el Maastrichtiano – Cenozoico. Los estratos del Maastrichtiano al Eoceno son registrados en la parte más occidental de la cuenca de los Llanos y en el piedemonte llanero (Bayona et al., 2008).

La cuenca es la última etapa de una compleja evolución multifásica que comenzó a más tardar en el Paleozoico. Se presenta un modelo de evolución de la cuenca del Paleozoico-Pleistoceno basado en un conjunto de datos sísmicos industriales regionales, bidimensionales, y observaciones de registros de pozos para la parte sur de la cuenca (Moreno-López & Escalona, 2015).

La Ilustración *4* se realizó con la información (Shapefiles) del mapa complilado de geología de Colombia donde se muestra la misma en una escala 1:500.000 realizada por el Servicio

Geológico Colombiano a partir de la recopilacion de los mapas geologicos a escala 1:100.000 y la union de dichas planchas fue armonizada por medio de imágenes Landsat, modelos digitales de elevación e imágenes de radar.

Ilustración 4. Mapa geológico cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales



Fuente: Elaboración propia

3.2. DATOS DISPONIBLES

Para el desarrollo del proyecto se utilizaron como insumos imágenes (ver tabla 3) del satélite Landsat 8 TIR que fueron adquiridas de forma gratuita en la página del Servicio

Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) *https://earthexplorer.usgs.gov/* y Modelos Digitales de Elevaciones MDE (DEM por su acrónimo en inglés) Alos Palsar con una resolución de 12,5 metros cuya descarga se realizó de por medio de la página de la Nasa Alaska Satellite Facility *https://search.asf.alaska.edu/#/* los cuales corresponden a dato abiertos.

3.2.1. Imágenes Landsat 8

Con el fin de cubrir en totalidad el área de estudio, se adquirieron 13 imágenes del sensor Landsat 8 TIR que fueron capturadas a finales del 2018 y principios del 2019 las cuales tienen una nubosidad inferior al 5%.

Tabla 3. Imágenes satelitales adquiridas

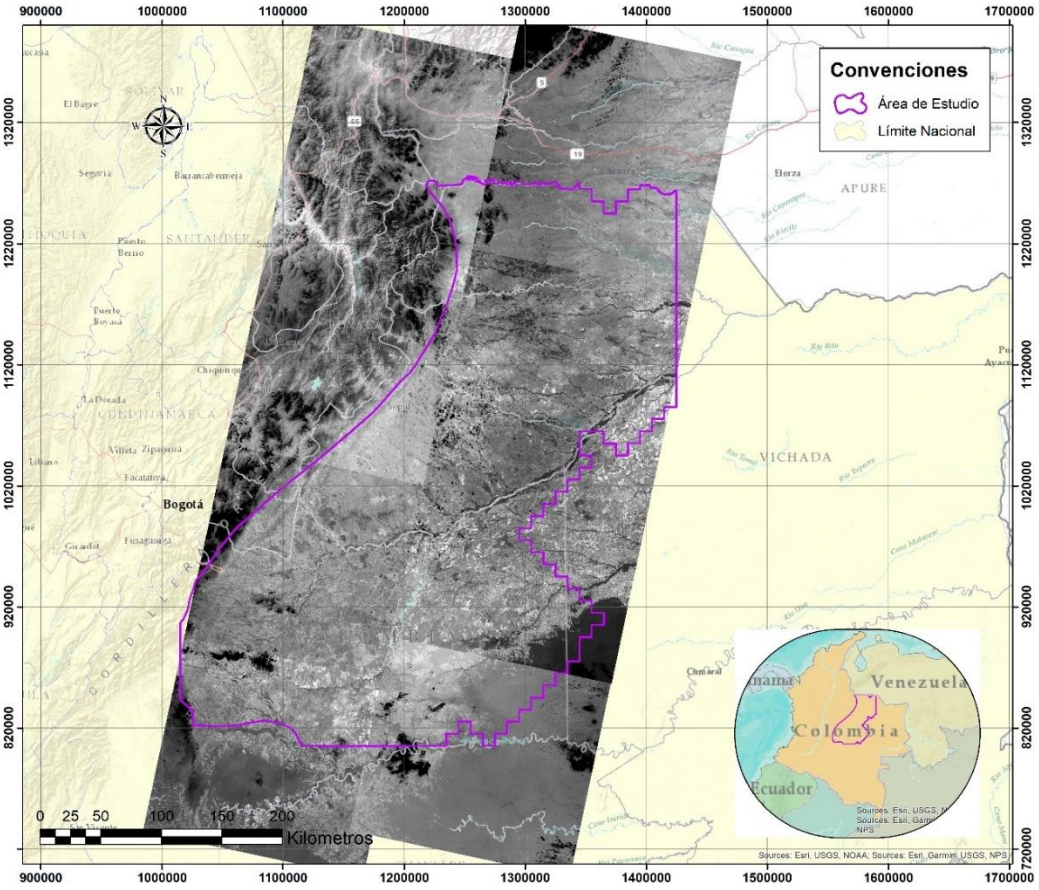
Imagen	Fecha de adquisición	Hora de adquisición
LC08_L1TP_004056_20180201_20180220_01_T1	1/02/2018	14:47
LC08_L1TP_004057_20180201_20180220_01_T1	1/02/2018	14:47
LC08_L1TP_005056_20180123_20180206_01_T1	23/01/2018	14:53
LC08_L1TP_005057_20180123_20180206_01_T1	23/01/2018	14:54
LC08_L1TP_005058_20180920_20180928_01_T1	20/09/2018	14:54
LC08_L1TP_006055_20180130_20180207_01_T1	30/01/2018	14:59
LC08_L1TP_006056_20180130_20180207_01_T1	30/01/2081	14:59
LC08_L1TP_006057_20180130_20180207_01_T1	30/01/2018	15:00
LC08_L1TP_006058_20180810_20180815_01_T1	10/08/2018	15:00
LC08_L1TP_007055_20181223_20190129_01_T1	23/12/2018	15:05
LC08_L1TP_007056_20190225_20190309_01_T1	25/02/2019	15:05

LC08_L1TP_007057_20190225_20190309_01_T1	25/02/2019	15:06
LC08_L1TP_007058_20190225_20190309_01_T1	25/02/2019	15:06

Fuente: (USGS, 2021)

En la Ilustración *5* se muestra la cobertura espacial de las imágenes Landsat 8 usadas durante el estudio sobre el límite del área de estudio.

Ilustración 5. Cobertura de las imágenes Landsat para la zona de estudio

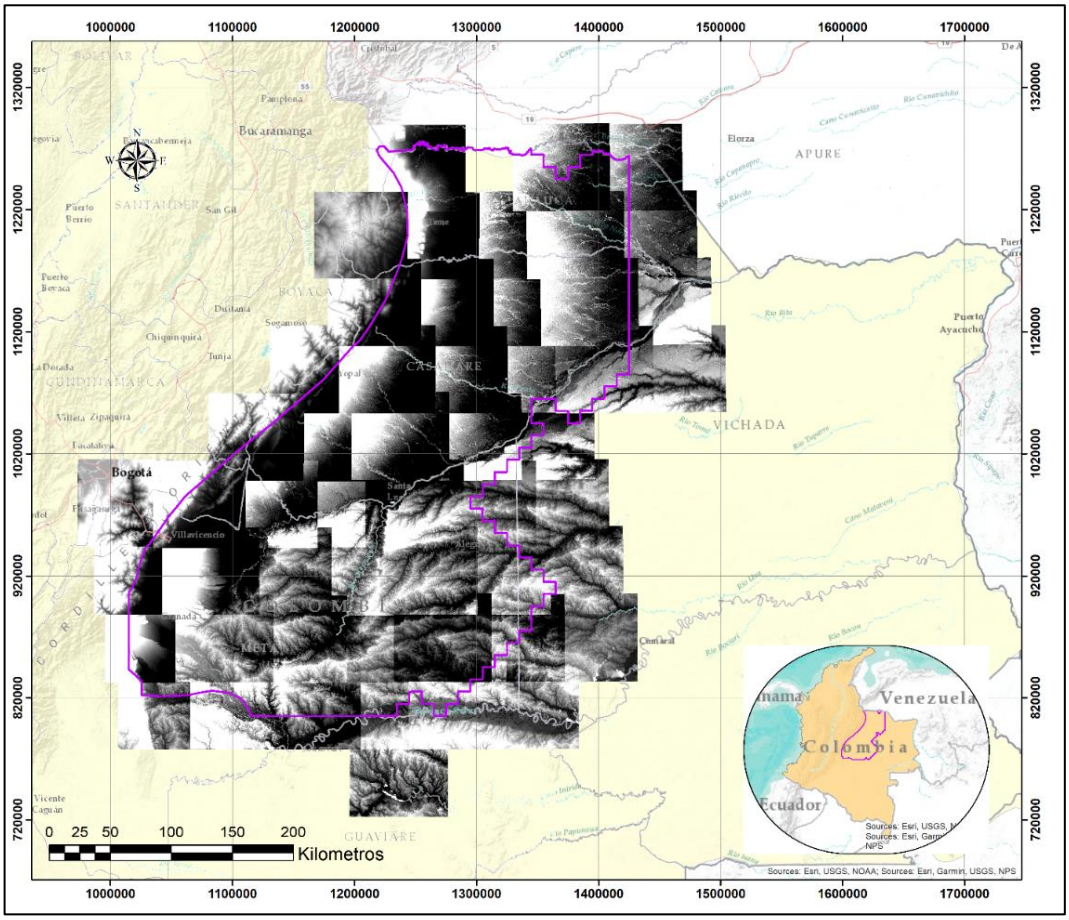


Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Modelos Digitales de Elevación

Debido a la gran extensión del área de estudio, se emplearon 50 MDE adquiridos por el satélite ALOS/PALSAR para los meses de mayo y junio del año 2010, cuentan con una resolución espacial de 12,5 metros y se encuentran en el sistema de coordenadas UTM Zona 18 Norte. Por medio de un mosaico en el cual se agrupan las diferentes imágenes para poder hacer un mejor manejo de ellas en el proceso de resultados. En la Ilustración *6* se muestra la cobertura espacial de los modelos digitales de elevación en el área de estudio

Ilustración 6. Cobertura de Modelos Digitales de Elevación en el área de estudio

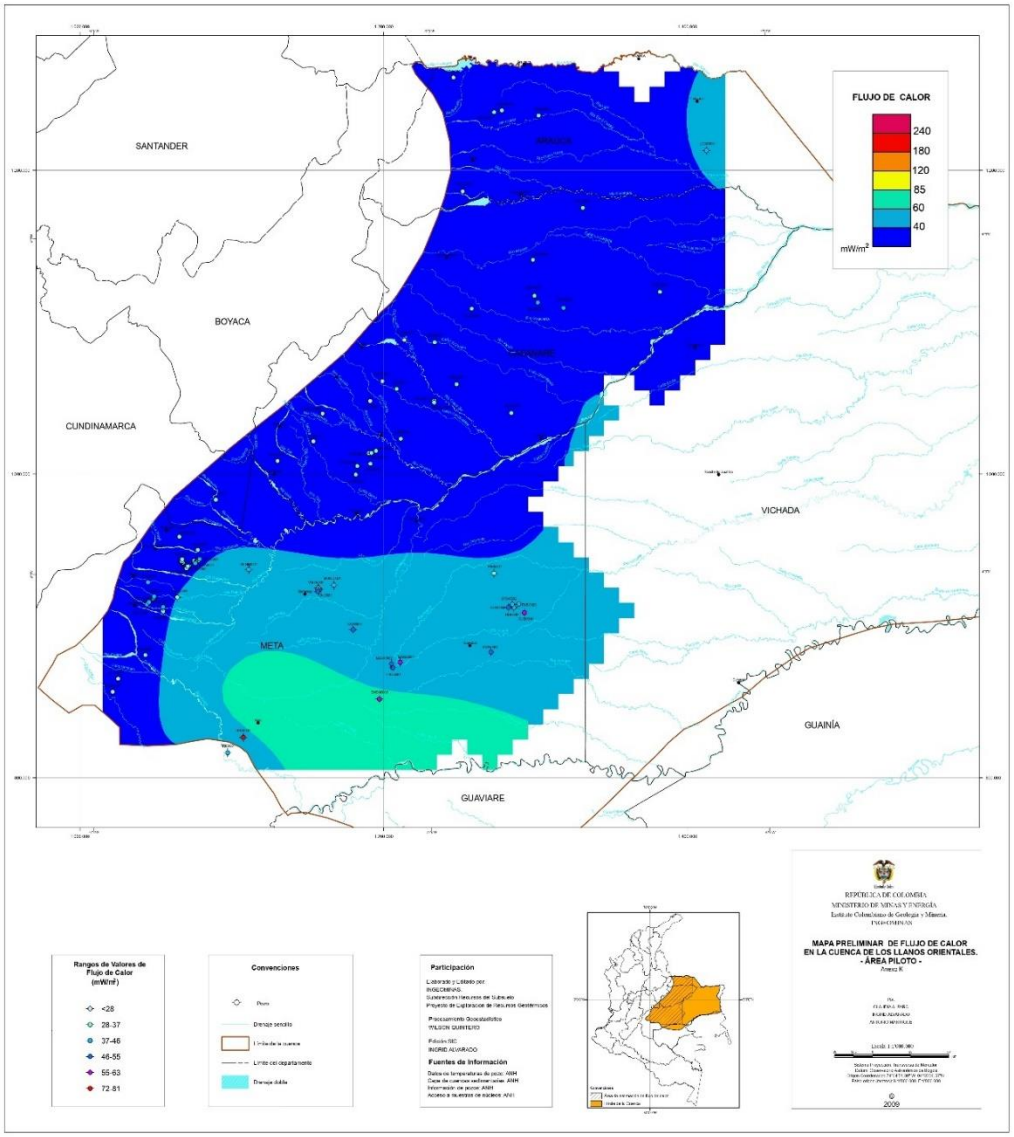


Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Mapa preliminar de flujo de calor en la cuenca de los llanos orientales

Se realizó la descarga del Mapa Preliminar de Flujo de Calor en la Cuenca de los Llanos Orientales elaborado por el Instituto Colombiano de Geología y Minas INGEOMINAS en el año 2009 donde se muestran los rangos del flujo de calor geotérmico en mW/m2 como se muestra en la siguiente ilustración.

Ilustración 7. Mapa preliminar de flujo de calor geotérmico de la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales



Fuente: (SGC, 2010)

3.2.4. Transmisividad atmosférica

Para el cálculo de la transmisividad atmosférica requerida en la estimación del flujo de calor radiativo, se implementó la calculadora de parámetros de corrección atmosférica de la NASA (ACPC por sus siglas en inglés) la cual, es una herramienta que se puede encontrar por medio de la página en la que se ingresa la información de las imágenes Landsat usadas: latitud y longitud media, fecha y hora de adquisición. En la Tabla *4* se recopilan los datos de la transmisividad atmosférica de cada una de las imágenes Landsat 8 usadas durante la metodología.

