

**USO DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8 PARA LA ESTIMACIÓN DE  
TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA TIERRA, CASO DE ESTUDIO: IBAGUÉ  
– TOLIMA.**

**STEPHANIE GALVIS CAUSIL  
ROMY VERONICA PRADA CASTELLANOS**



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
MANIZALES  
2017**

**USO DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8 PARA LA ESTIMACIÓN DE  
TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA TIERRA, CASO DE ESTUDIO: IBAGUÉ  
– TOLIMA.**

**STEPHANIE GALVIS CAUSIL  
ROMY VERONICA PRADA CASTELLANOS**

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar  
al título de Especialista en Información Geográfica

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
MANIZALES  
2017**

## TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO.....	2
1. ÁREA PROBLEMÁTICA.....	8
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	12
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	12
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3. JUSTIFICACIÓN.....	13
4. METODOLOGÍA.....	15
4.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN:.....	15
4.2 PROCEDIMIENTO:.....	15
4.2.1 Fase 1 Revisión Bilbiográfica.....	15
4.2.2 Fase 2 Tratamiento Digital De Imágenes.....	15
5. ANTECEDENTES.....	25
5.1 El paradigma Del Desarrollo Sostenible.....	25
5.2 Aplicaciones de la teledetección al desarrollo sostenible.....	26
6. MARCO TEORICO.....	28
6.6 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES:.....	28
6.6.1 Percepción Remota o Teledetección:.....	28
6.6.2 Imagen de satélite:.....	28
6.6.3 Landsat:.....	29
6.6.4 Conversión a TOA Radiance:.....	29
6.6.5 Conversión a Reflectancia de TOA:.....	30
6.6.6 Conversión a la temperatura de brillo por satélite:.....	31
6.6.7 Imágenes landsat 8 obtenidas del sensor OLI y TIRS:.....	31
6.6.8 La Radiación:.....	32
6.6.9 Calibración Radiométrica y Corrección Atmosférica.....	32
6.6.10 Reflectancia media interna (IARR):.....	32
6.6.11 Corrección radiométrica:.....	33
6.6.12 Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas NDVI:.....	33
6.6.13 Radiancia espectral:.....	33
6.6.14 La emisividad superficial (LSE):.....	33
6.6.15 La ley de Planck:.....	34
6.6.16 La emisividad superficial de la tierra (LSE):.....	34
7. RESULTADOS.....	35
8. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	44

8.1	Validación de datos obtenidos a partir de imágenes Landsat 8 .....	44
9.	CONCLUSIONES .....	48
10.	RECOMENDACIONES .....	50
11.	REFERENCIAS .....	51

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i>	<i>El esquema lógico para la estimación de la temperatura superficial de la tierra .....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.</i>	<i>pasos para calibración radiométrica. ....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 3.</i>	<i>pasos para el cálculo de la reflectancia media interna. ....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4.</i>	<i>Redimensionamiento multiespectral de bandas 4 y 5. ....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5.</i>	<i>Redimensionamiento banda térmica 10. ....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 6.</i>	<i>Superficies de emisividad de la tierra .....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 7.</i>	<i>Modelo erdas imagine 2014. ....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 8.</i>	<i>Espectro Electromagnético. ....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 9.</i>	<i>Ubicación de bandas Landsat 7 ETM+ y 8 OLI/TIRS en el espectro electromagnético. ..</i>	<i>29</i>
<i>Figura 10.</i>	<i>distribución de las bandas oli y tirs. ....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 11.</i>	<i>Mapa del área de estudio. ....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 12.</i>	<i>Mapa del Índice diferencial de vegetación normalizada. ....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 13.</i>	<i>histograma ndvi. ....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 14.</i>	<i>mapa de porción de vegetación. ....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 15.</i>	<i>histograma de la de porción de vegetación. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 16.</i>	<i>Mapa de cobertura de la tierra. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 17.</i>	<i>Histograma de emisividad terrestre. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 18.</i>	<i>mapa de emisividad de la tierra. ....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 19.</i>	<i>Histograma de temperatura superficial de la tierra. ....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 20.</i>	<i>Mapa de de temperatura superficial de la tierra .....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 21.</i>	<i>Perfil de radiancia. ....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 22.</i>	<i>Perfil de reflectancia. ....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 23.</i>	<i>Mapa de temperaturas de Colombia. ....</i>	<i>46</i>

## LISTA DE FORMULAS

<i>Formula 1.</i>	<i>calibración radiométrica .....</i>	<i>17</i>
<i>Formula 2.</i>	<i>reflectancia media interna. ....</i>	<i>18</i>
<i>Formula 3.</i>	<i>Cálculo de distancia entre la tierra y el sol. ....</i>	<i>18</i>
<i>Formula 4.</i>	<i>cálculo ndvi .....</i>	<i>21</i>
<i>Formula 5.</i>	<i>porción de vegetación. ....</i>	<i>21</i>
<i>Formula 6.</i>	<i>emisividad de la superficie terrestre. ....</i>	<i>21</i>
<i>Formula 7.</i>	<i>radiancia espectral. ....</i>	<i>22</i>
<i>Formula 8.</i>	<i>Temperatura Brillo .....</i>	<i>22</i>
<i>Formula 9.</i>	<i>Temperatura de la Superficie de la Tierra (LST) ó algoritmo recuperado de barsi. ....</i>	<i>23</i>
<i>Formula 10.</i>	<i>conversión radiancia espectral .....</i>	<i>29</i>
<i>Formula 11.</i>	<i>Conversión a Reflectancia de TOA. ....</i>	<i>30</i>
<i>Formula 12.</i>	<i>TOA reflectancia planetaria .....</i>	<i>30</i>
<i>Formula 13.</i>	<i>Conversión a la temperatura de brillo. ....</i>	<i>31</i>
<i>Formula 14.</i>	<i>cálculo del ndvi. ....</i>	<i>33</i>
<i>Formula 15.</i>	<i>Radiancia espectral .....</i>	<i>33</i>
<i>Formula 16.</i>	<i>La ley de Planck. ....</i>	<i>34</i>

## GLOSARIO

**Banda:** Intervalo de longitud de onda dentro del espectro electromagnético. Por extensión, se denomina banda a cada uno de los canales de adquisición de datos de un sistema sensor.

**Frecuencia:** una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.

**Imagen digital:** está compuesta por una matriz de puntos elementales (píxeles) generados por los captadores de los instrumentos de teledetección. Estos sensores miden la radiación reflejada por unidad de superficie para unas longitudes de onda determinadas (bandas). Una imagen de media resolución está compuesta por una matriz (como un gran tablero de ajedrez) de 6000 x 6000 píxeles cada uno de los cuales representa un cuadrado de 10mx10m de la superficie terrestre.

**Longitud de onda:** es la distancia real que recorre una perturbación (una onda) en un determinado intervalo de tiempo. Ese intervalo de tiempo es el transcurrido entre dos máximos consecutivos de alguna propiedad física de la onda.

**Radiación:** es la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material.

**Resolución:** Capacidad de un sistema sensor para distinguir información de detalle en un objeto. En teledetección se habla de distintos tipos de resolución: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

**Sensor:** Dispositivo que capta magnitudes físicas (variaciones de Luz, temperatura, sonido, etc.) u otras alteraciones de su entorno. Intervalo de longitud de onda dentro del espectro electromagnético.

## RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo fue la estimación de la temperatura superficial de la tierra (LST) para una imagen Landsat 8 en una zona intertropical con interferencia menor al 10% de nubes a partir de una metodología cuantitativa. En la secuencia metodológica se describe una fase de pre – procesamiento la cual consistió en la calibración radiométrica de la imagen para convertir los impulsos eléctricos a radiancia, la corrección atmosférica mediante la reflectancia interna media haciendo la imagen representativa del espectro de irradiación solar y el redimensionamiento de los datos estableciendo el tamaño del pixel de salida.

En la fase de procesamiento se utilizó un modelo de estimación de temperatura superficial a partir de datos del espectro visible, infrarojo y térmico a una resolución de 30 metros, para el espectro visible e infrarojo se realizó el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI), se estimó la Proporción de vegetación y se determinó la emisividad de la superficie de la tierra (LSE ( $\epsilon$ )). Para la banda térmica se obtuvo la temperatura brillo (TB) obteniendo la intensidad de la emisión de un cuerpo en una escala de temperaturas, finalmente se calculó la LST teniendo la (TB) y (LSE ( $\epsilon$ )), además de longitudes de onda de la radiación emitida, constante temperatura absoluta y energía (Boltzman), constante de proporcionalidad entre la energía de un fotón y la frecuencia de su onda electromagnética asociada (Plank) y la velocidad de la luz.

Los resultados evidencian la variabilidad térmica contenida en el píxel de forma promediada, la imagen muestra valores extremos mínimos que fluctúan en el rango de 11 a 19 °C, las zonas con esta temperatura pertenece a la cordillera central mientras que los valores extremos más altos fluctúan en un rango de 33 a 37 °C ubicandose en la zona urbana y el abanico de Ibagué.

**PALABRAS CLAVES:** Temperatura Superficial, Landsat 8, Emisividad, Sensores Remotos, NDVI, Temperatura Brillo, Radiancia.

## ABSTRACT

The Main Objective of this research was to estimate the Land Surface Temperature (LST) for a Landsat8 image in an intertropical area with Cloud interference of no more than 10%, and using a quantitative methodology. A phase of pre-prosecution is described on the methodological sequence, which consisted on the Radiometric Calibration of the image to convert the electrical impulses to radiance, the atmospheric correction through the average internal reflectance making the representative image of the spectrum of solar irradiation and the resizing of data, establishing the size of the output pixel.

On the processing phase a model of surface temperature estimation was used, from the visible, infrared and thermal spectral data at a resolution of 30 meters, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was used for the visible and infrared spectrum, the proportion of vegetation was estimated and the Land Surface Emissivity (LSE (e)) was determined. For the Thermal Band the brightness temperature (TB) was calculated by obtaining the intensity of the emission of a body in a scale of temperatures, finally the LST was calculated taking (TB) and (LSE (e)), besides wavelenghts of the emitted radiation, constant of absolute temperature and energy (Boltzman), constant of proportionality between the energy of a photon and the frequency of its associated electromagnetic wave (Plank) and the speed of light.

The Results show the thermal variability contained in the pixel in an averaged way, the image show minimum extreme values that fluctuate on the 11 to 19 °C range, the zones with that temperature belongs to the Central Mountain Range, while the higher extreme values fluctuate in a range of 33 to 37 °C, located on the urban area and the Ibagué range.

**KEY WORDS:** Surface Temperature, Landsat8, Emissivity, Remote sensors, NDVI, Brightness temperature, Radiance

## INTRODUCCIÓN

El uso de la teledetección como ciencia del procesamiento de productos obtenidos de sensores remotos ha favorecido la obtención de información del estado de las coberturas terrestres y ampliado los análisis del comportamiento y evolución de estas de acuerdo a sus singularidades. Por lo tanto, el conocimiento de la temperatura superficial de la tierra en escalas espaciales y temporales más amplias, se convierte en una necesidad para diversas aplicaciones.

La temperatura superficial de la tierra resulta ser unas de las variables mas importantes para determinar la variabilidad climatológica y los efectos ambientales sobre las coberturas estudiadas, en términos de utilidad es un parámetro clave para realizar un balance de energía y materia que permita evaluar la sostenibilidad de procesos productivos, así como los impactos ambientales, a fin de optimizar los recursos y producir mejoras ambientales.

En la actualidad la información proveniente de sensores remotos ha trascendido las limitaciones de la resolución espacial y temporal permitiendo ampliar la escala y objetivos de los estudios, en este sentido contar con satélites con bandas térmicas, de vapor de agua, detección de nubes, determinación de bordes costeros y cada vez mas precisas en los espectros del infrarrojo permitiendo así la estimación de variables hidrológicas y climatológicas lo que resulta en un aporte esencial al monitoreo del cambio climático y las acciones para la sostenibilidad.

La alta presión antropogénica sobre los territorios y la consecuente reconversión de las prácticas sociales y económicas ha generado una importante transformación en el uso del suelo lo cual tiene efectos ambientales, tema que adquiere relevancia en esta investigación, con la detección de una variable climatológica que es susceptible de ser comparada a nivel multitemporal y utilizada como parámetro para determinar la sostenibilidad de las prácticas llevadas a cabo en el área de estudio, cuyos usos son a gran escala urbano, agrícola y ganadero generando nuevos paisajes fuertemente transformados que a la larga se convierten en tierras económicamente marginales caracterizadas por suelos menos fértiles y con poca presencia de vegetación.

Este estudio tuvo especial énfasis en estimar la temperatura superficial en la ciudad de Ibagué por medio de técnicas de percepción remota como una herramienta de monitoreo de las variables de cambio climático contempladas en el Plan de Adaptación al Cambio Climático, teniendo como insumo una imagen satelital Landsat 8 a la cual se aplicó el algoritmo de Barsi y que generó resultados referentes a la temperatura superficial, la intensidad y proporción de la vegetación y las emisividades del suelo, todo ello para establecer la influencia de éstos en la temperatura superficial sobre las coberturas existentes en el área de estudio.



## 1. ÁREA PROBLEMÁTICA

La evolución del hombre en sociedad y su consecuente materialización en el espacio ha suscitado profundas transformaciones en el uso y funciones de este; las crecientes dinámicas económicas han movilizadado a sociedades completas hacia los lugares donde se producen estas transformaciones económicas, llevando consigo al aumento de la población, el requerimiento de servicios básicos, la demanda de vivienda, recursos naturales y consecuentemente a la presión demográfica y ambiental sobre el espacio.

Este crecimiento poblacional se evidencia en los registros demográficos que señala la existencia de al menos siete mil millones de personas (7000 millones de personas) en el mundo, esta situación genera crecientes procesos de urbanización, tanto así que a partir de los años sesenta con la industrialización, la organización de los procesos productivos y la conducta socio-laboral de la población urbana pasó del 34% al 54% en 2015 (Mundial, 2016).

Lo anterior nos lleva a considerar los profundos efectos ambientales y sociales en términos de riesgos y desastres que afrontan los entornos territoriales urbanos donde yace la mayor parte de la población.

Es por ello que el cambio climático global adquiere relevancia en este proyecto, pues está referido a las modificaciones en cualquier aspecto del clima del planeta, tales como la temperatura, precipitación e intensidad y las rutas de las tormentas (G. Tyler Miller, 2008). Tanto así que algunos de los efectos visibles y latentes del cambio climático están dados por el aumento en las variables constituyentes del clima que son: temperatura atmosférica, presión atmosférica, vientos, humedad y precipitaciones.

Enger, E. & Smith, B. (2006) (Díaz Cordero, 2012), plantean que los métodos para manejar el cambio climático implican el cambio tecnológico unido a la voluntad política y la realidad económica. Por lo que en el contexto del cambio tecnológico adquiere importancia la utilización de tecnologías geoespaciales como el uso de herramientas de percepción remota, para mejorar el conocimiento y estado de los recursos naturales, a través de estos, se capturan la información emitida por las coberturas terrestres que permiten interpretar el estado y dinámica de dichos recursos.

Antes de 1972, la idea de utilizar datos de satélite para la vigilancia terrestre, la cartografía o la exploración era un concepto visionario. Hecho que da origen al Programa Landsat, el cual se constituye en una serie de misiones de observación de la tierra por satélite gestionadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2016).

Landsat ha sido el único sistema de satélite diseñado y operado para observar repetidas veces la cubierta de la tierra con una resolución moderada. En la actualidad el programa se encuentra en su octava versión denominada: "Landsat Data Continuity Mission" (LDCM) la cual presenta una notable mejora en su resolución espectral añadiendo en el sensor OLI la banda costera (límites de borde), banda cirrus (para discriminación de nubes) y dos bandas térmicas mediante el sensor TIRS que son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie. Lo interesante de estas mejoras es la posibilidad de estudiar los cambios en la energía por irradiación reflejada por los materiales de superficie con el fin de lograr identificar las características de interés. Estos aspectos pueden identificarse gracias a la respuesta espectral relativa (RSR) de cada banda.

El conocimiento de la temperatura superficial de la tierra proporciona información sobre las variaciones temporales y espaciales del estado de equilibrio de la superficie y es de fundamental importancia en muchas aplicaciones, Landsat 8 ofrece la posibilidad mediante las bandas térmicas de estimar dichas temperaturas lo cual es fuente de información en tiempo real y con menor grado de incertidumbre para zonas intertropicales ya que permiten diagnosticar el estado de avance de procesos como el cambio climático, ciclo hidrológico, monitoreo de la vegetación, clima urbano, estudios del medio ambiente, y tomar las medidas para mitigar y evitar los efectos adversos.

Colombia, un país en desarrollo con 48, 826,428 habitantes y una población eminentemente joven afronta el fenómeno de la súper concentración de su población en la zona urbana, alcanzando en 2015 los 36, 900,000 habitantes en zona urbana. Tal es el caso que ciudades como Bogotá y Medellín concentran ocho y tres millones de habitantes respectivamente (DANE, 2015).

De esta manera surgen problemas ambientales tales como: contaminación por ruido, contaminación del aire, sobreproducción de basuras, vertimientos de desechos domésticos e industriales a fuentes de agua, deficiencia en los servicios públicos domiciliarios, en los servicios de salud, en los sistemas de transporte público, espacio público, lo cual conlleva a la modificación de las variables climáticas como la del caso que nos ocupa, la temperatura que tiene incidencia directa en el ciclo hidrológico, cambio en el estado de fauna y flora y en el equilibrio del sistema ambiente.

Ante la alta vulnerabilidad al cambio climático, Colombia por sus características físicas, geográficas, económicas, sociales y de biodiversidad, lo que implica que para el país, es de vital importancia generar la capacidad de entender las consecuencias que denotan los cambios en el clima, evaluando las amenazas sobre las comunidades vulnerables, previendo los impactos sobre los territorios, ecosistemas y economías, moderando los daños potenciales, tomando ventaja de las oportunidades y enfrentando las consecuencias de un fenómeno como el cambio climático y sus impactos para el país (Sostenible, 2017).

Un muestra de la alta vulnerabilidad social, económica y ambiental de Colombia fue el balance de pérdidas cercanas a los 11.2 billones de pesos, 3.2 millones de personas afectadas y el 82% de los daños estimas en los sectores de vivienda e infraestructura, que dejó "El fenómeno de la Niña" 2010-2011 según el estudio de "Valoración de daños y pérdidas, Ola invernal en Colombia" desarrollado por la Comisión Económica para América Latina - CEPAL y el Banco Interamericano de Desarrollo – BID Las pérdidas económicas, humanas y ambientales que dejó el fenómeno, evidenció la alta vulnerabilidad de Colombia y la ausencia de estrategias de adaptación como respuesta al cambio del clima y eventos climáticos extremos lo que llevaron a la creación del Fondo de Adaptación y la formulación del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático PNACC (Sostenible, 2017).

Motivado por lo anterior el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible junto con instituciones como el Instituto de Hidrología , Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM y la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo UNGRD apoyan la construcción del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático PNACC, iniciativa liderada por el Departamento Nacional de Planeación DNP con la participación activa de los sectores productivos, los territorios y la población (Sostenible, 2017).

La cual específicamente en el departamento del Tolima se hace visible en el Plan Ambiental Regional del Tolima con una vigencia de 10 años a partir del año 2013, el cual en su línea estratégica de Gestión del Riesgo y de una estrategia regional para la mitigación y adaptación al Cambio Climático tiene un claro enfoque hacia la identificación de áreas susceptibles a los efectos del cambio climático y la variabilidad climática.

Entre las diversas manifestaciones del cambio climático se destacan no solamente el calentamiento sino también significativas alteraciones en el clima por la mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos, especialmente en forma de inundaciones, ondas de calor, sequias, huracanes y tempestades. Para el departamento del Tolima, los efectos del cambio climático y la variabilidad climática son altamente negativos, debido a que la economía es altamente dependiente del aprovechamiento de los recursos naturales, que están ligados al clima (la agricultura, ganadería, entre otros) (CORTOLIMA, 2013).

En medio de este contexto aunque no existe una responsabilidad específica es importante la generación de conocimiento por parte del sector privado, comunidad y la academia en la cuantificación de impactos por el cambio climático para obtener avances en esta materia que permitirán tener una mejor comprensión de la interacción entre el medio ambiente y la sociedad, con la finalidad de avanzar en proceso de adaptación y mitigación. En este sentido el trabajo responde a la premisa planteada con la obtención de un método para determinar la variabilidad climática en términos de temperatura de la superficie terrestre, lo que se conjuga en el siguiente interrogante:

¿Cómo estimar la temperatura superficial de la tierra a través del satélite Landsat 8 para el municipio de Ibagué - Tolima como información de soporte en la ejecución del Plan de Adaptación al Cambio Climático?

## **2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Estimar la temperatura superficial de la tierra a través de los sensores OLI y TIRS del satélite Landsat 8 para el municipio de Ibagué – Tolima.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar la calibración radiométrica y corrección atmosférica de las bandas espectrales y térmicas de los sensores de los satélites de la serie Landsat 8.
- Realizar el cálculo del índice de vegetación de diferencia, la Proporción de Vegetación, la emisividad de la superficie, la temperatura de brillo usando las bandas de los sensores OLI y TIRS de la serie Landsat 8.
- Realizar el cálculo de la temperatura de superficie usando el algoritmo de Barsi.

### 3. JUSTIFICACIÓN

Como consecuencia del vertiginoso crecimiento demográfico, de las conductas económicas y urbanísticas, el planeta ha sufrido profundas transformaciones en el aspecto ambiental, teniendo especial incidencia en la variación de los factores climatológicos los cuales están directamente correlacionados con los aspectos productivos del suelo, la salud humana, la supervivencia de especies vegetales y animales y la misma existencia del planeta.

Producto de estos cambios, en especial la temperatura de la superficie terrestre (LST), y como factor de interés dentro de los propósitos de las agendas de cambio climático se busca reducir la vulnerabilidad del país e incrementar su capacidad de respuesta frente a las amenazas e impactos del cambio climático.

Por esto es fundamental el conocimiento de las variables que influyen en las condiciones de riesgo para los territorios, la investigación con menor grado de incertidumbre y la verificación de la variación de estas variables mediante técnicas novedosas y con un amplio grado de observaciones, hacen de la percepción remota la herramienta ideal para determinar variaciones en las condiciones de la superficie terrestre.

La temperatura superficial de la tierra (LST) obtenida del procesamiento de las respuestas de los satélites de observación de la Tierra es un factor esencial en el cambio climático global, el crecimiento de la vegetación y también en el control de clima urbano, la comprensión de las condiciones ambientales necesarias para sostener la vida humana.

En el contexto nacional colombiano, el departamento del Tolima se incorpora a la gestión del cambio climático mediante en su línea estratégica de Gestión del Riesgo y de una estrategia regional para la mitigación y adaptación al Cambio Climático mediante la identificación de áreas susceptibles a los efectos del cambio climático y la variabilidad climática, priorizando la generación de conocimiento por parte del sector privado, comunidad y la academia en la cuantificación de impactos como la determinación de la variabilidad climática en aspectos tales como: la temperatura y la hidrometeorología, fundamentales en la superación de las condiciones de vulnerabilidad y como estrategia para la recuperación de los pasivos ambientales, del mismo modo en que se busca fortalecer el sector productivo mediante la concientización de los productores en la utilización de técnicas y tecnologías verdes para contrarrestar los efectos del cambio climático con acciones de mitigación.