Tabla 4. Transmisividad atmosférica.

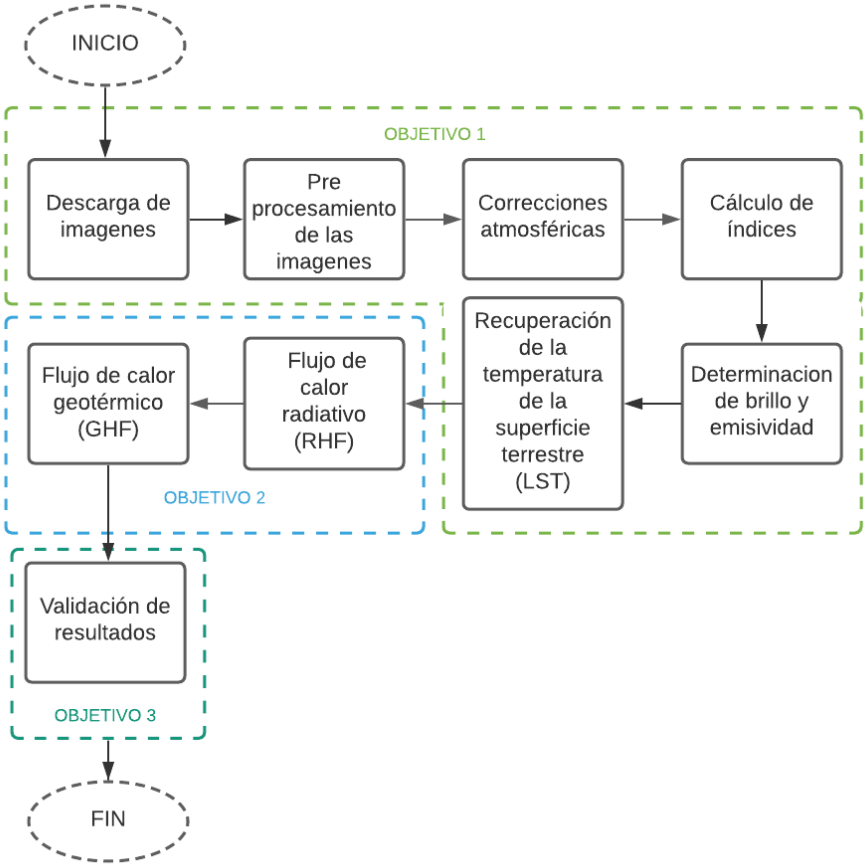
Imagen	Transmisividad Atmosférica
LC08_L1TP_004056_20180201_20180220_01_T1	0.53
LC08_L1TP_004057_20180201_20180220_01_T1	0.58
LC08_L1TP_005056_20180123_20180206_01_T1	0.59
LC08_L1TP_005057_20180123_20180206_01_T1	0.57
LC08_L1TP_005058_20180920_20180928_01_T1	0.51
LC08_L1TP_006055_20180130_20180207_01_T1	0.48
LC08_L1TP_006056_20180130_20180207_01_T1	0.64
LC08_L1TP_006057_20180130_20180207_01_T1	0.57
LC08_L1TP_006058_20180810_20180815_01_T1	0.60
LC08_L1TP_007055_20181223_20190129_01_T1	0.66
LC08_L1TP_007056_20190225_20190309_01_T1	0.54
LC08_L1TP_007057_20190225_20190309_01_T1	0.67
LC08_L1TP_007058_20190225_20190309_01_T1	0.57

Fuente: (Atmospheric Correction Parameter Calculator, 2021)

3.3. METODOLOGÍA

Los resultados alcanzados en esta investigación contienen: diseño, desarrollo, implementación y validación de la metodología para la estimación de flujo de calor geotérmico. Para el proyecto, se utilizará un diseño metodológico de carácter aplicativo tecnológico que permite un primer acercamiento al problema en cuestión. El tipo de investigación es de carácter cuantitativo. La metodología implementada para el desarrollo de este proyecto se encuentra representada en el siguiente diagrama de flujo, el cual agrupa las 3 fases aplicadas en el procesamiento de las imágenes insumo para el cumplimiento de los objetivos propuestos como se muestra en la Ilustración *8*.

Ilustración 8. Metodología del proyecto

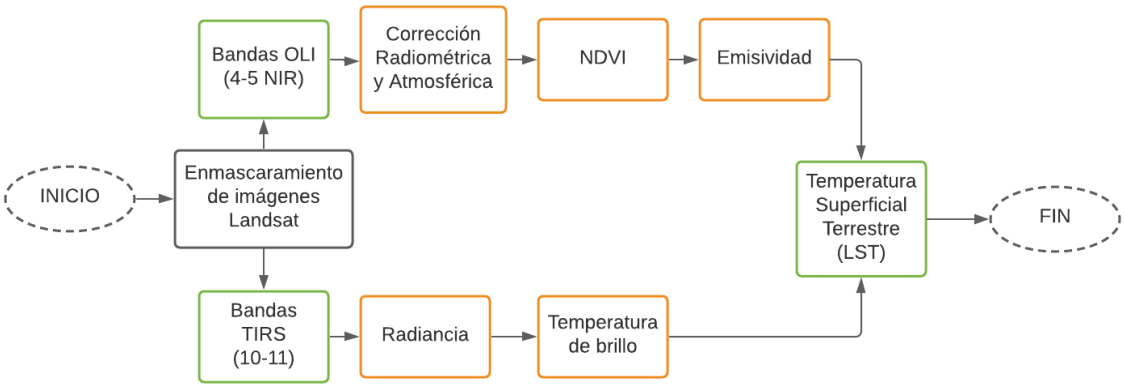


Fuente: Elaboración propia.

3.3.1. FASE 1

En esta primera fase se realizó el preprocesamiento de las imágenes Landsat para posteriormente aplicarle las correcciones atmosféricas con el fin de eliminar los efectos producidos por diferentes factores como la luz solar que incide en el sensor del satélite, asimismo se realizaron los cálculos de la radiancia, índice de vegetación, emisividad para determinar la temperatura superficial terrestre, dicho flujo de trabajo se puede ver en la ilustración 9 donde los recuadros de color verde indican que son insumos, los naranjas los resultados y los cuadros color gris los procesos, en el diagrama se observa paso a paso la obtención de cada producto para obtener el LST.

Ilustración 9. Flujo de trabajo, Fase 1



Fuente: Elaboración propia

3.3.1.1. Enmascaramiento de las imágenes

Se realizó el enmascaramiento de las imágenes Landsat 8, por medio del software ArcGIS con el objetivo de suprimir los bordes que no poseen información., asignándoles valores de 0. Este procedimiento se aplica para cada una de las bandas de las imágenes usadas en el estudio.

3.3.1.2. Correcciones atmosférica y radiométrica

Para convertir los valores digitales (ND valores crudos) de la imagen a magnitudes físicas de radiancia y reflectancia, se realizó la corrección radiométrica, previo a la obtención de los índices de vegetación.

Esta información fue transformada a través de una ecuación lineal y almacenada en una representación discreta de niveles digitales que tienen una escala artificial definida según las características de almacenamiento de cada sensor específico, por ejemplo: 8bits, 12bits y 16 bits, mientras que la corrección atmosférica busca recuperar la radiancia intrínseca del objeto de estudio, obtenida de la señal recibida por el sensor.

Para la aplicación de la corrección atmosférica, se generó una fusión entre la banda pancromática con las bandas 2, 3, 4, 5 y 7, con lo cual se buscaba mejorar la resolución espacial de cada banda de forma visual. Posteriormente, mediante el software ArcGis[2], se ingresó la información de las bandas teniendo en cuenta las características que se almacenan en los metadatos de cada una de ellas, los cuales se encuentran en la carpeta que se descarga conjunto cada imagen.

3.3.1.3. Cálculo del índice de vegetación normalizado (NDVI)

La determinación de los índices de vegetación implica efectuar una combinación matemática, entre los niveles digitales almacenados en dos o más bandas espectrales de la misma imagen. Estos índices están condicionados por cambios en el estado fisiológico de las coberturas vegetales, sus variaciones pueden ser utilizadas para estudios espaciotemporales del comportamiento de la vegetación. El cálculo del NDVI se realiza a partir de la resta entre la banda 5 y banda 4 sobre la suma de ambas bandas.

[2] ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica (SIG). ArcGIS permite publicar la información geográfica para que esté accesible para cualquier usuario. El sistema está disponible en cualquier lugar a través de navegadores Web, dispositivos móviles como smartphones y equipos de escritorio. (*¿Qué es ArcGIS? | ArcGIS Resource Center*, s. f.) Debido a que es un programa de procesamiento comercial, requiere licencia la cual brinda la Universidad Distrital Francisco José de Caldas para la realización del presente proyecto.

Teniendo en cuenta los rangos obtenidos con el NDVI, cuyos valores oscilan entre -1 y 1 con el se determina no solo el comportamiento de la biomasa vegetal sino también el de las coberturas terrestres en general, es por ello que con su aplicación se identificaron las zonas donde se cuenta con cuerpos de agua, suelo desnudo, zonas con alta o baja vegetación y nieve.

3.3.1.4. Emisividad

La emisividad se estimó a partir de la reflectividad y de la proporción de cubierta vegetal (Pv), obtenida a partir del NDVI. La porción de vegetación como parámetro de entrada en la estimación de emisividades se calcula a partir del NDVI con la Ecuación 14 y la emisividad con la Ecuación 12.

3.3.1.5. Radiancia

El cálculo de la radiancia se realizó teniendo en cuenta las constantes LMAX, LMIN, Qcalmax y Qcalmin bandas 10 y 11 que se encuentran dentro de los metadatos de cada una de las imágenes aplicando la Ecuación 5.

3.3.1.6. Temperatura de brillo

El cálculo de la temperatura de brillo incorpora los resultados obtenidos de radiancia con las constantes de calibración de cada banda K1 y K2 que se encuentran en el metadato de cada una de las imágenes, este archivo se encuentra en la carpeta que se descarga del servidor de la NASA, para ello se implementa la Ecuación 16.

3.3.1.7. Recuperación de la temperatura de la superficie terrestre (LST)

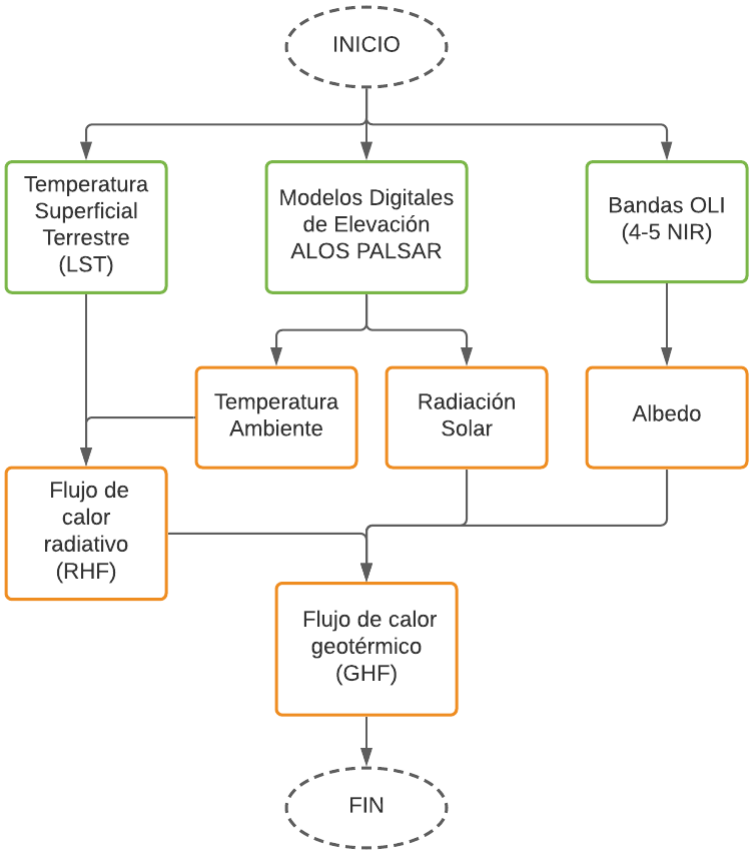
Para la estimación de la temperatura superficial terrestre se implementó la metodología descrita por Sobrino, 2004, donde se plantea la Ecuación 17.

3.3.2. FASE 2

Una vez se obtuvo el LST como resultado de la fase 1 se realiza el cálculo la temperatura ambiente por medio de los modelos digitales de elevación para luego determinar el flujo de calor radiativo, con ayuda de los DEM se estima la radiación solar promedio del día, posteriormente se calcula el albedo que es el insumo final para la determinación del flujo de calor geotérmico.

En la Ilustración *10* se muestra el diagrama de trabajo empleado durante la fase 2 de la metodología.

Ilustración 10. Flujo de trabajo, Fase 2



Fuente: Elaboración propia

3.3.2.1. Temperatura ambiente

La temperatura ambiente se determinó a partir del Modelo Digital de Terreno teniendo en cuenta la metodología de Eslava, 2012, en la cual se realiza la siguiente operación aritmética:

$$T_a = 28.1 - (0.00553 * Altura\ DEM) \qquad \textit{(Ecuación 25)}$$

3.3.2.2. Flujo de calor radiativo (RHF)

El cálculo de flujo de calor radiativo, se realizó pixel por pixel a partir de la Ecuación 3 formulada por Stefan–Boltzmann, en la cual se tiene como parámetros la transmisividad atmosférica, la constante de Stefan-Boltzmann dada en el sistema internacional $5.6704 \cdot 10^{-8} \frac{W \cdot K}{m^2}$, la emisividad previamente calculada, el área de la superficie, la temperatura superficial calculada en el pasó anterior y la temperatura ambiente

3.3.2.3. Corrección Geoidal

La corrección geoidal se le aplico al DEM con el fin de convertir las alturas elipsoidales a alturas ortométricas. Para ello, se implementó la Ecuación 19 teniendo como insumo un mosaico realizado con cada imagen ALOS PALSAR y el geoide WGS84 que viene por defecto dentro del software ArcMap de ArcGis; a este geoide se le realizó un recorte acorde a la zona de estudio y se ajustó su tamaño de pixel de 12.5mx12.5m a 30m x 30m para realizar el cálculo homogéneamente y evitar errores en el procesamiento de los pixeles.