Lo anterior conlleva a pensar que la gestión de la política pública y social de cambio climático y desarrollo sostenible busca bajo la visión holística, sentar las bases para el análisis y diseño de estrategias para un desarrollo equilibrado, planificado y sostenible; en esa medida en todo el territorio Colombiano, la construcción del PNACC se ha enmarcado como un proceso continuo, que se retroalimentará de

manera constante al ritmo que se genere información sobre la amenaza que representa el cambio climático y esto se verá facilitado en gran medida por la implementación de tecnologías geoespaciales diagnósticas del estado de los componentes ambientales que dan la posibilidad de tener información técnica para la toma decisiones.

## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN:**

El presente trabajo es de tipo cuantitativo dado que se procesaron los valores digitales y posterior al procesamiento se hicieron cálculos y conversiones en tipos numéricos continuos contenidos en las bandas espectrales de los sensores OLI y TIRS de la serie Landsat 8. A su vez está basado en un enfoque experimental, dadas las variables de las propiedades de la imagen satelital Landsat 8 tenidas en cuenta para la estimación de la temperatura superficial de la tierra y en función de la utilidad práctica que llegara a tener dicho algoritmo para estudios de transición de las condiciones ambientales respecto de la variabilidad de las temperaturas de determinada área de estudio.

### **4.2 PROCEDIMIENTO:**

Esta investigación se realizó a partir de una serie de imágenes Landsat 8 del año 2016 que cubren el área urbana del municipio de Ibagué – Tolima. La imagen se seleccionó teniendo en cuenta como único criterio ser de la serie Landsat 8 sensor OLI y TIRS, y que la zona de estudio presentara un porcentaje de cubierta de nubes igual o menor al 10%. Para este estudio se tuvieron en cuenta una serie de fases metodológicas descritas a continuación:

#### **4.2.1 Fase 1 Revisión Bibliográfica**

Se llevó a cabo la revisión bibliográfica correspondiente a los fundamentos teóricos de la teledetección espacial, y sensores remotos como la serie Landsat 8, así como antecedentes en el cálculo de temperatura superficial de la tierra con imágenes satelitales. Asimismo se hizo uso de portales como la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) para la descarga de la imagen Landsat 8, y del Sistema de Información Geográfica para el Ordenamiento Territorial (SIGOT) para la descargar de archivos en formato shapefile para definir el área de estudio al momento de procesar las imágenes.

#### **4.2.2 Fase 2 Tratamiento Digital De Imágenes**

El procesamiento digital de la imagen se realizó mediante el software ENVI 5.3. y ERDAS IMAGINE 2014 con las bandas multiespectrales 4,5 y la banda 10 correspondiente al espectro térmico, esta última fue útil en la estimación de la temperatura de brillo, así como las bandas 4 y 5 del rojo e infrarrojo cercano respectivamente fueron precisas en el cálculo del Índice Diferencial de Vegetación Normalizada, la porción de vegetación y las emisividades de esas coberturas.



El esquema lógico para la estimación de la temperatura superficial de la tierra es el siguiente:

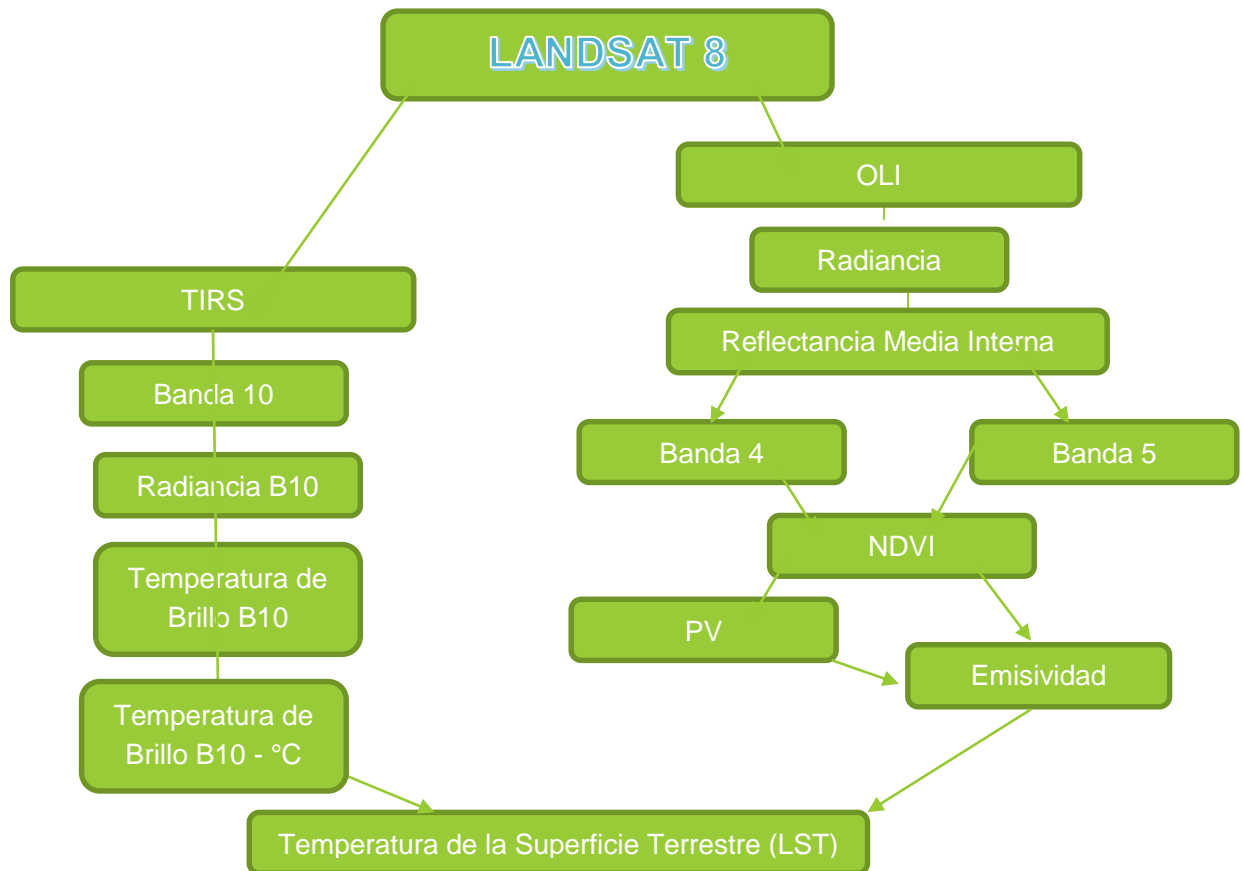


FIGURA 1. EL ESQUEMA LÓGICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA TIERRA

- **Pre – procesamiento:**

Esta fase estuvo referida al ajuste radiométrico y atmosférico de la imagen LC80080572015004LGN00 adquirida el 4 de enero de 2015 del satélite Landsat 8 en sus sensores OLI y TIRS.

- **Sensor OLI:**

El primer procedimiento de esta fase consistió en la aplicación de tratamientos previos al cálculo de la temperatura superficial de la tierra comenzando por la calibración radiométrica (*Radiometric calibration*) o método de escalamiento de la radiancia espectral en el software ENVI 5.3, la cual se hizo necesaria ya que los datos de la imagen posteriormente serían utilizados en un análisis espectral, por lo que se obtuvo la porción de energía reflejada que alcanza el sensor, conocida como radiancia ya que sin la calibración solo son registros eléctricos percibidos por el

sensor al momento de la toma de la escena, además permite disminuir los efectos de dispersión o absorción causados por la presencia de partículas en la atmósfera.

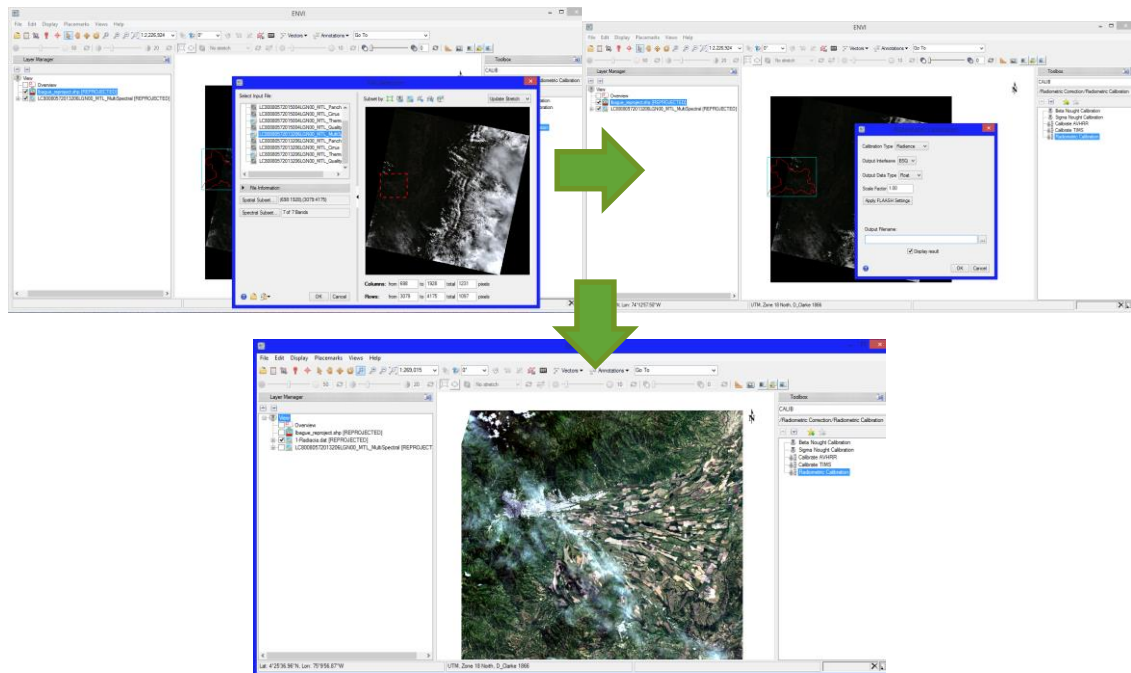


FIGURA 2. PASOS PARA CALIBRACIÓN RADIOMETRICA.

La fórmula usada en este proceso es la indicada en la ecuación a continuación:

$$L_{\lambda} = (( [LMAX]_{\lambda} - [LMIN]_{\lambda}) / (QCALMAX - QCALMIN)) * (QCAL - QCALMIN) + [LMIN]_{\lambda}$$

FORMULA 1. CALIBRACIÓN RADIOMETRICA

En donde:

$L_{\lambda}$  = Es la radiancia espectral en la banda de interés

$QCAL$  = es el nivel digital (ND) que se desea convertir

$LMIN_{\lambda}$  = es la radiancia espectral en la banda  $\lambda$  correspondiente a  $QCALMIN$

$LMAX_{\lambda}$  = es la radiancia espectral en la banda  $\lambda$  correspondiente to  $QCALMAX$

$QCALMIN$  = es el nivel digital mínimo calibrado (usualmente = 1)

$QCALMAX$  = es el nivel digital máximo calibrado (usualmente = 255)

Los datos requeridos para aplicar esta fórmula se encuentran en los metadatos de la imagen.

Seguidamente se llevó a cabo mediante el software Envi 5.3 la Reflectancia Media Interna (IAR), en la cual se utiliza el espectro de radiancia medio de toda la escena

y se calcula la relación del espectro medio con todos los espectros de píxeles. La suposición es que este espectro medio es representativo del espectro de irradiación solar.

Para realizar esta conversión se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$R_{sensor} = (Pi * L_{\lambda} * d^2) / (ESUN_i * \cos(Z))$$

FORMULA 2. REFLECTANCIA MEDIA INTERNA

En donde:

$R_{sensor}$  : Es la reflectancia en el sensor.

$Pi$ : 3.14159

$L_{\lambda}$  : Es la radiancia espectral en el sensor

$ESUN_i$ : es la irradiancia solar en la banda de interés (i) medida en el tope de la atmósfera

$z$ : es el ángulo cenital solar (ángulo cenital = 90 – ángulo de elevación solar), que se puede obtener en el archivo de metadatos.

$d$ : es la distancia entre la tierra y el sol, en unidades astronómicas, que se puede calcular usando la ecuación a continuación:

$$d = (1 - 0.001672 * \cos(\text{RADIANES}(0.9856 * (\text{Julian } [DIA]^{-4}))))$$

FORMULA 3. CÁLCULO DE DISTANCIA ENTRE LA TIERRA Y EL SOL.

**ESUN<sub>i</sub>** es la cantidad máxima de energía que una banda específica (i) mediría si el sensor apuntara al sol. Por lo tanto, en dicha ecuación, lo que se calcula es la relación entre la cantidad de energía que llega al sensor en una banda determinada,  $L_{\lambda}$  y la cantidad de energía total que se mediría en esa banda (en el caso que la fuente de energía fuera el sol). Esa relación es, por definición, reflectancia; pero se trata de una reflectancia aparente debido a que no tiene en cuenta la dispersión ocasionada por la atmósfera. Los otros términos de la ecuación simplemente tienen en cuenta el hecho que solamente una fracción de la luz emitida por el sol es capaz de llegar al sensor.

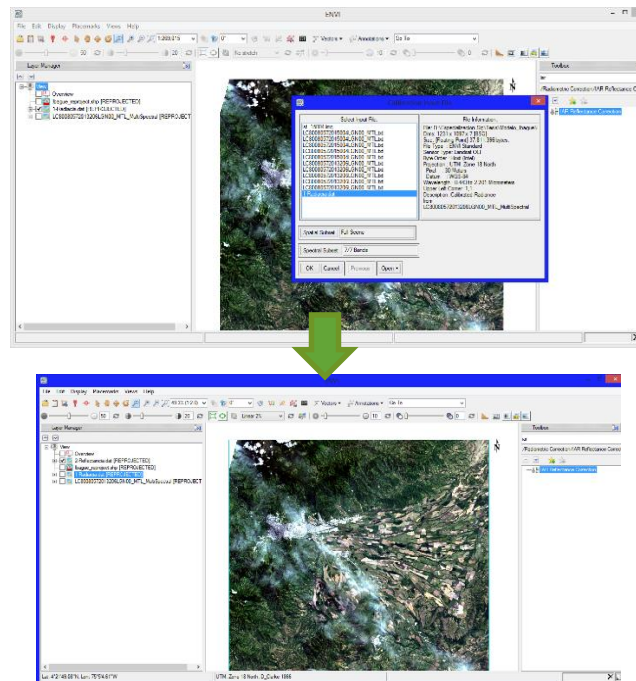
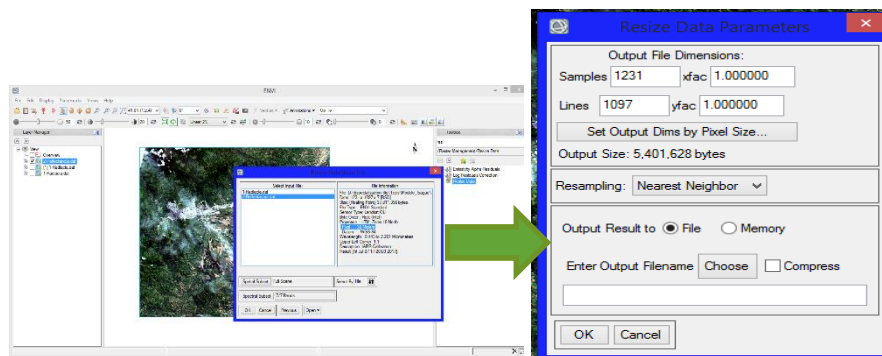


FIGURA 3. PASOS PARA RL CALCULO DE LA REFLECTANCIA MEDIA INTERNA.

El último pre – procesamiento se refirió al redimensionamiento de los datos o *Resize data* que fue realizado en ENVI 5.3 con el fin de establecer los factores x/y, y el tamaño del píxel de salida y los valores de remuestreo para el archivo raster de salida, todo esto mediante el re-muestreo del vecino más cercano que utiliza el valor de píxel más cercano como el valor del píxel de salida.

Multiespectral (Banda 4 y 5)



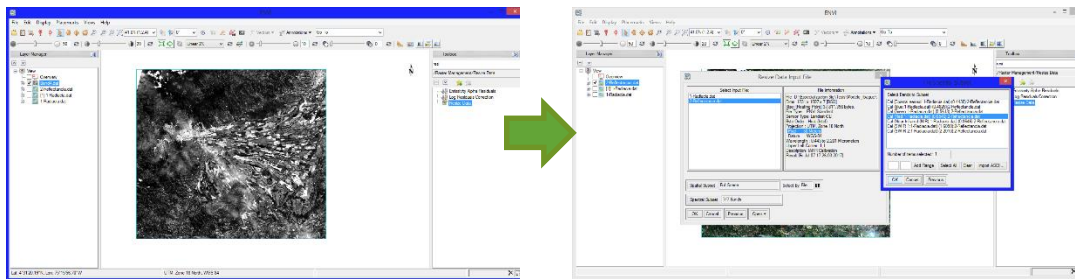


FIGURA 4. REDIMENSIONAMIENTO MULTIESPECTRAL DE BANDAS 4 Y 5.

### Térmica (Banda 10)

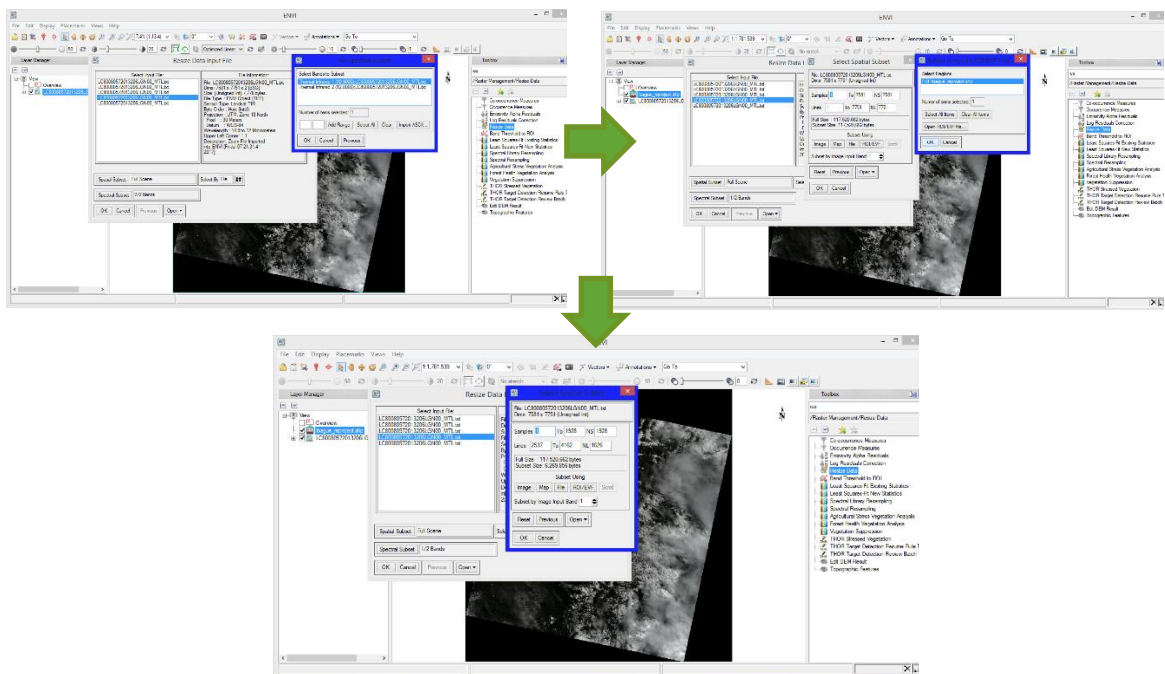


FIGURA 5. REDIMENSIONAMIENTO BANDA TÉRMICA 10.

- **Procesamiento:**

Una vez realizados los ajustes radiométricos y atmosféricos a las imágenes se dio paso a la construcción del modelo espacial para el procesamiento de la secuencia de algoritmos que permitieron obtener la temperatura superficial de la tierra en el periodo de adquisición de la imagen correspondiente a diciembre de 2015 en el municipio de Ibagué – Tolima de la siguiente manera:

El NDVI se calculó como una relación entre la reflectividad medida en las porciones rojo e infrarrojo cercano del espectro electromagnético, es decir, de las bandas 4 y 5 respectivamente. Estas dos bandas espectrales fueron elegidas porque dada su gran afectación por la absorción de la clorofila en la vegetación de hoja verde y por

la densidad de la vegetación verde en la superficie. La transformación NDVI se calculó utilizando la formula 4:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

FORMULA 4. CÁLCULO NDVI

La Proporción de vegetación utilizó un cálculo que sugiere el uso de los valores de NDVI para la vegetación y el suelo aplica en condiciones globales utilizando la formula 5:

$$P_v = \left( \frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S} \right)^2$$

FORMULA 5. PORCIÓN DE VEGETACION.

La emisividad de la superficie de la tierra (LSE ( $\epsilon$ )) debía ser conocida con el fin de estimar la temperatura superficial de la tierra o LST (*Land Surface Temperature*), ya que el LSE es un factor de proporcionalidad que escala radiación de cuerpo negro (ley de Planck) para predecir radiación emitida, y es la eficiencia de la transmisión de energía térmica a través de la superficie a la atmósfera. La determinación de la emisividad del suelo se calcula condicionalmente como se sugiere en la formula 6:

$$\epsilon_\lambda = \epsilon_{v\lambda} P_v + \epsilon_{s\lambda} (1 - P_v) + C_\lambda$$

FORMULA 6. EMISIVIDAD DE LA SUPERFICIE TERRESTRE.

Dónde  $\epsilon_v$  y  $\epsilon_s$  son las emisividades de vegetación y suelo, respectivamente, y C representa la rugosidad de la superficie (C = 0) para superficies homogéneas y planas) tomado como un valor constante de 0,005. La condición se puede representar con la siguiente fórmula y los valores constantes de emisividad mostrados a continuación:

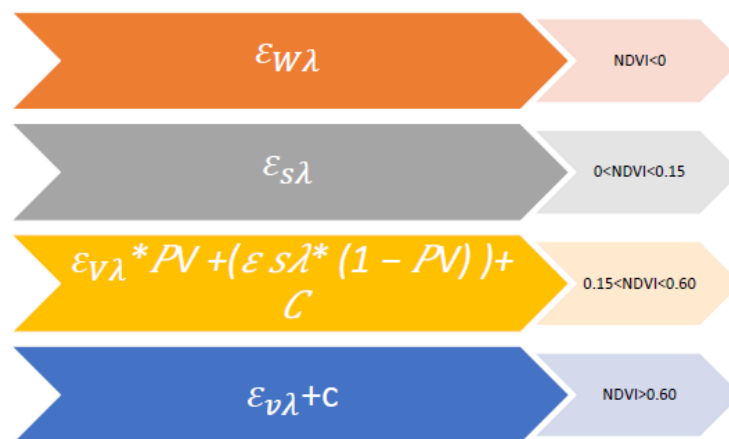


FIGURA 6. SUPERFICIES DE EMISIVIDAD DE LA TIERRA. FUENTE: (ELABORACIÓN PROPIA, 2017)

Cuando el NDVI es menor que 0, se clasifica como agua, y se le asigna el valor de emisividad de 0,991. Para valores de NDVI entre 0 y 0,15, se considera que la tierra está cubierta con el suelo, y se le asigna el valor de emisividad de 0,996. Los valores entre 0,15 y 0,60 se consideran mezclas de suelo y se le asigna el valor de emisividad 0.962 y la vegetación de cubierta y se le asigna el valor de emisividad 0.973.