3.3.2.4. Áreas de Radiación Solar

Por medio de métodos de algoritmo de cuenca visual hemisférica integrados al software ArcGis, los cuales se basan en los fundamentos formulados por Rich se realizó el cálculo de la radiación solar del área de estudio, para lo cual, se elaboró un corte al mosaico con los modelos digitales de elevación (DEM) ALOS PALSAR que fueron capturados durante el mismo día, esto debido a que la herramienta utiliza como parámetros el día en que comienza y el día que finaliza la toma. Los resultados obtenidos equivalen a la radiación solar total acumulada en el día, dada en $\frac{W}{m^2}$ por lo que se realizó un promedio de la radiación solar con el fin de obtener un resultado acumulado durante una hora.

3.3.2.5. Albedo

Se realizó el cálculo del albedo considerando que las bandas del sensor permiten convertir de forma eficaz los albedos de banda estrecha en banda ancha, a partir de la siguiente ecuación lineal:

$$\alpha = 0.356\alpha_1 + 0.130\alpha_3 + 0.373\alpha_4 + 0.085\alpha_5 + 0.072\alpha_7 - 0.0018 \qquad \textit{(Ecuación 26)}$$

cual fue modificada, teniendo en cuenta la equivalencia de las bandas de Landsat 7 a Landsat 8 debido a que la ecuación anterior fue diseñada inicialmente para el Landsat 7, de la siguiente manera:

$$\alpha = 0.356\alpha_2 + 0.130\alpha_4 + 0.373\alpha_5 + 0.085\alpha_6 + 0.072\alpha_7 - 0.0018 \qquad \textit{(Ecuación 27)}$$

3.3.2.6. Flujo de calor geotérmico (GHF)

Finalmente se estimaron los valores de GHF, teniendo en cuenta la Ecuación 2, con los valores de albedo, radiación solar y RHF calculado anteriormente.

3.3.3. FASE 3

3.3.3.1. Validación

Para la validación de los resultados se realizó la digitalización de la información obtenida por el Servicio Geológico Colombiano convirtiendo el shapefile obtenido en un archivo raster con un tamaño de pixel de 30m X 30m y la misma área de extensión con el fin de generar una correcta comparación con los resultados obtenidos. Para la correlación se implementó el software SAGA[3], el cual, además de permitir obtener la correlación, genera

[3] SAGA es la abreviatura de System for Automated Geoscientific Analyzes, es un software de Sistema de Información Geográfica (GIS) y ha sido diseñado para una implementación fácil y efectiva de algoritmos

un modelo de regresión líneal y el histograma correspondiente, el cual permite analizar el comportamiento de los resultados obtenidos.

espaciales. El primer objetivo de SAGA es brindar a los (geo-) científicos una plataforma eficaz pero fácil de aprender para la implementación de métodos geocientíficos. Esto se logra mediante la interfaz de programación de aplicaciones (API) exclusiva de SAGA. El segundo es hacer que estos métodos sean accesibles de una manera amigable para el usuario, lo que se hace en primer lugar mediante su Interfaz Gráfica de Usuario (GUI). SAGA viene con un conjunto completo de módulos gratuitos, no todos estos módulos son herramientas de análisis o modelado altamente sofisticadas. Muchos módulos realizan operaciones de datos bastante simples. Pero varios de estos módulos representan el estado del arte en análisis geocientífico. Funciona con los sistemas operativos Windows y Linux. (SAGA - System for Automated Geoscientific Analyses, s. f.)

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos luego del procesamiento realizado. Se tienen dos productos finales, el flujo de calor radiativo calculado para la zona de estudio y el flujo de calor geotérmico, objetos de validación con la información obtenida del Servicio Geológico Colombiano. Estos se presentan siguiendo el desarrollo de la metodología planteada anteriormente.

4.1. Índice de vegetación normalizado.

La aplicación del índice de vegetación normalizado, o por sus siglas en ingles NDVI, en el estudio se hace con el fin de identificar las diferentes coberturas presentes en el área de estudio, debido a que cada una de ellas puede hacer que varie de forma significativa la temperatura que capta en sensor, dado que no es igual el nivel de radiación que emana una zona urbana a la que emana un cuerpo de agua o el bosque. Teniendo como base el shapefile de centros poblados descargado del DANE (Departamento Nacional de Estadistica) y el shapefile de drenajes dobles descargado del SIGOT se pueden identificar las zonas urbanas y los cuerpos de agua con el raster obtenido.

En la Tabla *5* se muestra la clasificación del índice de vegetación presentada por Merg et al, 2011 teniendo en cuenta cada tipo de cobertura:

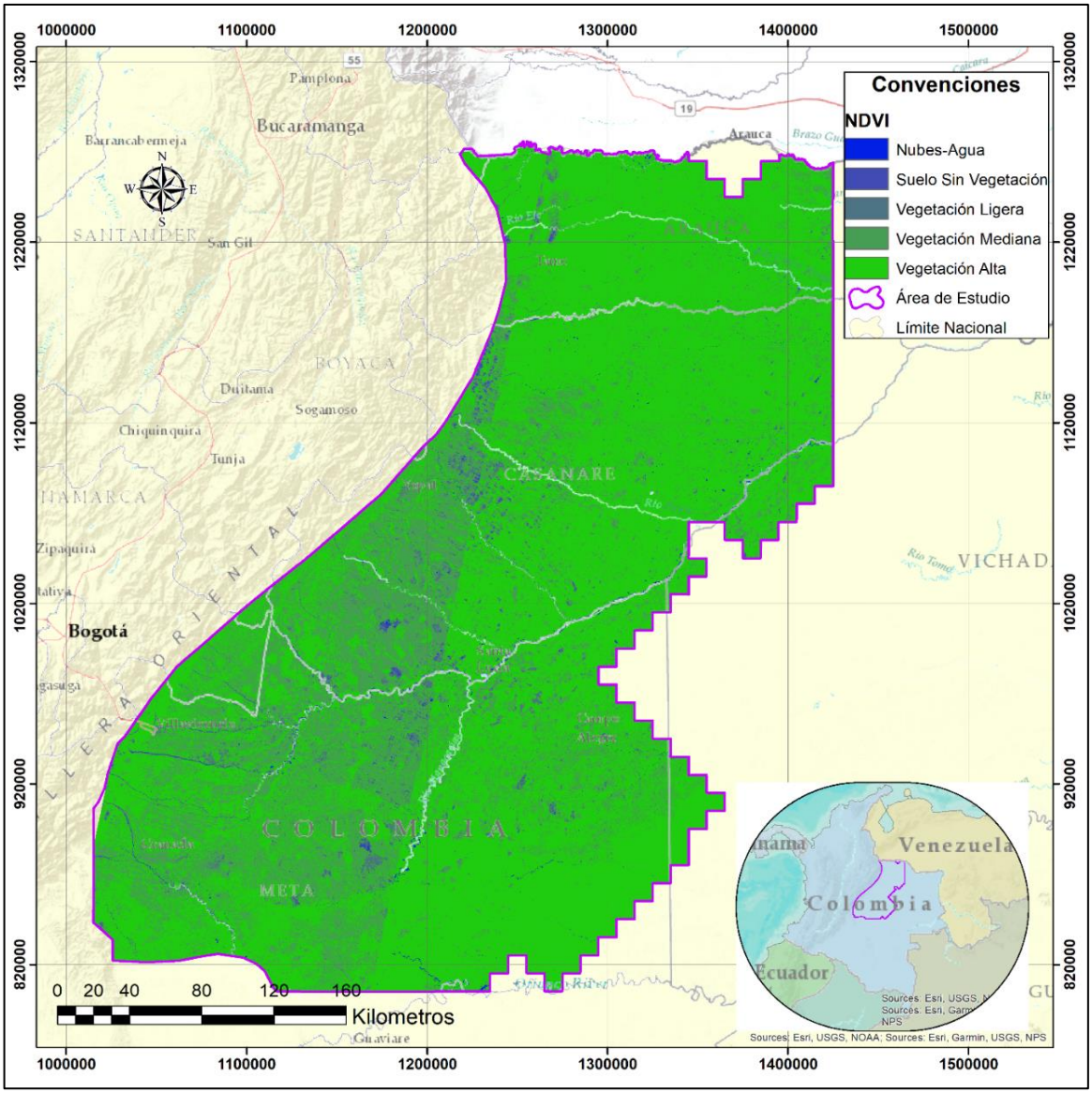
Tabla 5. Clasificación índice de vegetación

Clasificación	Valor
Nubes y agua (NA)	<0.01
Suelo sin vegetación (SV)	0.01-0.1
Vegetación ligera (VL)	0.1-0.2
Vegetación mediana (VM)	0.2-0.4
Vegetación Alta (VA)	>0.4

Fuente: (Merg et al., 2011)

En la Ilustración *11* se puede observar que el índice de vegetación obtenido para la zona de estudio muestra que en general se cuenta con cerca de 80% del área de cobertura por vegetación alta, mientras que la vegetación leve y moderada se concentra cerca de la zona central de la zona de estudio debido la alta presencia de cultivos, centros poblados y pastos cortos.

Ilustración 11. Índice de vegetación en la zona de estudio

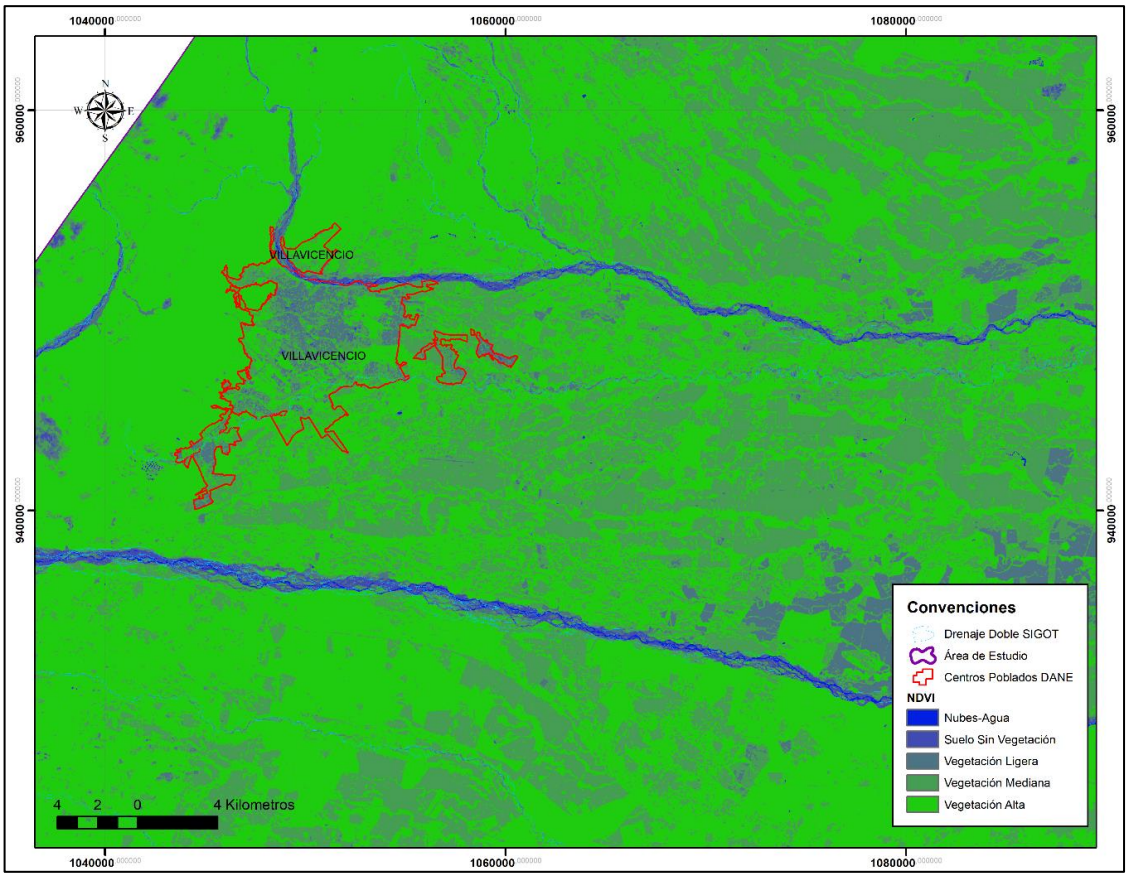


Fuente: Elaboración propia

Se pueden observar áreas urbanas como el casco urbano de la ciudad de Villavicencio, además de las zonas con alto índice de vegetación al occidente ya que se encuentra el Piedemonte llanero. Se evidencia como varia la cobertura del suelo después del casco urbano de la ciudad ya que la vegetación es menos densa presentando así zonas como pastizales propios del paisaje llanero donde se realizan la mayor parte de las actividades

ganaderas de la región como se puede observar en la Ilustración *12*.

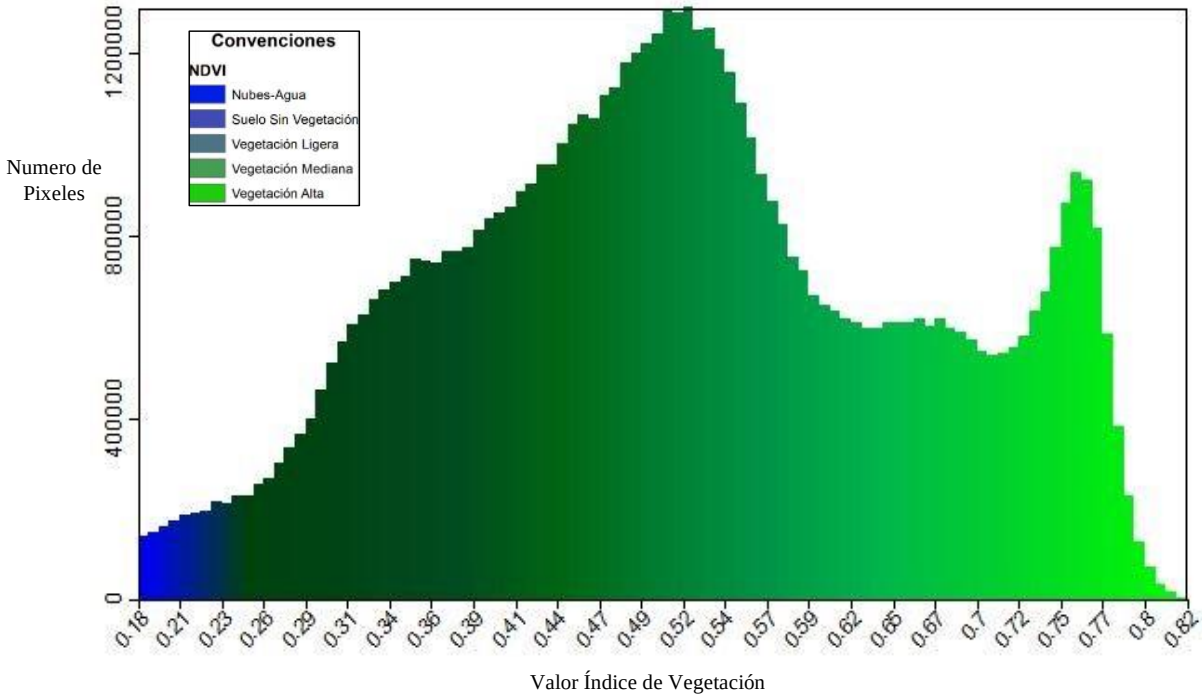
Ilustración 12. Visualización en la zona urbana del índice de vegetación



Fuente: Elaboración propia

En la Ilustración 13 se muestra el histograma obtenido del NDVI, en él se puede observar que el intervalo entre 0.49-0.52 tiene mayor frecuencia de pixeles en la imagen, dicho rango corresponde a la vegetación media tal como lo son pastizales, arbustos y cultivos en fase de germinación, mientras que los cuerpos de agua, zonas urbanas y suelos sin vegetación tiene menor participación en la imagen.

Ilustración 13. Histograma del NDVI



Fuente: Elaboración propia

4.2.LST

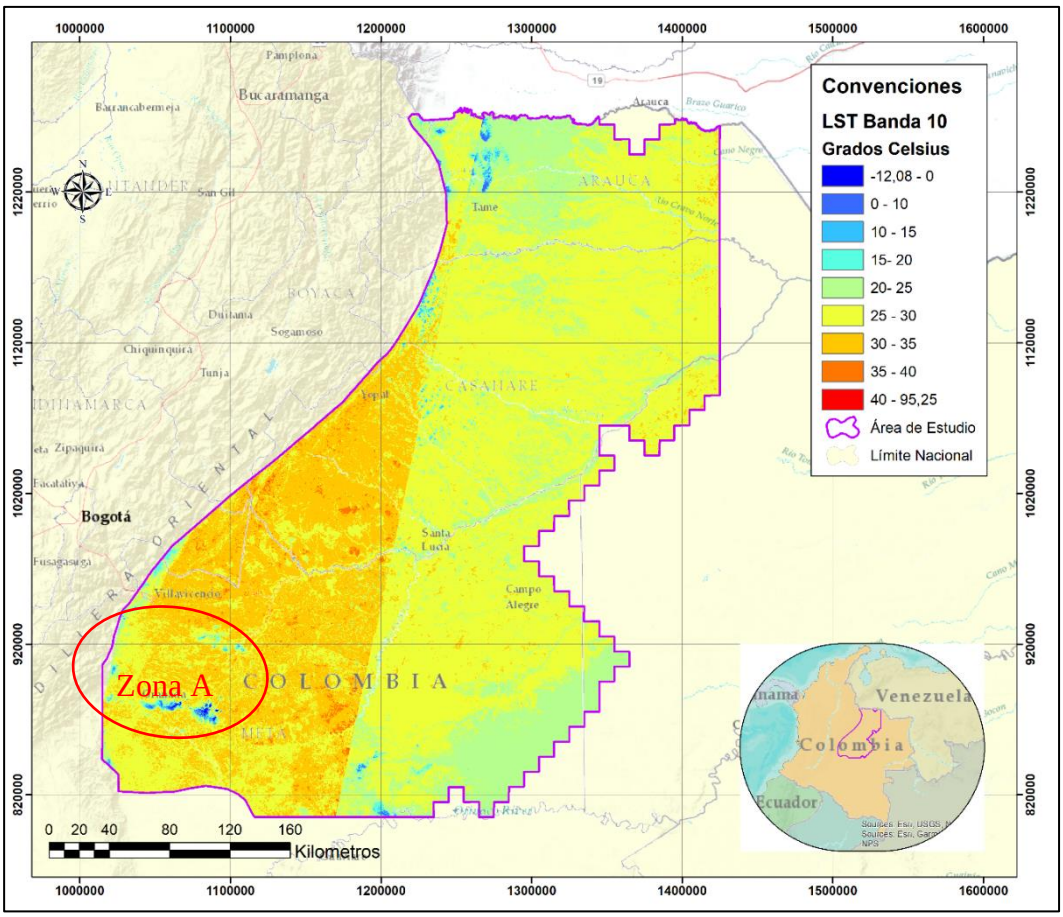
Teniendo en cuenta que la temperatura superficial del terreno es producto de la combinación entre la cobertura terrestre, la altura de la superficie y el desarrollo antropológico de las zonas urbanas es posible observar las grandes variaciones de esta, dadas las características propias de la zona objeto de estudio.

Considerando lo anterior, y las condiciones de la cuenca sedimentaria de los llanos orientales se puede apreciar variedad de paisajes, como lo son las llanuras y el pie de monte, así mismo cuerpos de agua de gran caudal, ciudades que están en constante desarrollo urbano como la ciudad de Villavicencio y diferentes tipos de cobertura terrestre que varían entre pastizales, zonas boscosas y suelo desnudo como se determinó con el resultado del NDVI. En el resultado obtenido de la temperatura superficial terrestre se

puede evidenciar como se presentan temperaturas más bajas en la parte occidental de la zona de estudio debido a que allí se encuentran alturas hasta los 3200 m.s.n.m.

En la Ilustración 14 se puede ver el comportamiento de la temperatura superficial obtenida con la banda 10, ella se muestra el valor del LST calculado para las coberturas indicadas anteriormente, la temperatura superficial que se obtuvo muestra variaciones entre los -12° C a los 95°C, donde áreas con poca densidad de vegetación muestran un mayor grado de temperatura como la zona urbana señalada como Zona A, mientras que zonas como drenajes cuentan con las temperaturas entre los 20 – 25 grados centígrados.

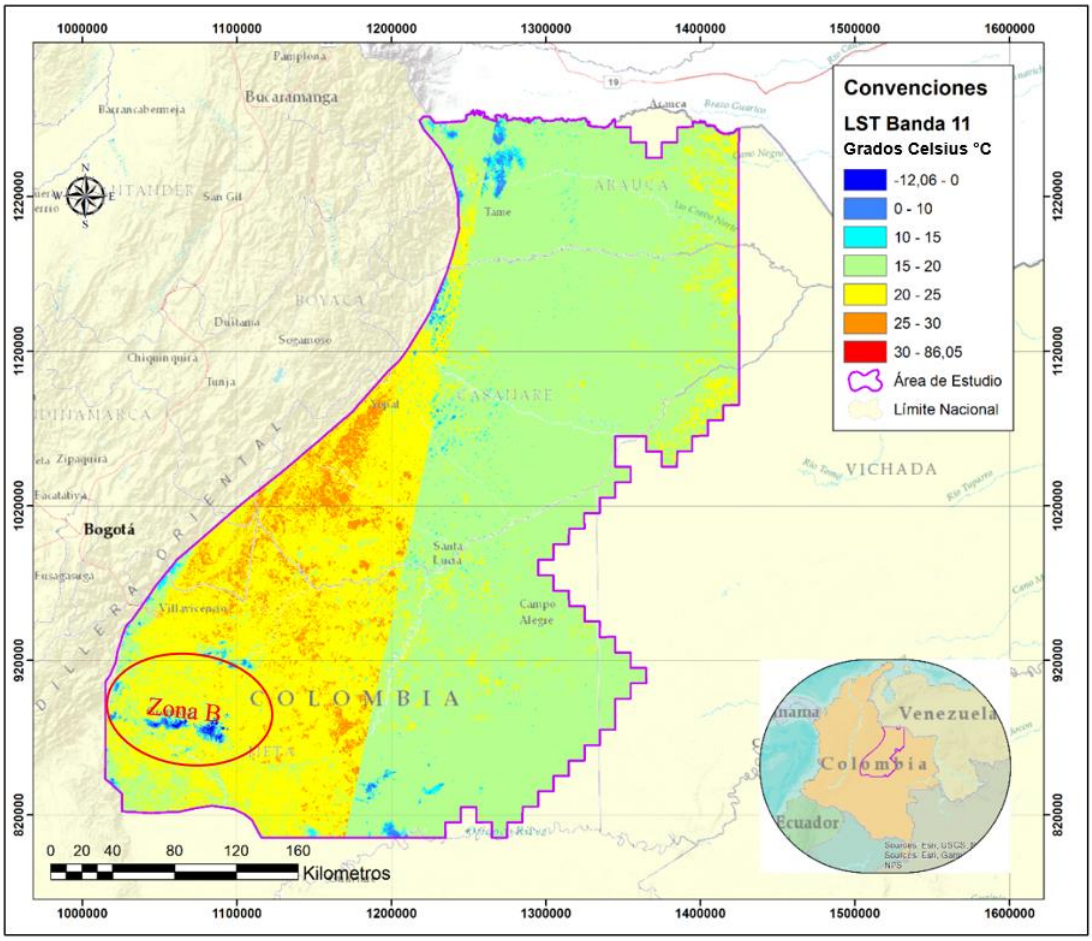
Ilustración 14. Temperatura superficial del suelo con la banda 10



Fuente: Elaboración propia.

La variación de resultados encontrados en la temperatura de la banda 10 y la banda 11 es baja, apenas se tiene una variación entre los 9°C como se observa en la Ilustración 15, donde se evidencia que en ambas bandas las coberturas tienen un comportamiento similar en cuanto al cálculo del LST.

Ilustración 15. Temperatura superficial del suelo con la banda 11



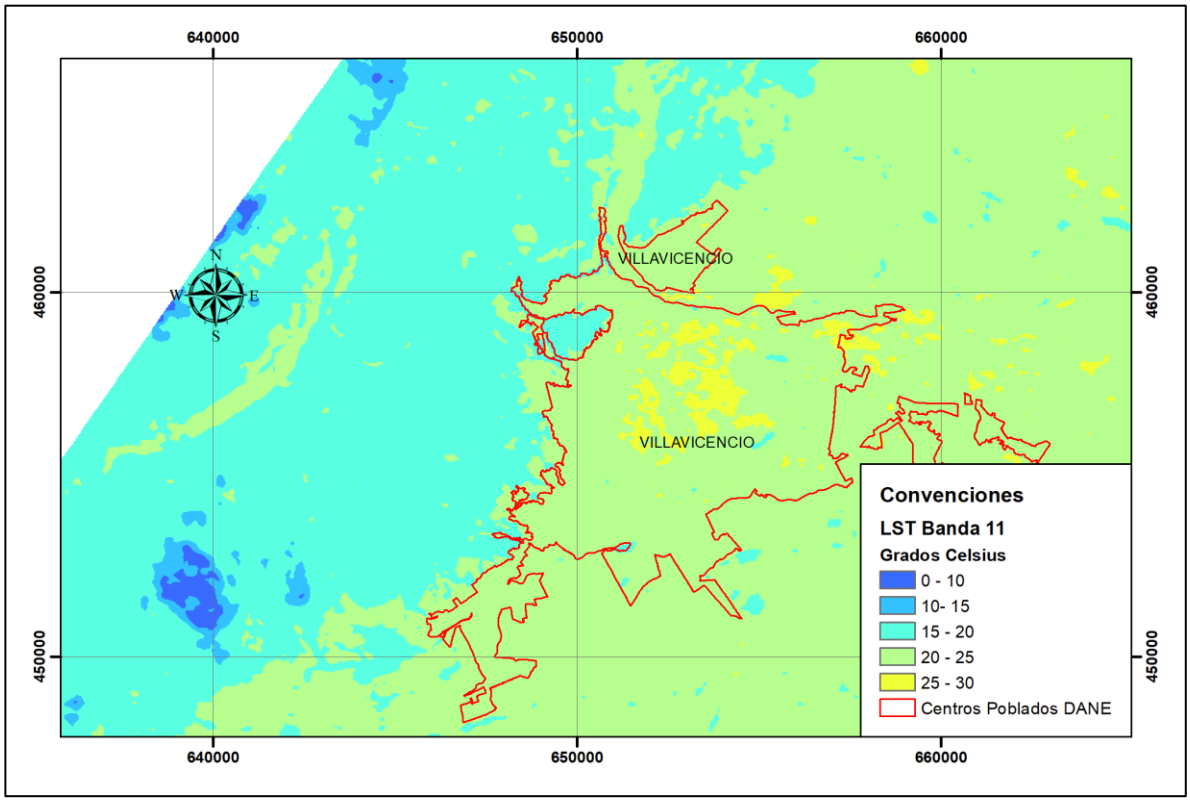
Fuente: Elaboración propia

Es de importancia aclarar que se encontraron resultados anómalos para los resultados obtenidos por medio de ambas bandas TIRS (10 y 11) debido a que marcan temperaturas

poco inusuales en la superficie terrestre, la zona B que se indica en la Ilustración *15*, muestra un intervalo de temperatura entre -12 – 0 grados Celsius, dicha área corresponde a las nubes presentes durante la toma de la imagen por lo que muestran temperaturas atípicas, mientras que el intervalo con temperaturas entre 30 – 86.05 grados Celsius muestran poca cantidad de pixeles en el resultado obtenido de temperatura esto se debe a errores de calibración las imágenes usadas para el procesamiento.

En la Ilustración 16 se hace un acercamiento a la zona urbana de la ciudad de Villavicencio, en ambas escenas se puede observar cómo se comporta la temperatura superficial en la zona del pie de monte (junto a la cordillera oriental) donde la temperatura tiene intervalos entre 10° y 20° C, esto debido a que es una zona con mayor elevación, por otra parte, el casco urbano muestra una mayor temperatura (20°-30° C) sobre todo en la zona norte y centro de la ciudad donde se encuentra la mayor parte de las construcciones, mientras que los cuerpos de agua presentan una temperatura media entre 20°-25° C esto debido a la gran carga de sedimentos que contiene.