- **Sensor TIRS**

A partir de los datos de las bandas térmicas de la serie Landsat-8, los niveles digitales del sensor se convirtieron a radiancia espectral usando la siguiente ecuación:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L$$

FORMULA 7. RADIANCIA ESPECTRAL

Dónde,

$L_{\lambda}$  = Es el valor de radiancia espectral en el techo de la atmosfera (TOA) medida en valores de (Watts /m2 \* srad \*  $\mu$ m))

$M_L$  = Banda – Es el factor multiplicativo de escalado específico obtenido del metadato (RADIANCE\_MULT\_BAND\_x, donde x es el número de la banda)

$A_L$  = Banda – Es el factor aditivo de escalado específico obtenido del metadato (RADIANCE\_ADD\_BAND\_x, donde x es el número de la banda)

$Q_{cal}$  = Producto estándar cuantificado y calibrado por valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

La Temperatura Brillo se obtiene de la conversión de la radiancia espectral asumiendo la superficie de la tierra es un cuerpo negro.

$$T_b = \frac{K_2}{\ln\left(\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}}\right) + 1\right)} - 273.15$$

FORMULA 8. TEMPERATURA BRILLO

Donde  $T_b$  es la temperatura de brillo,  $L\lambda$  es el valor de la celda como resplandor,  $K_1$  y  $K_2$  son las constantes de Landsat-5 y Landsat-8 de calibración. Para la obtención de los resultados en Celsius se resta a la temperatura de brillo el factor de conversión para grados Celsius ( $-273,15 \text{ } ^\circ \text{C}$ ).

Temperatura de la Superficie de la Tierra (LST) se calculó a partir del algoritmo de Barsi teniendo en cuenta la ecuación que considera la temperatura de brillo (BT) y la emisividad de la Superficie de la tierra (e) que se expresa en la siguiente fórmula:

$$LST = \frac{BT}{1} + W * \left( \frac{BT}{p} \right) * \ln(e)$$

FORMULA 9. TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA (LST) Ó ALGORITMO RECUPERADO DE BARSÍ.

Donde:

BT = Temperatura brillo

W = Longitud de la onda de la radiación emitida.

P =  $h * c / s$  ( $1.438 * 10^{-2} \text{ m K}$ )

h = Constante de plank ( $6.626 * 10^{-34} \text{ Js}$ )

s = Constante de Boltzman ( $1.38 * 10^{-23} \text{ J/K}$ )

c = velocidad de la luz ( $2.998 * 10^8 \text{ m/s}$ )

p = 14380

La validación de los procedimientos matemáticos expuestos anteriormente se realizó mediante la construcción de un modelo espacial de operaciones y condicionales en el software ERDAS IMAGINE 2014 a la imagen la imagen LC80080572015004LGN00.



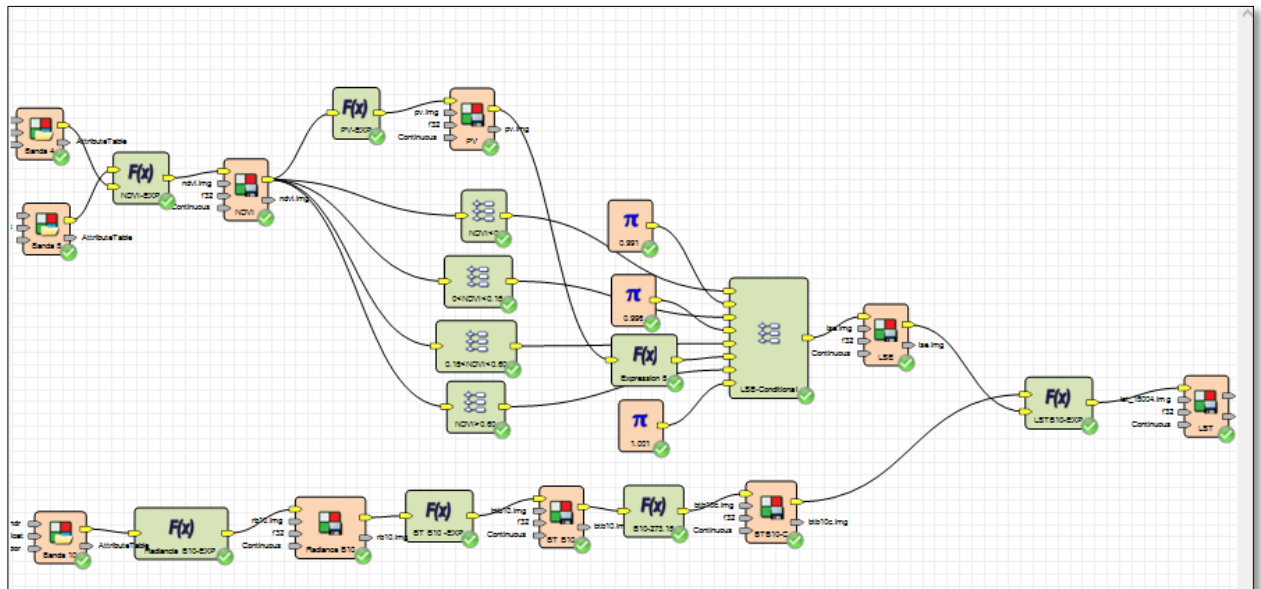


FIGURA 7. MODELO ERDAS IMAGINE 2014.

Fuente: (elaboración propia, 2017)

**4.2.3 Fase 3:** Análisis de resultados. Una vez terminado el procedimiento de tratamiento de las imágenes se procedió realizar el análisis de las condiciones particulares de los índices de vegetación, proporción de vegetación, emisividad y temperatura superficial para luego validar los datos resultantes con el análisis espectral y de comparación con los datos de referencia.

## 5. ANTECEDENTES

### 4.3 El paradigma Del Desarrollo Sostenible

Satisfacer las necesidades del presente sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. Sobre esta escueta definición del concepto de desarrollo sostenible y contenida en el informe de Brundtland (Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo 1998). Ciertamente acompañada de una serie de necesarias precisiones y deudora de iniciativas anteriores como el informe de Meadows sobre “Los Límites del Crecimiento” (1972) o la primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano (Estocolmo 1972). Se ha erigido el apremiante debate en torno a la conciliación del crecimiento económico y la preservación del medio natural. (Ivars, 2001).

Sin embargo la difusión internacional del concepto encontró resonancia en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo en Río de Janeiro en 1992 en el cual se establecieron las iniciativas institucionales que han contribuido a afianzar el paradigma de la sostenibilidad como referencia de las políticas ambientales y a incrementar el grado de sensibilización social en torno a los efectos ambientales del crecimiento económico.

El cambio climático como uno de los principales retos del desarrollo sostenible, ha marcado un hito en el rumbo de las sociedades modernas, teniendo en cuenta las transformaciones territoriales asociadas a la adaptación debido al cambio en las variables climatólogicas, lo cual incide en los desplazamientos y nuevos patrones de asentamiento y por lo tanto de actividades económicas por parte de la población.

Por lo que el objetivo trazado está basado en una revolución socio – ambiental como iniciativa gubernamental que se intenta difundir en todo el mundo, el sentido de las estructuras sociales, económicas, políticas y culturales debe adquirir importancia en la preservación, conservación y mitigación de efectos adversos sobre el espacio, evitando al máximo la acción antrópica, conformando así sociedades inteligentes y sostenibles.

No obstante, la rápida y generalizada adscripción de las instituciones y los agentes sociales a los principios teóricos del desarrollo sostenible contrasta con la pervivencia de patrones insostenibles en la conservación y gestión de los recursos naturales y en la distribución de los beneficios del crecimiento económico.

Debido a la pervivencia de estos patrones insostenibles de gestión de los recursos naturales las ciudades se han visto obligadas a insertarse en los procesos de gestión urbana, que promueve la sostenibilidad requiriendo una variedad de instrumentos que traten los problemas ambientales, sociales y económicos con objeto de sentar la base de integración necesaria. Al aplicar estos instrumentos, la formulación de

planes urbanos para la sostenibilidad puede ser mucho más útil que lo que ha sido hasta la fecha.

En los lineamientos Ambientales para la Gestión Urbano Regional en Colombia se establecieron dos objetivos: en primer lugar, la promoción, orientación y construcción de procesos de desarrollo urbano regional sostenibles que contribuyan a elevar la calidad de vida de la población de las ciudades y las áreas metropolitanas, en sus relaciones sistémicas con la base natural, espacio construido y entorno regional; y en segundo término, el mejoramiento de la capacidad de los actores institucionales y sociales para participar de manera activa, responsable y articulada con la gestión urbano regional (Ministerio de Ambiente, 2008).

El esquema de gestión ambiental urbana supone un enfoque integral, con el propósito de articular las acciones de los diferentes actores institucionales y sociales que tienen que ver con la ejecución de las diferentes políticas, planes y normas ambientales, territoriales y sectoriales que se desarrollan en las áreas urbanas y que, de manera independiente, gestionan asuntos específicos del medio ambiente al interior del perímetro urbano. (Ministerio de Ambiente, 2008).

#### **4.4 Aplicaciones de la teledetección al desarrollo sostenible**

La teledetección es la ciencia y arte de obtener información acerca de la superficie de la Tierra sin entrar en contacto con ésta. Para lograr el proceso se va detectando y grabando la energía emitida o reflejada, procesando, analizando y aplicando esta información. (Chuvieco Salinero, 2002).

El desarrollo de las investigaciones orientadas a conocer el territorio y el balance y estado de los recursos naturales tiene una fuerte relación con el objeto de estudio de la teledetección, ya que están orientados a la ejecución de los procedimientos especializados sobre las imágenes con el fin de generar los diversos productos, entre ellos el mapeo de condiciones físicas y químicas de los componentes de la tierra, clasificaciones digitales, estudios de fenómenos y procesos ambientales en general.

Es por ello que en los últimos años la teledetección ha mostrado grandes posibilidades y ventajas entre las que se destacan: observación de fenómenos temporales y la posibilidad de generar análisis complejos de las condiciones de la tierra, así como la capacidad para integrar los resultados del procesamiento del sensor con los Sistemas de Información Geográfica, generando mayor confiabilidad y referentes informativos para futuras investigaciones.

Su objetivo esencial se centra en la identificación de los materiales de la superficie terrestre y los fenómenos que en ella se operan a través de su signatura espectral (Sacristan Romero, 2006). Su aplicación en los recursos naturales se fundamenta

en que los elementos de la naturaleza tienen una respuesta espectral propia que se denomina *signatura espectral*. De esta forma estudia las variaciones espectrales, espaciales y temporales de las ondas electromagnéticas, y pone de manifiesto las correlaciones existentes entre éstas y las características de los diferentes materiales terrestres. Entre las ventajas proporcionadas por estos sistemas destacan, la cobertura global y exhaustiva, perspectiva panorámica, observación multiescala, información sobre regiones no visibles del espectro, multitemporalidad de las observaciones, transmisión a tiempo real y registro digital de la información (Chuvieco Salinero, 2002), en (Pérez Ortega, 2011).

Por todo ello, la teledetección espacial está siendo empleada como complemento y no como un sustituto, a estudios sobre el medio ambiente: oceanografía, recursos pesqueros, estudios costeros, contaminación, hidrogeología, geología, estimación de cosechas, control de plagas, incendios, producción agrícola, usos del suelo, planificación urbana, etc (Pérez Ortega, 2011).

El reto para alcanzar los objetivos del desarrollo sostenible: conservar, preservar y mitigar está un paso más cerca mediante de la investigación del funcionamiento del sistema ambiente a través de alternativas novedosas en el plano del procesamiento de los datos, la visualización y la capacidad de análisis, es por ello que la teledetección permite incorporar a este aspecto la posibilidad de estudiar los sistemas ecológicos y humanos a escalas espaciales y temporales.

## 6. MARCO TEORICO

### 6.6 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES:

#### 4.4.1 Percepción Remota o Teledetección:

La percepción remota se define como el grupo de técnicas para la obtención de información confiable sobre las propiedades físicas de ciertas superficies u objetos y su entorno, desde distancias relativamente grandes, sin contacto físico con ellos (CICEANA 2005).