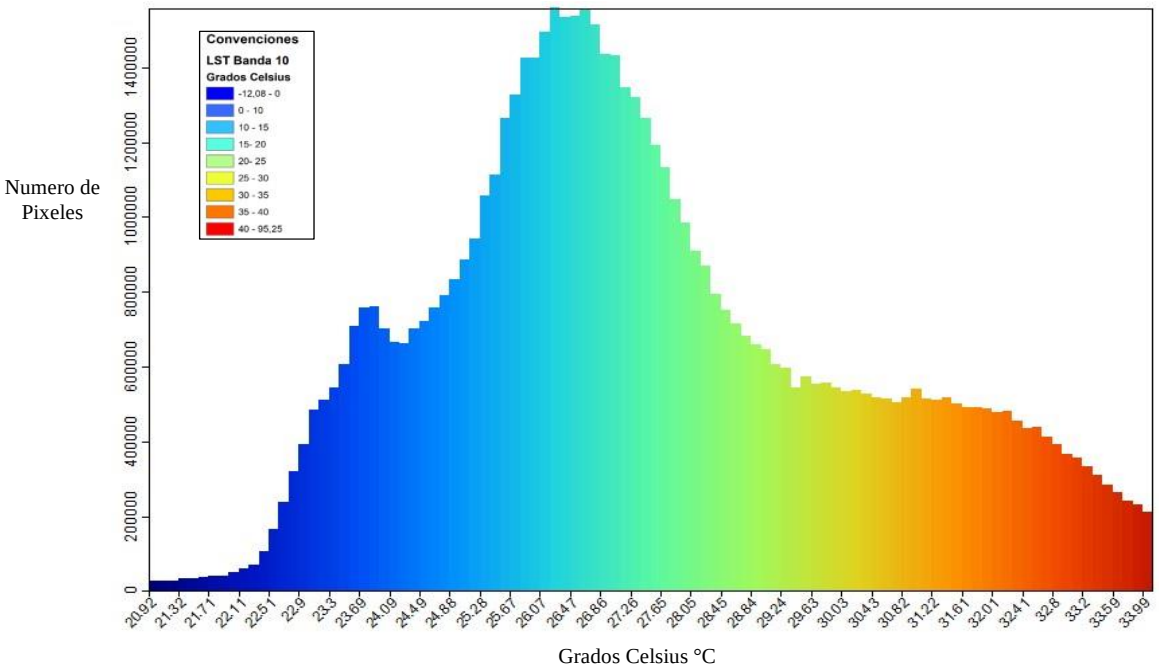
Ilustración 16. Visualización en la zona urbana para el LST



Fuente: Elaboración propia.

El histograma de la banda 10 presenta una gran cantidad de pixeles entre 25° a 27° C y menor cantidad para temperaturas inferiores a los 20° C, los datos atípicos encontrados en los resultados de la temperatura se pueden identificar con mayor facilidad en el histograma, donde los pixeles con valores de LST menores a 20.92°C no cuentan con un número mayor a 100 pixeles como se observa en la Ilustración 17.

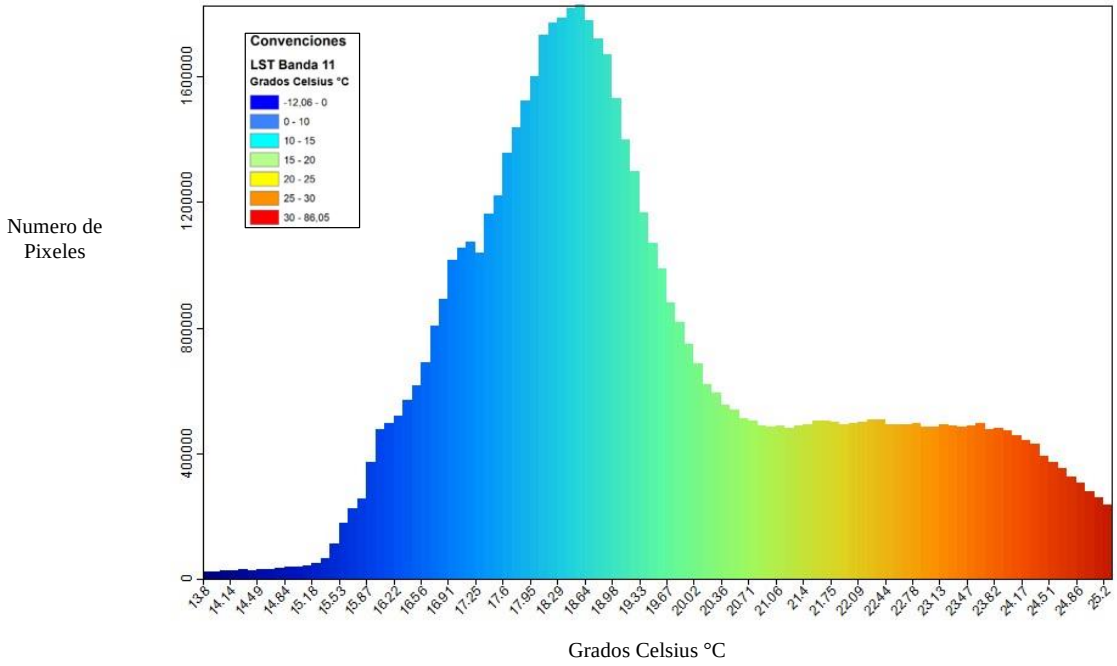
Ilustración 17. Histograma LST Banda 10.



Fuente: Elaboración propia.

El histograma de la banda 11 evidencia que el rango de temperatura, el cual se encuentra entre 17°C – 18° C tiene mayor frecuencia en la escena mientras que temperaturas inferiores a 13.8° C son menos evidentes como se evidencia en la Ilustración 18. A comparación al histograma obtenido con la banda 10 y con la banda 11, en el de la banda 10 se observa una mayor concentración de numero de pixeles en temperaturas más altas que las obtenidas por la banda 11, asimismo, que la temperatura más baja presentada en la banda 10 es de 20.92°C y los de la banda 11 13.8°C mostrando una variación de 7.1°C.

Ilustración 18. Histograma LST Banda 11.

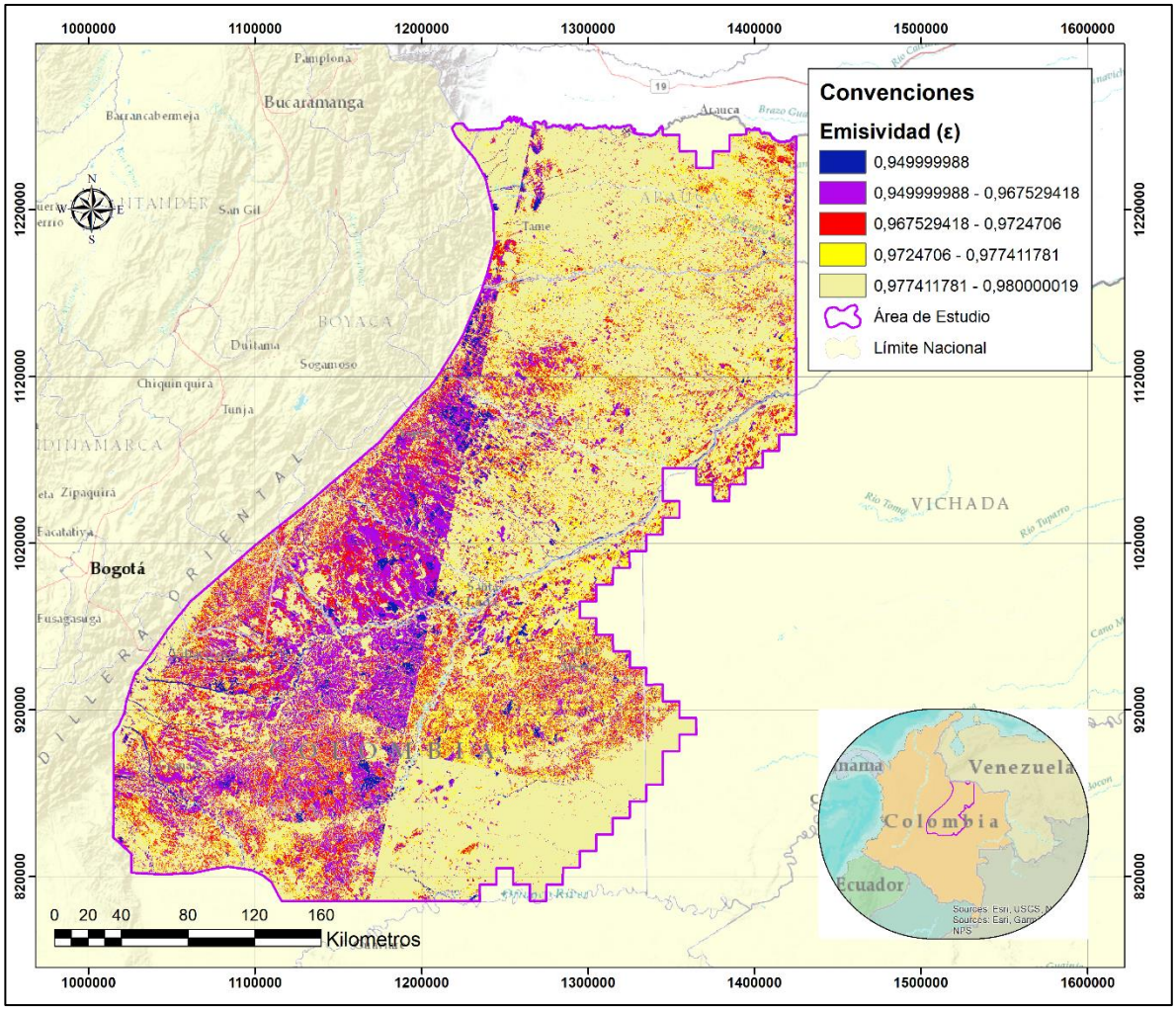


Fuente: Elaboración propia.

4.3.Emisividad

Teniendo en cuenta la Tabla *2* que muestra la clasificación de la emisividad según la cobertura del suelo, en el resultado obtenido de la emisividad se puede observar que la mayor parte de la zona de estudio cuenta con una emisividad entre 0.972 que representan los cultivos y parcelas, asimismo una gran presencia de un nivel de emisividad de 0.98 que muestra que la cobertura de la zona de estudio en la zona oriental son en su mayoría suelos desnudos o de vegetación poco densa como lo son los pastizales, por otra parte la zona demarcada como Zona C muestra niveles de emisividad de 0.96 identificando la zona urbana de la ciudad de Villavicencio como se puede ver en la Ilustración 19.

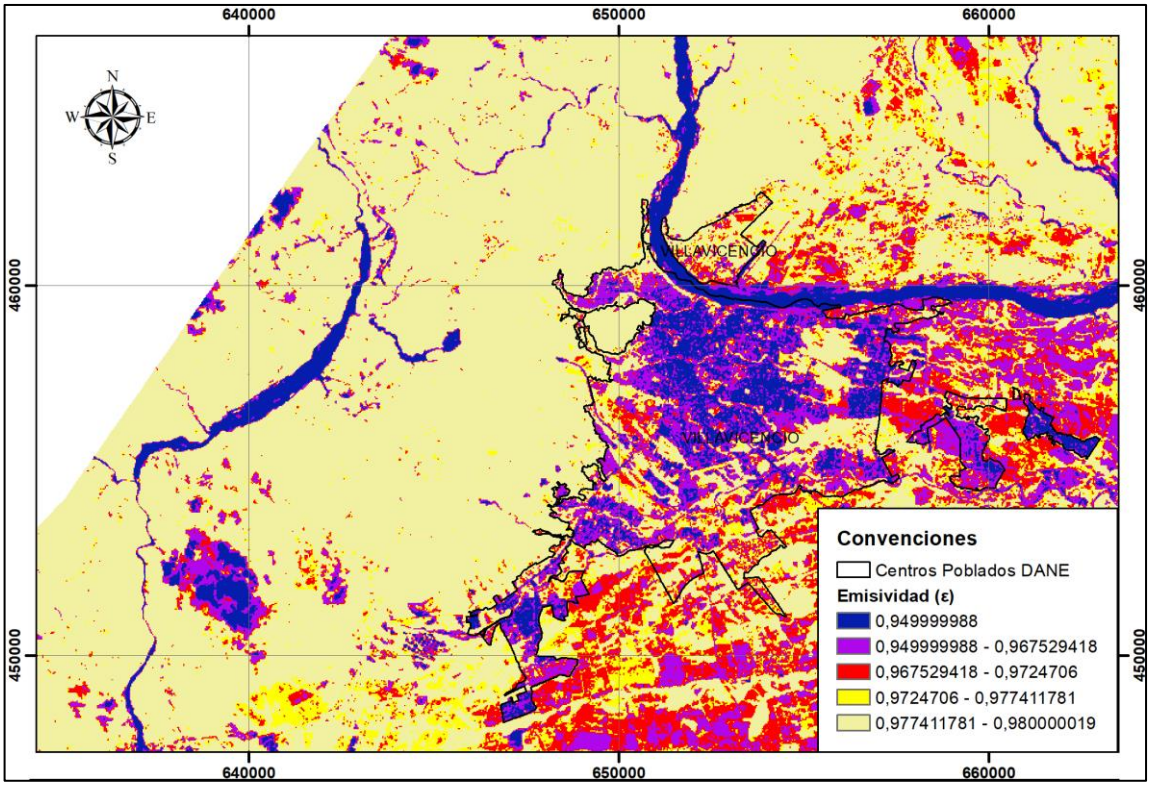
Ilustración 19. Emisividad de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia.

En detalle, zonas como las rondas de los ríos se comportan tienen un valor de emisividad bajo, debido a la gran cantidad de sedimentos presentes en el drenaje, así mismo, se puede diferenciar con facilidad la zona urbana, teniendo en cuenta que los materiales de la infraestructura de las construcciones presentan baja emisividad como se puede ver en la Ilustración 20.

Ilustración 20. Visualización en la zona urbana de la emisividad



Fuente: Elaboración propia.

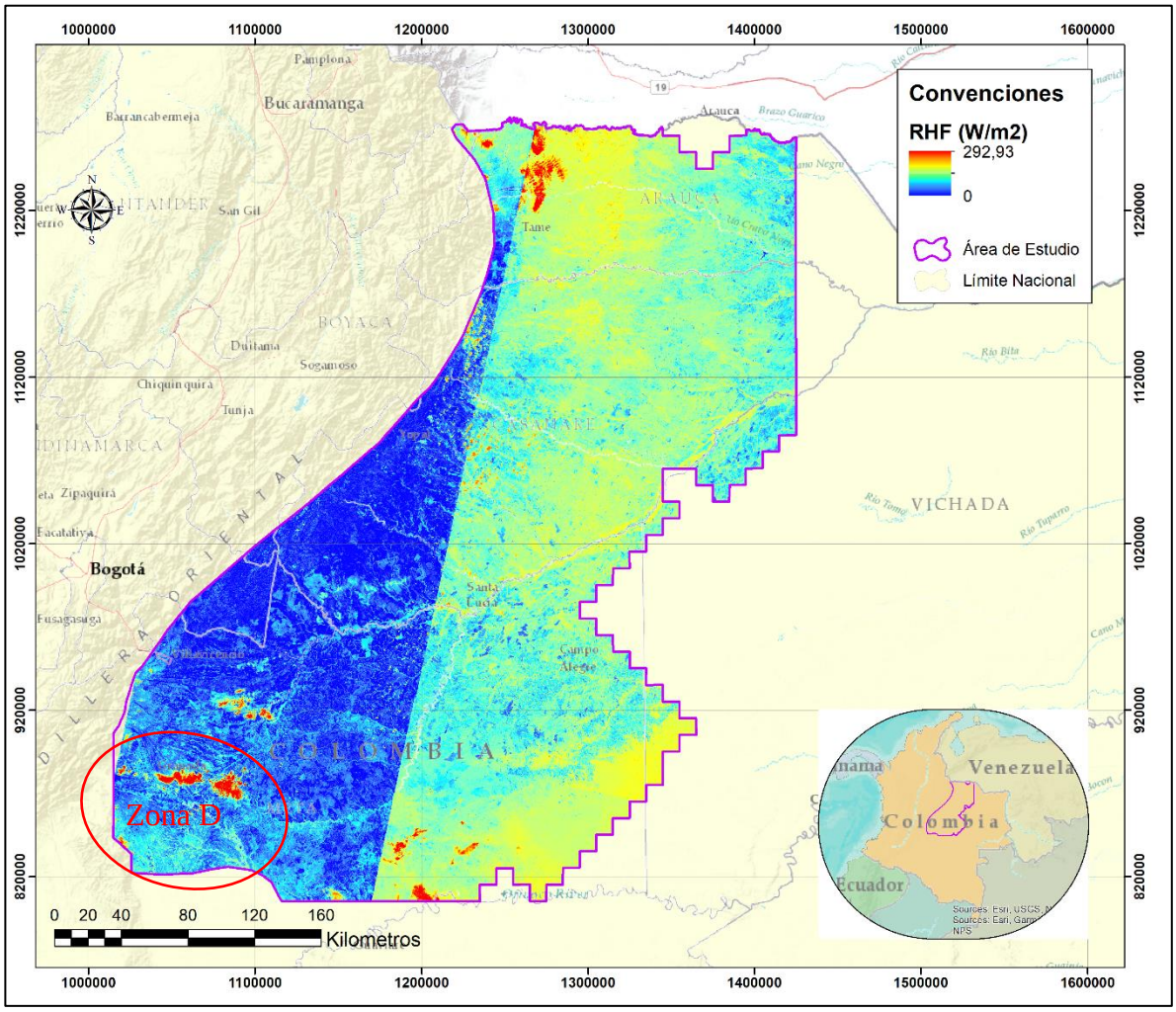
El cálculo de la emisividad muestra que cerca del 90% de los pixeles se encuentran con un nivel de emisividad del 0.97-0.98 lo cual indica que la cobertura es en su mayoría vegetación escasa mientras que coberturas como construcciones, bosques y cultivos cuentan con una muy poca cantidad de pixeles.

4.4.RHF

Los resultados del flujo de calor radiactivo permiten identificar preliminarmente las áreas de posible potencial geotérmico dado que este tipo de anomalías en la corteza terrestre se comportan de forma diferente al resto de las zonas, como se pueden identificar en la Ilustración 21 donde la zona D muestra anomalías altas que corresponde a las zonas con

nubes, mientras que el área de estudio en general tiene un comportamiento uniforme.

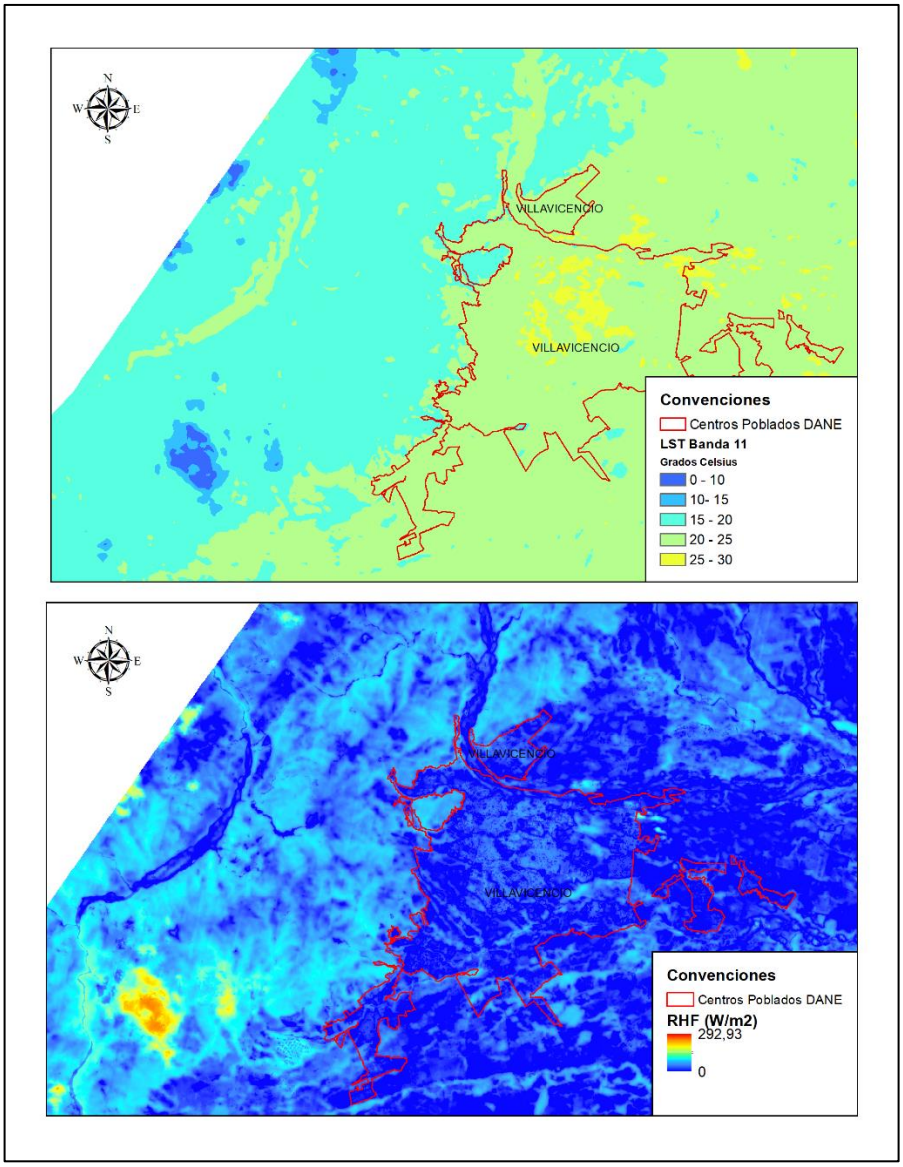
Ilustración 21. Flujo de calor radiativo en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Es así, que al realizar una comparación visual entre los resultados obtenidos con el RHF y el LST, se hace evidente la relación entre ellos, además que la zona de cordillera y pie de monte en la imagen del RHF presenta valores más bajos, de la misma forma que el LST anteriormente calculado como se muestra en la Ilustración 22.

Ilustración 22. Comparación LST y RFH



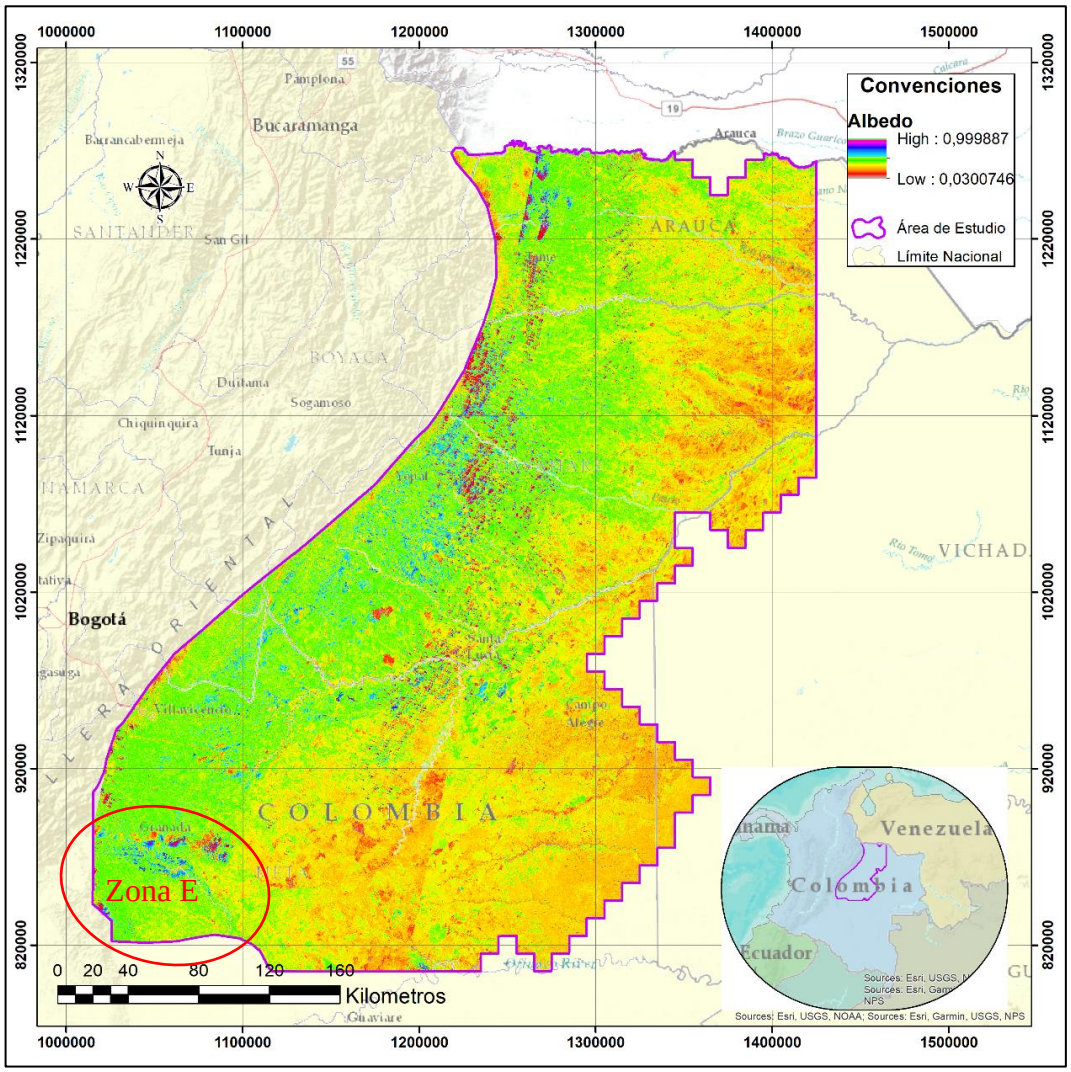
Fuente: Elaboración propia.

4.5.Albedo

Dado que el albedo indica el porcentaje de la energía disponible que refleja la superficie

terrestre, a partir de los resultados obtenidos reflejados en la Ilustración 23, se puede determinar que las zonas urbanas tienen un porcentaje del 17%, los cuerpos de agua poseen un 13%, del mismo modo que la ronda del rio, por otro lado, las islas dentro de él reflejan entre un 14%-15% y el suelo desnudo se encuentran entre un 18-19%. Los porcentajes más bajos de Albedo se encuentran en las pocas nubes que se presentan en la escena con un 3-5% mientras que las sombras que dichas nubes proyectan sobre el terreno con una reflectividad del 99% (zona E).

Ilustración 23. Albedo en la zona de estudio

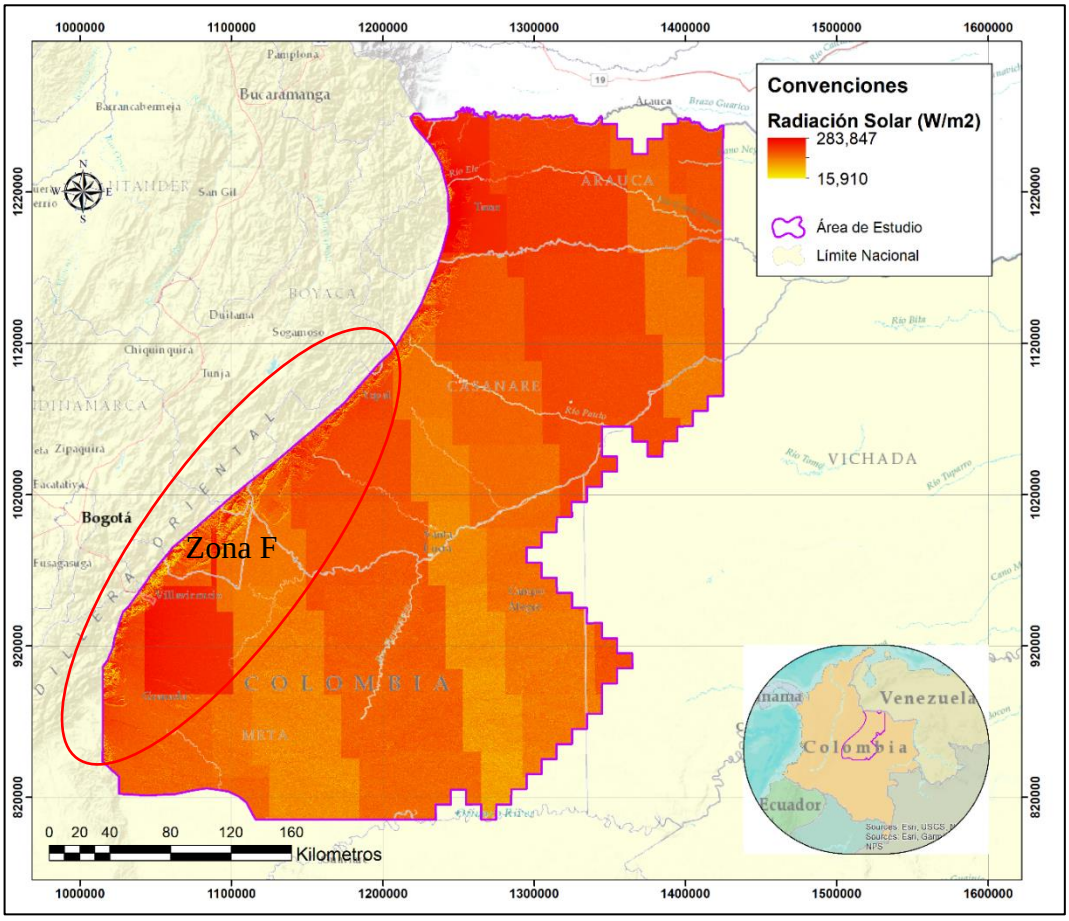


Fuente: Elaboración propia.

4.6.Radiación solar

Dentro del resultado obtenido se resalta como la topografía del lugar hace que la radiación solar varie, por ejemplo, la zona de la cordillera oriental (Zona F) presenta niveles de radiación considerablemente más bajos que los de la planicie como se observa en la Ilustración 24.