#### 4.4.2 Imagen de satélite:

Es una matriz numérica de datos que nos permite hacer operaciones matemáticas para la estimación y/o determinación de variables de interés. Las imágenes de satélites provienen de diferentes sensores a bordo de satélites o aviones (aerotransportados). Los sensores pueden ser de tipo pasivo (imágenes ópticas) o activo (imágenes radar). Los pasivos miden la energía electro-magnética reflejada por la superficie a partir del sol en el espectro visible, infrarrojo cercano, medio y térmico. (IGAC, 2013)

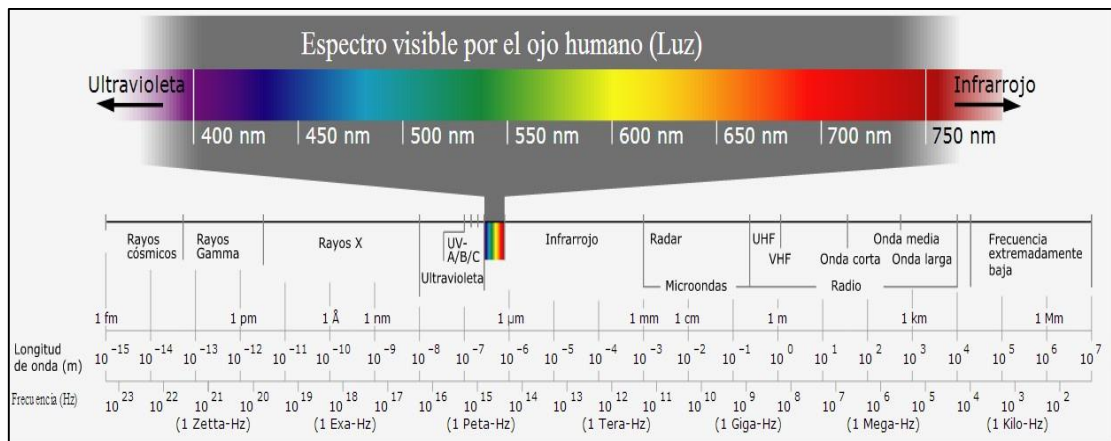


FIGURA 8. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.

Las imágenes pueden ser clasificadas según su resolución temporal, espacial y espectral, como lo muestra la Figura 9.

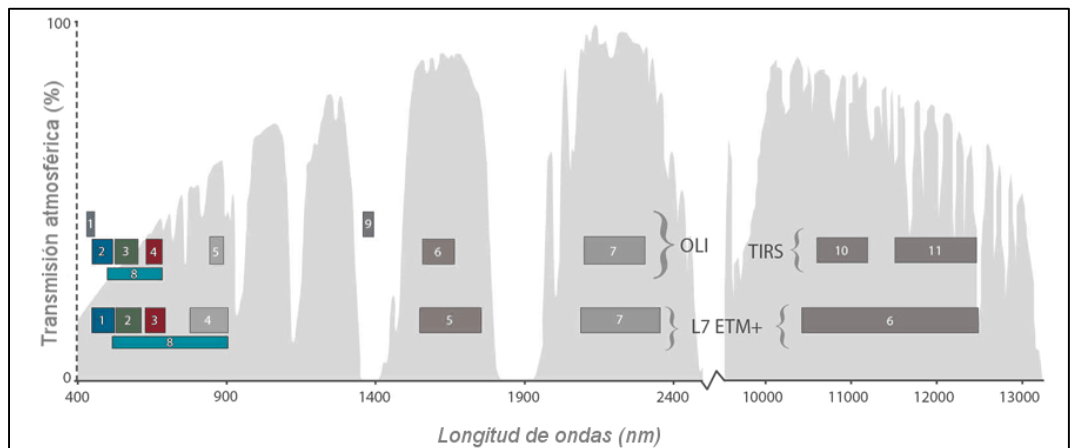


FIGURA 9. UBICACIÓN DE BANDAS LANDSAT 7 ETM+ Y 8 OLI/TIRS EN EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.

#### 4.4.3 Landsat:

Los productos de datos Landsat 8 estándar proporcionados por el Centro EROS de USGS consisten en Números Digitales (DN) cuantificados y calibrados escalonados que representan datos de imágenes multispectrales adquiridos tanto por el Imager Operacional de Tierra (OLI) como por el Sensor Infrarrojo Térmico (TIRS).

Los productos se encuentran en un formato entero sin signo de 16 bits y se pueden reescalar a la reflectancia y / o radiancia de la parte superior de la atmósfera (TOA) utilizando los coeficientes de reevaluación radiométrica proporcionados en el archivo de metadatos del producto (archivo MTL). (USGS, 2016)

El archivo MTL también contiene las constantes térmicas necesarias para convertir los datos TIRS a la temperatura de brillo del satélite. Mientras que las bandas TIRS fueron diseñadas para permitir el uso de algoritmos de recuperación de temperatura superficial. (USGS, 2016)

#### 4.4.4 Conversión a TOA Radiance:

Los datos de la banda OLI y TIRS se pueden convertir en radiancia espectral TOA utilizando los factores de reescalamiento de radiancia proporcionados en el archivo de metadatos:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L$$

FORMULA 10. CONVERSIÓN RADIANCIA ESPECTRAL

**Dónde:**

$L_{\lambda}$  = radiancia espectral TOA (Watts / (m<sup>2</sup> \* srad \* μm))

$M_L$  = Factor de reescalamiento multiplicativo específico de banda de los metadatos (RADIANCE\_MULT\_BAND\_x, donde x es el número de banda).

$A_L$  = Factor de reescalado aditivo específico de banda de los metadatos (RADIANCE\_ADD\_BAND\_x, donde x es el número de banda).

$Q_{cal}$  = Valores de píxeles de producto estándar (DN) calibrados y cuantificados

#### 4.4.5 Conversión a Reflectancia de TOA:

Los datos de la banda OLI también se pueden convertir en reflectancia planetaria TOA usando coeficientes de reescalamiento de reflectancia proporcionados en el archivo de metadatos del producto (archivo MTL). La siguiente ecuación se utiliza para convertir los valores DN a reflectancia TOA para los datos OLI de la siguiente manera:

$$\rho_{\lambda'} = M_{\rho} Q_{cal} + A_{\rho}$$

FORMULA 11. CONVERSIÓN A REFLECTANCIA DE TOA.

#### Dónde:

$\rho_{\lambda'}$  = TOA reflectancia planetaria, sin corrección para el ángulo solar. Obsérvese que  $\rho_{\lambda'}$  no contiene una corrección para el ángulo solar.

$M_{\rho}$  = Factor de reescalamiento multiplicativo específico de banda a partir de los metadatos (REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_x, donde x es el número de banda)

$A_{\rho}$  = Factor de reescalado aditivo específico de banda de los metadatos (REFLECTANCE\_ADD\_BAND\_x, donde x es el número de banda)

$Q_{cal}$  = Valores de píxeles de producto estándar (DN) calibrados y cuantificados

TOA reflectancia con una corrección para el ángulo solar es entonces:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda'}}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{\rho_{\lambda'}}{\sin(\theta_{SE})}$$

FORMULA 12. TOA REFLECTANCIA PLANETARIA

#### Dónde:

$\rho_{\lambda}$  = TOA reflectancia planetaria.

$\theta_{SE}$  = ángulo de elevación local del sol. El ángulo de elevación del centro de la escena en grados se proporciona en los metadatos (SUN\_ELEVATION).

$\theta_{SZ}$  = Ángulo zenital solar local;  $\theta_{SZ} = 90^\circ - \theta_{SE}$ .

#### 4.4.6 Conversión a la temperatura de brillo por satélite:

Los datos de la banda TIRS se pueden convertir de radiancia espectral a temperatura de brillo utilizando las constantes térmicas proporcionadas en el archivo de metadatos:

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

FORMULA 13. CONVERSIÓN A LA TEMPERATURA DE BRILLO

#### Dónde:

$T$  = Temperatura de brillo del satélite (K)

$L_\lambda$  = radiancia espectral TOA (Watts / (m<sup>2</sup> \* srad \* μm)).

$K_1$  = Constante de conversión térmica específica de banda de los metadatos (K1\_CONSTANT\_BAND\_x, donde x es el número de banda térmica).

$K_2$  = Constante de conversión térmica específica de banda de los metadatos (K2\_CONSTANT\_BAND\_x, donde x es el número de banda térmica).

#### 4.4.7 Imágenes landsat 8 obtenidas del 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. Una banda nueva (1) (azulprofundo) es útil para estudios costeros y aerosoles. La nueva banda (9) es útil para la detección de cirrus. La resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Dos bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie y se toman a 100 metros de resolución. El tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte-sur por 183 kilómetros de este a oeste (106 km por 114 km). Las bandas TIRS se adquieren a una resolución de 100 metros, pero se vuelven a remuestrear a 30 metros. (IGAC, 2013).



Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)  February 11, 2013	Bandas	longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	*Banda 10 - Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100	

(USGS, 2013)

FIGURA 10. DISTRIBUCION DE LAS BANDAS OLI Y TIRS.

#### 4.4.8 La Radiación:

Es una emisión de energía generada o emitida por un cuerpo, que viaja por algún medio o vacío hasta ser absorbida por otro cuerpo. Se puede propagar en forma de onda (radiación electromagnética) o de partículas (radiación corpuscular). El calor puede transferirse a través de este mecanismo, el cual se denomina radiación térmica (CICEANA 2005).

#### 4.4.9 Calibración Radiométrica y Corrección Atmosférica.

Este proceso permite convertir la información de la imagen original de cada pixel, de Niveles Digitales ND a niveles de radianza captada por el sensor en el tope de la atmosfera, es decir, sin los efectos de la misma, lo que permite disminuir los efectos de dispersión y absorción causados por la presencia de partículas en la atmosfera. Adicionalmente, busca remover el efecto de los diferentes ángulos de incidencia de la energía solar y de la distancia Tierra - Sol, que se producen como consecuencia de las diferencias de tiempo de adquisición de las imágenes. También es conveniente su aplicación en el caso de utilizar imágenes de diferentes tipos de sensores, pues permite normalizar las diferencias de la radiación solar causados por las diferencias de los rasgos espectrales entre las bandas de las imágenes (IDEAM, 2010).

#### 4.4.10 Reflectancia media interna (IARR):

Es una técnica de calibración que también se conoce como Normalización de Área Equal (EAN) y normaliza la imagen a una espectro medio de la escena desplazando

todas las radiaciones espectrales al mismo brillo relativo; los valores espectrales resultantes representan reflectancia en relación con el espectro promedio.

#### 4.4.11 Corrección radiométrica:

La resolución radiométrica de un sensor es la capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Los valores de los píxeles en las imágenes de satélite expresan la cantidad de energía radiante recibida por el sensor en la forma de valores relativos no calibrados llamados Números Digitales (ND); La corrección radiométrica implica la transformación de los valores de DN de la imagen a radiancia TOA (Top of Atmosphere) y posteriormente a reflectividad. (CHUVIECO, 2008)

#### 4.4.12 Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas NDVI:

El Índice de vegetación de diferencia normalizada, también conocido como NDVI por sus siglas en inglés, es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición, por medio de sensores remotos instalados comúnmente desde una plataforma espacial, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja (Senay, 2004).

El índice de vegetación de diferencia normalizada, NDVI, se calcula a partir de estas medidas individuales de la siguiente manera:

$$NDVI = \frac{IRCercano - ROJO}{IRCercano + ROJO}$$

FORMULA 14. CÁLCULO DEL NDVI.

#### 4.4.13 Radiancia espectral:

Es la cantidad del flujo radiante ( $\Phi$  energía por unidad de tiempo, vatios, W) por unidad de longitud de onda (micras,  $\mu\text{m}$ ) radiada (emitida) en un cono por unidad de ángulo sólido por una fuente cuya área ( $A_s$ ) se mide en metros (sevilla, 2006).

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} = \frac{d^3\Phi}{dw ds_\circ \cos \theta d\lambda}$$

FORMULA 15. RADIANCIA ESPECTRAL

#### 4.4.14 La emisividad superficial (LSE):

Es la relación de la energía térmica emitida por la superficie a la energía térmica emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura (en consecuencia es

adimensional .La determinación de la emisividad del suelo se calcula condicionalmente como se sugiere en (Sobrino, 2004).