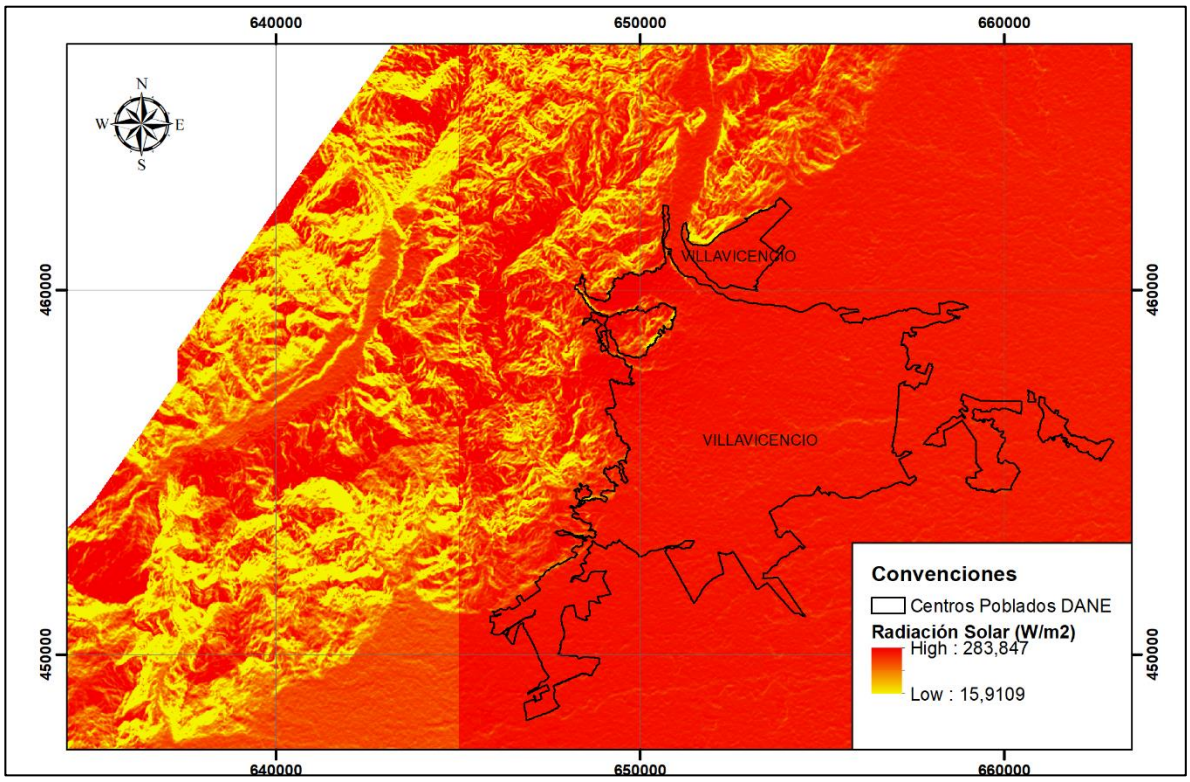
Ilustración 24. Radiación solar en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia.

En la Ilustración 25 se evidencia con mayor detalle la diferencia de radiación entre la topografía plana y la topografía montañosa, mostrando valores más bajos en la zona montañosa debido al relieve, lo cual genera que las laderas reciban la luz solar de forma diferente debido a su inclinación mientras que la zona plana muestra un comportamiento uniforme de radiación.

Ilustración 25. Visualización en la zona urbana de la radiación solar



Fuente: Elaboración propia.

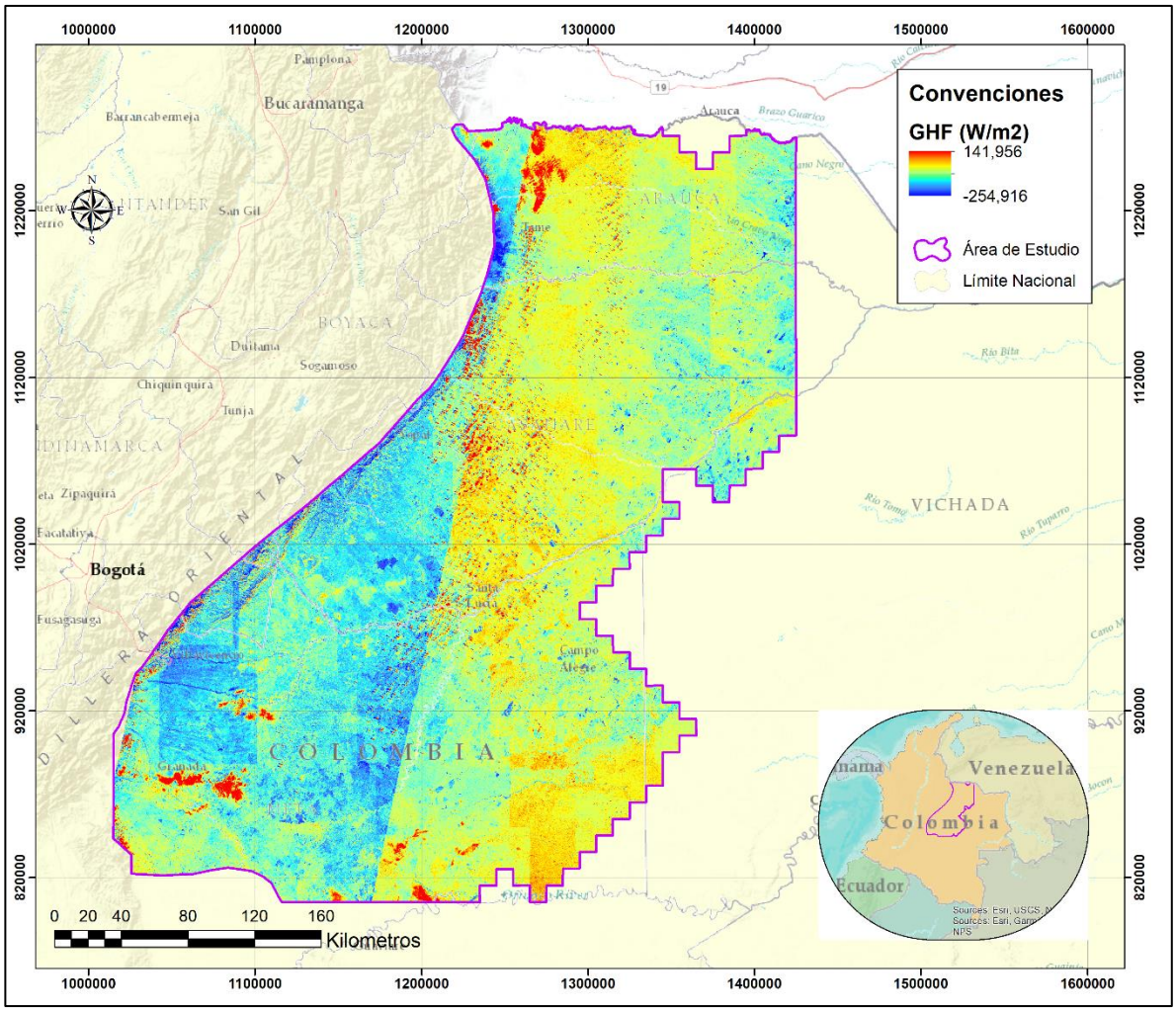
4.7.GHF

En el cálculo se puede observar la formación de áreas de anomalías similares a las presentadas en los resultados de temperatura superficial y el flujo de calor radiativo por lo que se sigue una constante delimitación de zonas con altos valores que aumentan hacía la zona oriental del área de estudio, esto debido a que se tiene diferentes condiciones del terreno que afecten de forma significativa a variables como la temperatura superficial y que

en realidad su entalpia sea más baja que la estimada por el modelo de percepción remota.

En la Ilustración 26 se muestra el resultado del GHF obtenido, en el cual se evidencia un comportamiento uniforme a lo largo del área de estudio, mostrando niveles atípicos en las zonas indicadas anteriormente por la presencia de nubes.

Ilustración 26. Flujo de calor geotérmico del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

4.8.VALIDACIÓN

La validación de los resultados obtenidos se realizó por medio de la aplicación del coeficiente de correlación de Pearson el cual se indica el grado de relación que existe entre dos variables, en este caso el GHF obtenido de la metodología y el GHF obtenido por el SGC, el nivel de relación se expresa en una escala numérica que va entre -1 y 1 donde cada intervalo muestra un nivel de correlación diferente como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Coeficiente de correlación de Pearson

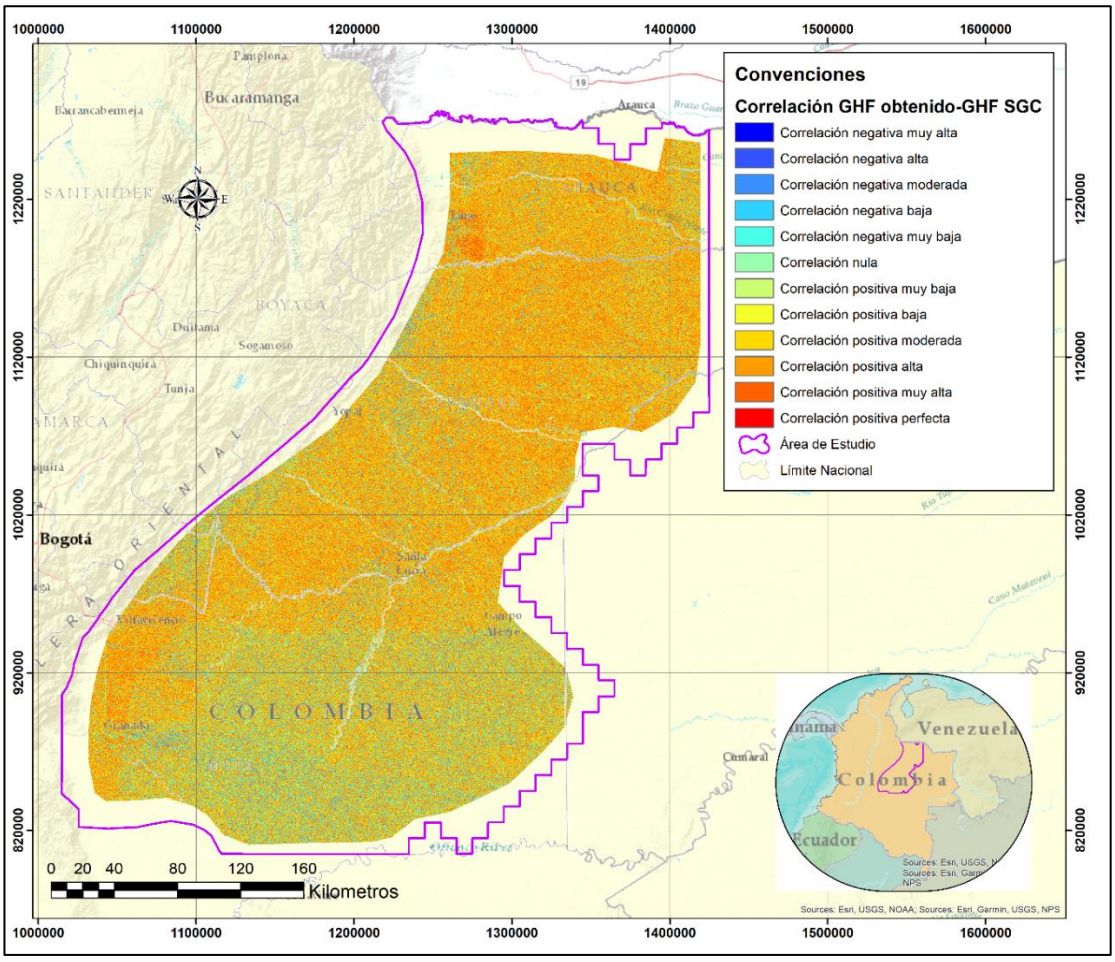
Significado	Valor
Correlación negativa perfecta	-1
Correlación negativa muy alta	-0.9 a -0.99
Correlación negativa alta	-0.7 a -0.89
Correlación negativa moderada	-0.4 a -0.69
Correlación negativa baja	-0.2 a -0.39
Correlación negativa muy baja	-0.01 a -0.19
Correlación nula	0
Correlación positiva muy baja	0.01 a 0.19
Correlación positiva baja	0.2 a 0.39
Correlación positiva moderada	0.4 a 0.69
Correlación positiva alta	0.7 a 0.89
Correlación positiva muy alta	0.9 a 0.99
Correlación positiva perfecta	1

Fuente: (Lind et al., 2012)

Esta validación se realiza con el fin de mostrar el nivel de similitud de ambos resultados y con ello mostrar una alternativa de estudio e investigación exploratoria de recursos geotérmicos a muy bajo costo, ya que si los resultados muestran un alto de nivel de similitud se puede determinar que la metodología empleada puede ser usada en nuevos sitios de interés geotérmico en Colombia que por diferentes motivos, ya sean económicos o por dificultad de acceso como zonas de grandes alturas como la región de la cordillera central, puedan ser investigadas por medio de sensores remotos.

Los resultados de la validación de los datos obtenidos de flujo de calor geotérmico con los datos que se obtuvieron del Servicio Geológico Colombiano mostraron una correlación positiva en cerca del 55% del área de estudio, un 15% de correlación positiva muy alta y un 6% con correlación positiva perfecta, evidenciando que en general existe una correlación directa de aproximadamente un 80%, con lo cual es posible inferir que existe una gran similitud entre los resultados obtenidos por la metodología del procesamiento digital de imágenes y con datos obtenidos en campo por el SGC como muestra la Ilustración 27.

Ilustración 27. Correlación GHF obtenido y GHF del Servicio Geológico Colombiano



Fuente: Elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

La metodología planteada permite estimar el flujo de calor geotérmico en la cuenca sedimentaria de los Llanos Orientales procesando las imágenes satelitales Landsat 8-OLI-TIRS, obteniendo así una correlación directa entre el GHF calculado y el GHF determinado por el SGC en un 80% del área de estudio; esta estimación, se realizó tomando como parámetro fundamental el cálculo de la temperatura superficial, la radiación solar y el flujo de calor radiativo. Los resultados obtenidos del GHF evidencian un comportamiento similar a la temperatura superficial, mostrando valores que aumentan hacía la zona oriental de la cuenca sedimentaria, asimismo no se encuentran grandes variaciones de flujo de calor mostrando que la cuenca tiene un comportamiento uniforme con pocos datos atípicos que pueden atribuirse a algunos errores encontrados durante el procesamiento de las imágenes, por lo cual se infiere que la aplicación de esta metodología, sería de utilidad a la hora de analizar el potencial geotérmico de una zona determinada, disminuyendo los costos de prefactibilidad de potenciales promotores de proyectos, aumentando el atractivo de la explotación geotérmica en el país.