#### **4.4.15 La ley de Planck:**

Describe la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro (o radiancia espectral) en equilibrio térmico en una temperatura definida (T) y frecuencia  $\nu$ ,  $I(\nu, T)$  . La ley lleva el nombre de Max Planck, quien la propuso originalmente en 1900. La ecuación viene dada por: (Senay, 2004).

$$L_{\lambda} = \frac{dL}{d\lambda} = \frac{d^3\Phi}{dw ds_o \cos\theta d\lambda}$$

FORMULA 16. LA LEY DE PLANCK

#### **4.4.16 La emisividad superficial de la tierra (LSE):**

Es una propiedad intrínseca de los materiales naturales, y se considera a menudo como un indicador de la composición del material, especialmente para los minerales de silicato, aunque varía con el ángulo de visión y la rugosidad de la superficie (Sobrino, 2004).

## 7. RESULTADOS

### 7.1 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

#### 7.1.1 Área de Estudio

El área seleccionada para la estimación de la temperatura superficial terrestre a partir del algoritmo de Barsi se ubica en el path: 57 y row: 8, comprendiendo las coordenadas al norte: 499665, al oeste: 466455, al este: 503925 y al sur: 470655 del municipio de Ibagué. La Figura 11 delimitada en falso color (RGB) corresponde a dicha área, cuya altitud es de 1285 metros sobre el nivel del mar, precipitaciones de 1620 mm de lluvias anuales y una temperatura superior a los 29 ° C.

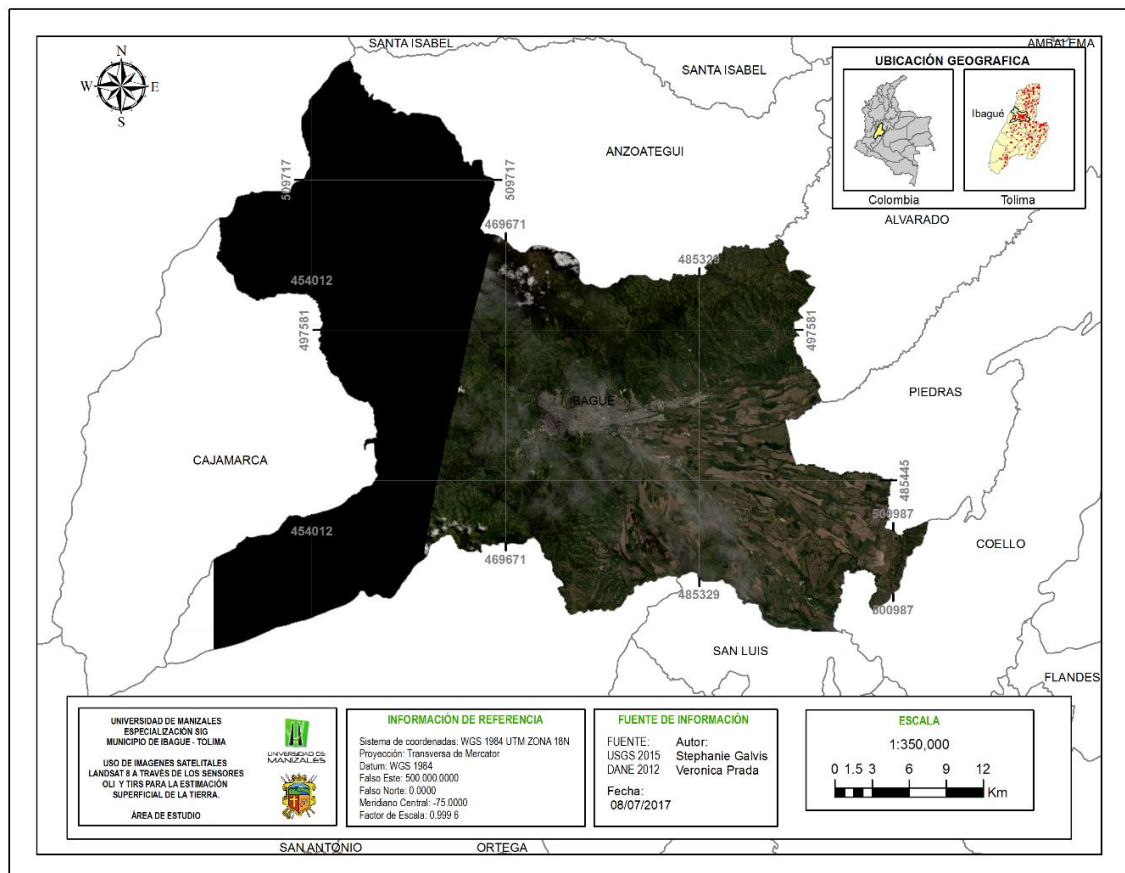


FIGURA 11. MAPA DEL ÁREA DE ESTUDIO.

#### 7.1.2 Índice diferencial de vegetación normalizada:

Con base en la aplicación del Índice de la Diferencial de la Vegetación Normalizada (NDVI) se obtuvieron las condiciones de la vegetación en el área de estudio al

momento de la toma de la imagen que comprende el periodo diciembre de 2015, El NDVI es un índice no dimensional, y por lo tanto sus valores van de  $-1$  a  $+1$ , lo cual se refleja en la Figura 12 donde se aprecia que el NDVI tiene un valor entre  $-1$  y  $0.53$  tendiente a  $+1$ .

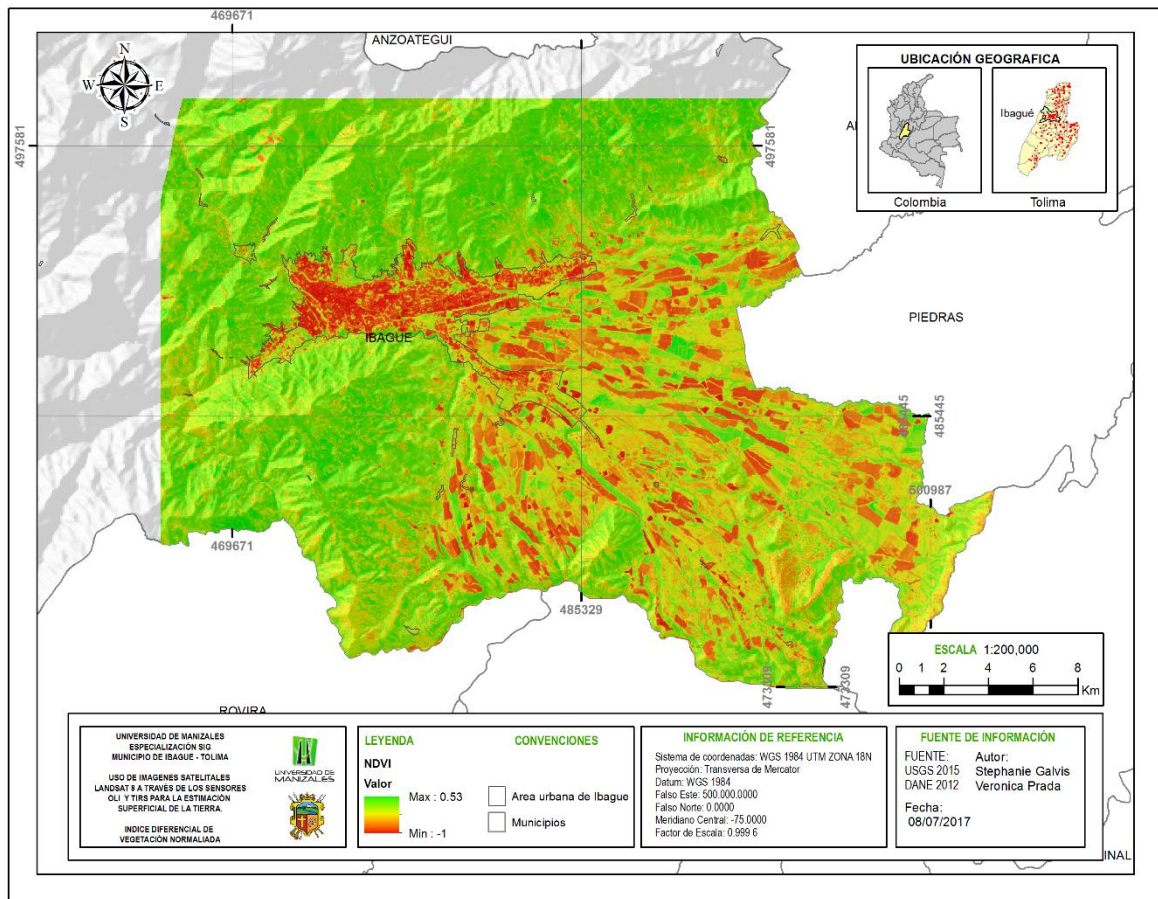


FIGURA 12. MAPA DEL ÍNDICE DIFERENCIAL DE VEGETACIÓN NORMALIZADA.

Cuando el NDVI está cerca de  $-1$  indica ausencia de vegetación y cuando está cerca de  $+1$  indica abundancia de la vegetación, esto es visible principalmente en las zonas que se observan de color verde en el mapa correspondiente a varios patrones de cobertura y uso del suelo.

En primer lugar tenemos la zona occidental en los límites con Cajamarca donde se encuentra el alto de la línea zona sobre la cordillera central, donde las coberturas son predominantemente boscosas y arbustivas y las alturas oscilan entre los 1800 msnm y 3400 msnm, sin embargo resalta la tonalidad roja y naranja que corresponde a los valores mínimos de NDVI tendientes a  $-1$ , esto está dado principalmente por la existencia de la zona urbana de la ciudad de Ibagué que se delimita por la línea político - administrativa de color negro donde prevalecen las construcciones para las diferentes destinaciones económicas del suelo, por ello los

índices de vegetación van a estar al mínimo en esta zona donde la cobertura es concreto y suelo desnudo.

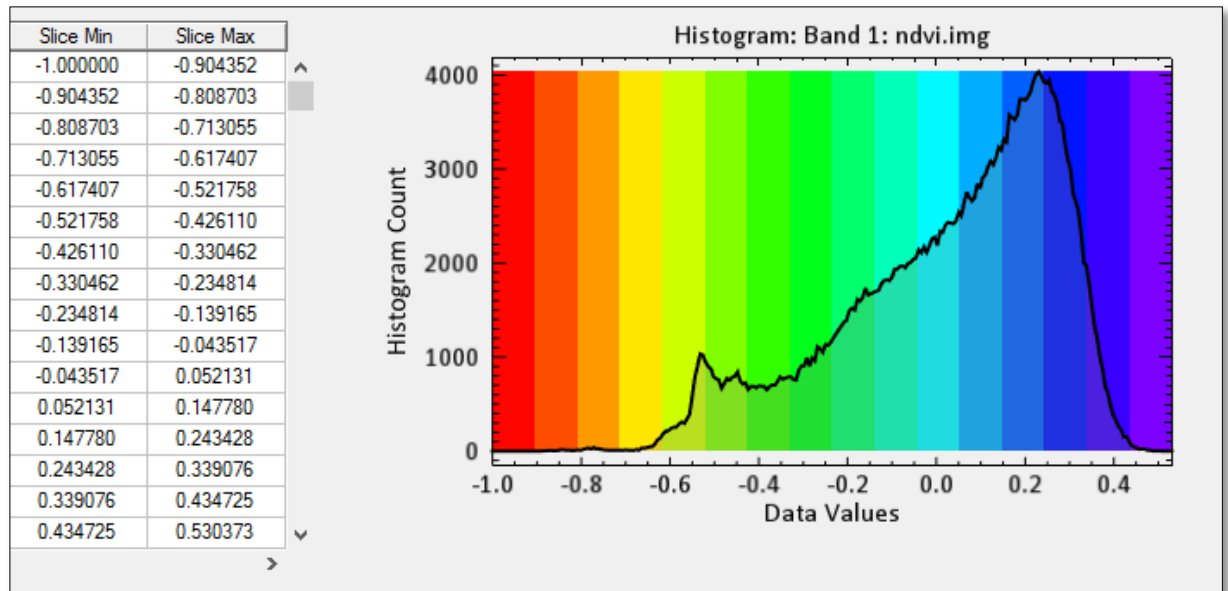


FIGURA 13. HISTOGRAMA NDVI.