La determinación de las anomalías de temperatura superficial es posible gracias a la implementación del índice de vegetación normalizado calculado a partir de las imágenes satelitales, esto debido a que como parámetro principal en el procesamiento de las mismas, este permite identificar la variación de la temperatura, considerando la cobertura del suelo, ya que esta, se encuentra directamente relacionada con la variable en cuestión, con lo cual se obtuvo, variaciones de temperatura entre los 13°C - 38° C, evidenciando que las áreas con poca densidad de vegetación muestran un mayor grado de temperatura, mientras que zonas como drenajes cuentan con las temperaturas más bajas, presentando una temperatura media entre 26.8°C - 35° C esto debido a la gran carga de sedimentos que contiene, así mismo, el casco urbano muestra una mayor temperatura (35°C - 37° C). Por otra parte, los datos atípicos presentados se generaron por errores en la información de pixeles en el momento de la calibración de la imagen como también debido a la alta nubosidad en la escena, lo cual produce que los intervalos de temperatura superficial muestren valores entre los -12°C - 80° C. Dichos pixeles no representan un porcentaje mayor al 1% del total del área de estudio.

La metodología planteada es una herramienta útil en la elaboración de un diagnóstico preliminar para un proyecto geotérmico, ya que implementa métodos y datos basados en el procesamiento de datos obtenidos a partir de sensores remotos, como en el presente caso se tratan de datos de distribución libre, los cuales con cierto grado de precisión representan las

características del terreno, disminuyendo los costos de evaluación de un proyecto. No obstante, en ningún caso reemplaza los métodos directos de exploración los cuales proporcionan información puntual bajo los conceptos teóricos planteados por la Geofísica y otras ramas de la ciencia.

6. BIBLIOGRAFÍA

Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2012). *CUENCA LLANOS ORIENTALES Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos*.

Aguilar Arias, H., Mora Zamora, R., & Vargas Bolaños, C. (2014). *METODOLOGÍA PARA LA CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA DE IMÁGENES ASTER, RAPIDEYE, SPOT 2 Y LANDSAT 8 CON EL MÓDULO FLAASH DEL SOFTWARE ENVI*. 39-59.

Alfaro Valero, C. M., Alvarado Ballesteros, I., & Manrique Bonilla, A. (2010). *Mapa preliminar de flujo de calor terrestre en la cuenca de los Llanos Orientales*. Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS.

Alfaro Valero, C. M., Alvarado Ballesteros, I., Quintero, W., Vargas, C., & Briceño, L. A. (2009). *Mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia*. Instituto Colombiano de Geología y Mineria INGEOMINAS.

Alipour-Fard, T., Saradjian, M., & Esmaeily, A. (2003). Land surface temperature estimation from thermal band of landsat sensor, case study: Alashtar City. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38*.

Ambrosio, G., González-Jiménez, J., & Arevalo, V. (2002). *Corrección Radiométrica y Geométrica de Imágenes para la Detección de Cambios en una Serie Temporal (in spanish)*.

Arellano G, V. M. (2001). *Investigación y desarrollo tecnológico para el sector petrolero en la Gerencia de Geotermia.*

Ariza, A. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)*. IGAC.

Bachu, S., Ramon, J. C., Villegas, M. E., & Underschultz, J. R. (1995). Geothermal Regime and Thermal History of the Llanos Basin, Colombia. *AAPG Bulletin*, *79*(1), 116-128. https://doi.org/10.1306/8D2B14D0-171E-11D7-8645000102C1865D

Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *6*(1), 3-65. https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00002-3

Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. A., & Martínez, J. F. (2007). *Colombian Sedimentary*

Basins: Nomenclature, Bundaries and petroleum Geology, a New proposal. Editado y compilado por: ANH and B&M Exploration Ltda. https://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Cuencas-sedimentarias/Documents/colombian_sedimentary_basins.pdf

Barsi, J. A., Barker, J. L., & Schott, J. R. (2003). An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a single thermal band earth-sensing instrument. *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477)*, *5*, 3014-3016. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1294665

Bayona, G., Valencia, A., Mora, A., Rueda, M., Ortiz, J., & Montenegro, O. (2008). Estratigrafía y procedencia de las rocas del Mioceno en la parte distal de la cuenca antepais de los Llanos de Colombia. *Geología Colombiana*, *33*, 23-46.

Boomer, S. M., Lodge, D. P., Dutton, B. E., & Pierson, B. (2002). Molecular characterization of novel red green nonsulfur bacteria from five distinct hot spring communities in Yellowstone National Park. *Applied and Environmental Microbiology*, *68*(1), 346-355. https://doi.org/10.1128/aem.68.1.346-355.2002

Briziela, A. B., Aguirre, C. A., & Velasco, I. (2007). *Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal*.

Bromley, C. J., Van Manen, S. M., & Mannington, W. (2011). *Heat flux from steaming ground: Reducing uncertainties.*

Cardona Madariaga, D. F., González Rodríguez, J. L., Rivera Lozano, M., & Cárdenas Vallejo, E. (2013). *Inferencia estadística Módulo de regresión lineal simple*.

Catuna R., N. (1995). *LA PERCEPCIÓN REMOTA Y EL ANÁLISIS DEL ESPACIO GEOGRÁFICO*.

Chavez, P. S. (1996). Image-Based Atmospheric Corrections—Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. https://doi.org/null

Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach*.

Coneo Rincón, M. (2021, junio 19). *Se aprobó el proyecto de ley que seguirá impulsando el proceso de transición energética*. https://www.larepublica.co/economia/se-aprobo-el-proyecto-de-ley-que-seguira-impulsando-la-transicion-energetica-en-el-pais-3188035

Ley 2099, Diario Oficial No. 51731, 10 de Julio del 2021.

Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2003). *What is geothermal energy?* UNESCO Publishing.

Duarte, E., Bayona, G., Jaramillo, C., Parra, M., Romero, I., & Mora, J. A. (2017). IDENTIFICACIÓN DE LOS MÁXIMOS EVENTOS DE INUNDACIÓN MARINA MIOCENOS Y SU USO EN LA CORRELACIÓN Y ANÁLISIS DE LA CUENCA DE ANTEPAÍS DE LOS LLANOS ORIENTALES, COLOMBIA. *Boletín de Geología*, *39*(1), 19-40. https://doi.org/10.18273/revbol.v39n1-2017001

Eskandari, A., De Rosa, R., & Amini, S. (2015). Remote sensing of Damavand volcano (Iran) using Landsat imagery: Implications for the volcano dynamics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *306*, 41-57. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.10.001

Fridleifsson, I. B., & Haraldsson, I. G. (2011). *Geothermal energy in the world with special reference to Central America*.

Friedman, I., & Norton, D. (2007). Is Yellowstone Losing Its Steam?—Chloride Flux Out of Yellowstone National Park. *Publications of the US Geological Survey*, 272-297.

Gil González, A. M. (2019). *La Energía Geotérmica como fuente alternativa de abastecimiento para la demanda en Colombia*.

Hantson, S., Chuvieco, E., Pons, X., Domingo, C., Cea, C., More, G., Cristobal, J., Peces, J. J., & J.A. Tejeiro. (2011). *Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección*.

Harris, A. J. L., Flynn, L. P., Matias, O., Rose, W. I., & Cornejo, J. (2004). The evolution of an active silicic lava flow field: An ETM+ perspective. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *135*(1), 147-168. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2003.12.011

Higuera, L. (2018). *ESTIMACION DE FLUJO DE CALOR GEOTERMICO EN LA ZONA VOLCANICA AZUFRAL, A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES*. Universidad del Valle.

Hurtado M., G. (2010). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO PROMEDIO Y TENDENCIAS DE LARGO PLAZO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA PARA LAS REGIONES HIDROCLIMÁTICAS DE COLOMBIA*. IDEAM.

Kou, R. (2019). *Elevating low-emissivity film for lower thermal transmittance*. 9.

Landsat 8 Overview | Landsat Science. (s. f.). Recuperado 28 de marzo de 2021, de https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (Seventh Edition). Wiley.

Lind, D. A., Marchal, W. G., Wathen, S. A., & Mason, R. D. (2012). *Estadística aplicada a los negocios y a la economía*. McGraw-Hill.

Lozada Prado, L. J. (2011). *Viabilidad técnica y financiera para la generación de energía geotérmica en Colombia.*

Martinez, I. (1992). *TERMODINAMICA BASICA Y APLICADA*. Universidad Politécnica de Madrid.

Marzolf, N. C. (2014). *Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia*. Banco Interamericano de Desarrollo. /paper/Emprendimiento-de-la-energ%C3%ADa-geot%C3%A9rmica-en-Colombia-Marzolf/d33ee72f5cab831cbb5552836168096b6308b39c

Mather, P. M. (1991). *Computer applications in geography*. John Wiley and sons.

Matiz-León, J. C. (2015). *Metodología para determinar el modelo espacial del gradiente geotérmico en las cuencas sedimentarias del Valle Medio del Magdalena, Cordillera Oriental y Llanos Orientales en Colombia*. http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/7732

Matiz-León, J. C., Rodríguez-Rodríguez, G. F., & Alfaro-Valero, C. M. (2018). Modelos de temperatura del suelo a partir de sondeos superficiales de temperatura y sensores remotos para el área geotérmica del volcán Azufral. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, *29*(1), 19-35.

Meer, F. van der, Hecker, C., Ruitenbeek, F. van, Werff, H. van der, Wijkerslooth, C. de, & Wechsler, C. (2014). *Geologic remote sensing for geothermal exploration: A review*.

Mejía, E. L., Velandia, F., Zuluaga, C. A., López, J. A., & Cramer, T. (2012). Análisis estructural al coroeste del volcán Nevado del Ruíz, Colombia- Aporte a la exploración geotérmica. *Boletín de Geología*, *34*(1), Article 1. https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegeologia/article/view/2713

Merg, C., Petri, D., Bodoira, F., Nini, M., Fernandez, M., Schmidt, F., Montalva, R., Guzmán, L., Rodríguez, K., Blanco, F., & Selzer, F. (2011). *MAPAS DIGITALES REGIONALES DE LLUVIAS, ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN E ÍNDICE VERDE*.

Mia, M. B., Bromley, C. J., & Fujimitsu, Y. (2012). *Monitoring heat flux using Landsat*

TM/ETM+ thermal infrared data—A case study at Karapiti ('Craters of the Moon') thermal area, New Zealand. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.05.005

Miller, R. B., & Small, C. (2003). Cities from space: Potential applications of remote sensing in urban environmental research and policy. *Environmental Science & Policy*, *6*(2), 129-137. https://doi.org/10.1016/S1462-9011(03)00002-9

Moreno-López, M. C., & Escalona, A. (2015). Precambrian–Pleistocene tectono-stratigraphic evolution of the southern Llanos basin, ColombiaPrecambrian–Pleistocene Southern Llanos Basin. *AAPG Bulletin*, *99*(8), 1473-1501. https://doi.org/10.1306/11111413138

Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo. (1992). *DECLARACIÓN DE RÍO DE JANEIRO*.

Olivares, B. O., & López-Beltrán, M. A. (2018). *Índice de vegetación de diferencia normalizada aplicado al territorio indígena agrícola de Kashaama, Venezuela*. https://doi.org/DOI: 10.22458/urj.v11i2.2299

Pértega Díaz, S., & Pita Fernández, S. (2001). *Técnicas de regresión: Regresión Lineal Simple*.

Qin, Q., Zhang, N., Nan, P., & Chai, L. (2011). Geothermal area detection using Landsat ETM+ thermal infrared data and its mechanistic analysis—A case study in Tengchong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *13*(4), 552-559. https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.02.005

¿Qué es ArcGIS? | ArcGIS Resource Center. (s. f.). Recuperado 25 de octubre de 2020, de https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm

Rabelo, J. L., Oliveira, J. N. de, Rezende, R. J. de, & Wendland, E. (2002). Aproveitamento da energia geotérmica do Sistema Aquífero Guarani: Estudo de caso. *Águas Subterrâneas*, *0*(1). https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22057

Requejo Liberal, J. (2012). *Energía renovable: Un nuevo principio de autosuficiencia conectada*.

Restrepo B, L. F., & González L, J. (2007). *De Pearson a Spearman*.

Robles- Algarin, C., & Rodríguez- Álvarez, O. (2018). *Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia.*

Savage, S. L., Lawrence, R. L., Custer, S. G., Jewett, J. T., Powell, S. L., & Shaw, J. A. (2010). Review of Alternative Methods for Estimating Terrestrial Emittance and Geothermal Heat Flux for Yellowstone National Park Using Landsat Imagery. *GIScience & Remote Sensing*, *47*(4), 460-479. https://doi.org/10.2747/1548-1603.47.4.460

Siahaan, M. N., Soebandrio, A., & Wikantika, K. (2011). *Geothermal potential exploration using remote sensing technique (Case study: Patuha area, west Java)*. Asian Geospacial Forum, Jakarta, Indonesia.

Sorey, M. L. (1991). *Effects of potential geothermal development in the Corwin Springs Known Geothermal Resources Area, Montana, on the thermal features of Yellowstone National Park. Water Resources Investigation* (PB-92-106699/XAB; USGS/WRI-91-4052). Geological Survey, Reston, VA (United States). Water Resources Div. https://www.osti.gov/biblio/6123659-effects-potential-geothermal-development-corwin-springs-known-geothermal-resources-area-montana-thermal-features-yellowstone-national-park-water-resources-investigation

Soto-Soto, J., Garzón, J., & Jimenez-Cleves, G. (2020). Analysis of urban heat islands using Landsat images: Case study Armenia-Colombia 1996-2018 Contenido. *Espacios*, *41*, 9.

Thermal Infrared Sensor (TIRS) | Landsat Science. (s. f.). Recuperado 28 de marzo de 2021, de https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/thermal-infrared-sensor-tirs

van Genderen, J. (2016). Fundamentals of satellite remote sensing: An environmental approach. *International Journal of Digital Earth*, *9*(12), 1275-1276. https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1209938

Vanhellemont, Q. (2020). Combined land surface emissivity and temperature estimation from Landsat 8 OLI and TIRS. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *166*, 390-402. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.06.007

Vanicek, P., Santos, M., Tenzer, R., & Hernandez-Navarro, A. (2003). *Algunos Aspectos Sobre Alturas Ortométricas y Normales*.

Vera Mella, N. (2006). *Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes del satélite NOAA. Aplicación a la península Ibérica* [Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Projectes d'Enginyeria]. https://www.tesisenred.net/handle/10803/6839#page=1

Viloria, J. (2009). *Geografía económica de la Orinoquia*. Banco de la Republica de Colombia.

Wu, S., Li, J., & Huang, G. H. (2008). A study on DEM-derived primary topographic attributes for hydrologic applications: Sensitivity to elevation data resolution. *Applied Geography*, *28*(3), 210-223. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.02.006

Yáñes, Á. J., Rodríguez, D., & Guillén, E. M. (2021, agosto 4). Ley de Transición Energética- Principales aspectos y novedades normativas. *CMS Legal 2021*. https://cms.law/es/col/publication/ley-de-transicion-energetica-principales-aspectos-y-novedades-normativas