En segundo lugar tenemos la zona sur – oriental donde se hace evidente la expansión de un mosaico de coberturas con patrón típico de pastizales, dónde las tonalidades comienzan a variar entre amarillos, naranjas y rojos que coinciden con los valores observados en la Figura 13 que van de 0.052 a -1 corresponden a los pastos secos, cuerpos de agua y a la tierra desnuda lo que indica la ausencia de vegetación vigorosa, mientras que los valores por encima de 0.052 hasta 0.53 tendientes a +1 que también tienen presencia en esta zona son indicadores de la actividad fotosintética como las zonas de matorral, bosque templado, y la actividad agrícola.

### 7.1.3 Proporción de Vegetación.

La Proporción de Vegetación (PV) fue esencial para determinación de la emisividad de la superficie terrestre (e), esta se derivó de los valores de NDVI, NDVI<sub>v</sub> y NDVI<sub>s</sub>.

Sin embargo, dado que los valores de NDVI difieren para cada área, el valor para las superficies de vegetación, 0.5, es quizá demasiado bajo para ser tomado como valor global en el caso de un NDVI calculado a partir de reflexiones del tope de la atmósfera TOA, ya que NDVI<sub>v</sub> y NDVI<sub>s</sub> dependen de las condiciones de la presión atmosférica.

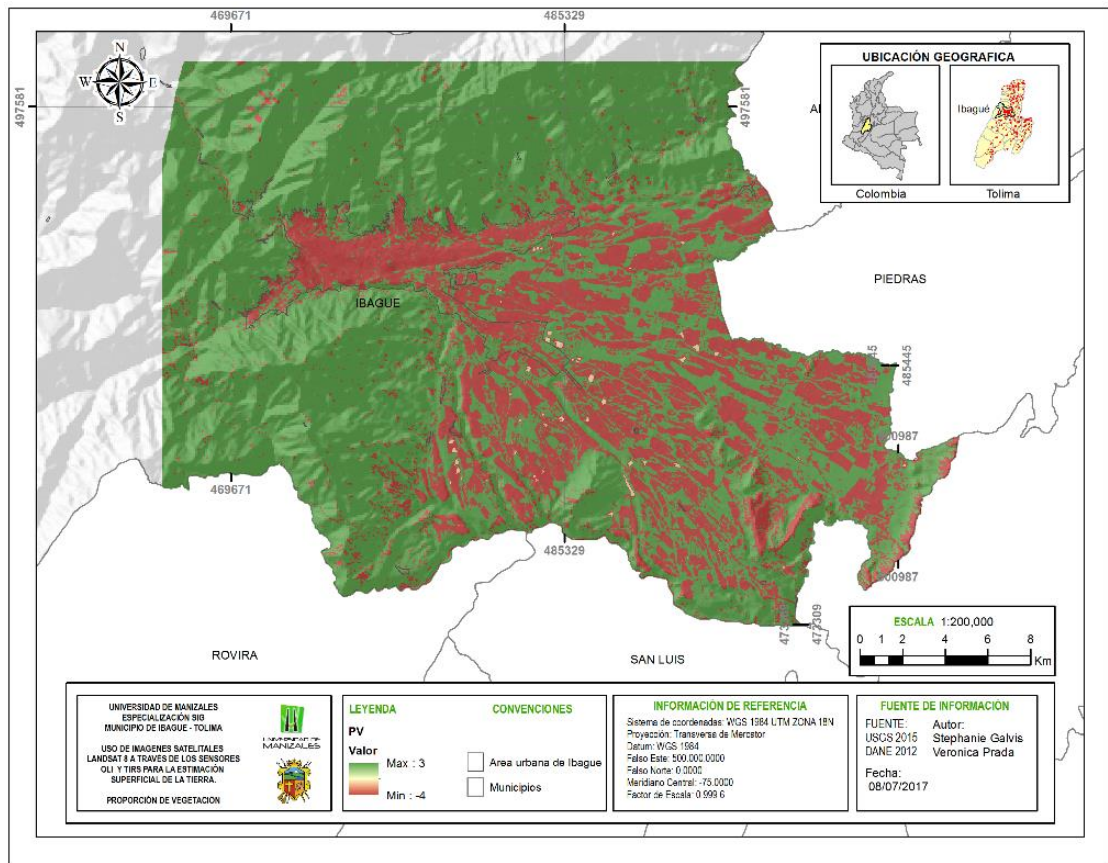


FIGURA 14. MAPA DE PORCIÓN DE VEGETACIÓN.

De lo anterior tenemos que de acuerdo con la Figura 15 el índice de proporción de vegetación va a tener valores desde -4 hasta 3 donde los mayores picos o respuestas de vegetación van a estar en 2, que en la Figura 14 está representado por el color verde más claro, y el otro pico se da en -4 con toda la cobertura roja indicando la poca proporción de vegetación es por ello que el valor es negativo, lo cual coincide con el mapa de índice diferencial de vegetación normalizada que muestra en esta zona la presencia de elementos con poco contenido vegetativo tales como: suelos desnudos, pastizales secos y construcciones.

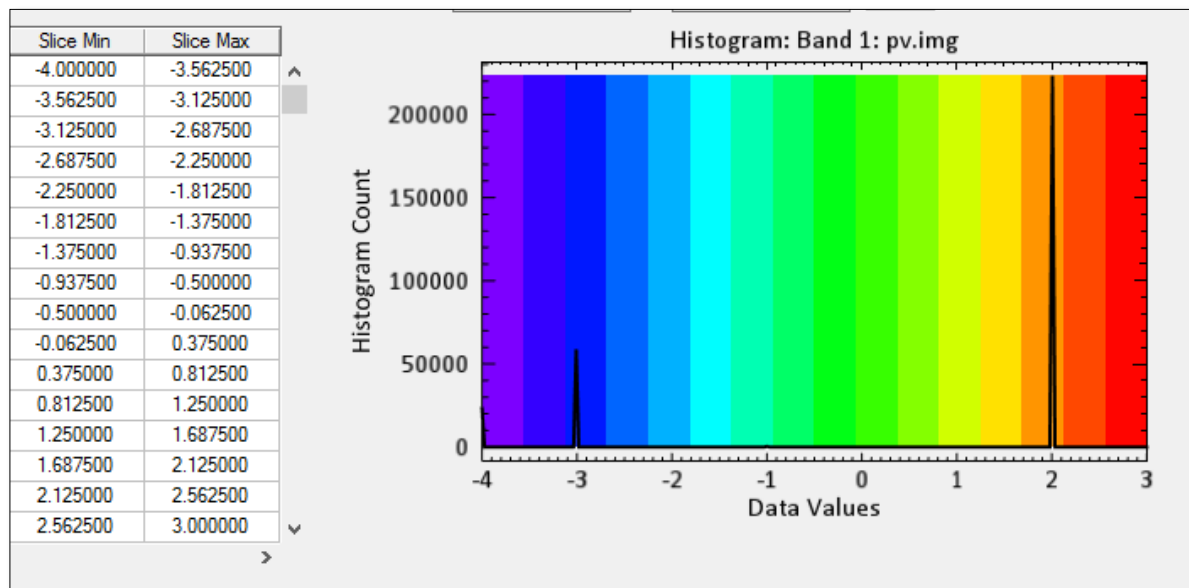


FIGURA 15. HISTOGRAMA DE LA DE PORCIÓN DE VEGETACIÓN.

#### 7.1.4 Emisividad de la superficie terrestre:

La determinación de la emisividad del suelo permitió la eficiencia de la transmisión de energía térmica a través de la superficie a la atmósfera, este mediante el cálculo condicional de las emisividades, así como se observa en la Figura 17 , los valores de emisividad cercanos a 0,991 se clasifica como agua, para valores de 0,996 se considera que la tierra está cubierta con el suelo y los valores de 0.962 se consideran mezclas de suelo.

Dado que los valores de emisividad alcanzaron su máximo pico en 0.972 cercano a 0.973 se considera que la vegetación de cubierta es predominante. Esto es posible comprobarlo con la Figura 16 en el cual se observa la predominancia en el área de estudio de las siguientes coberturas: pastos, cultivos semipermanentes y permanentes, áreas agrícolas heterogéneas, cultivos anuales o transitorios, vegetación secundaria, bosques naturales, área urbana.



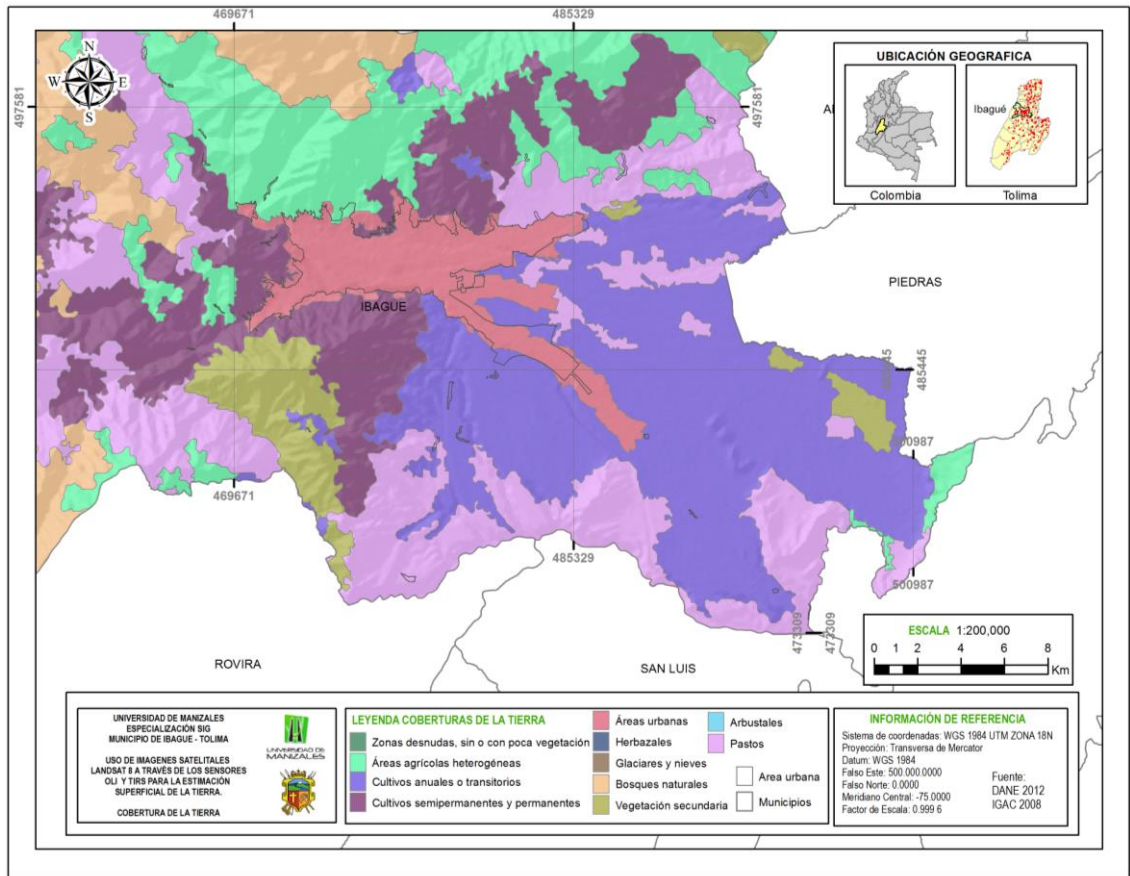


FIGURA 16. MAPA DE COBERTURA DE LA TIERRA.

Fuente: Adaptado del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2009).

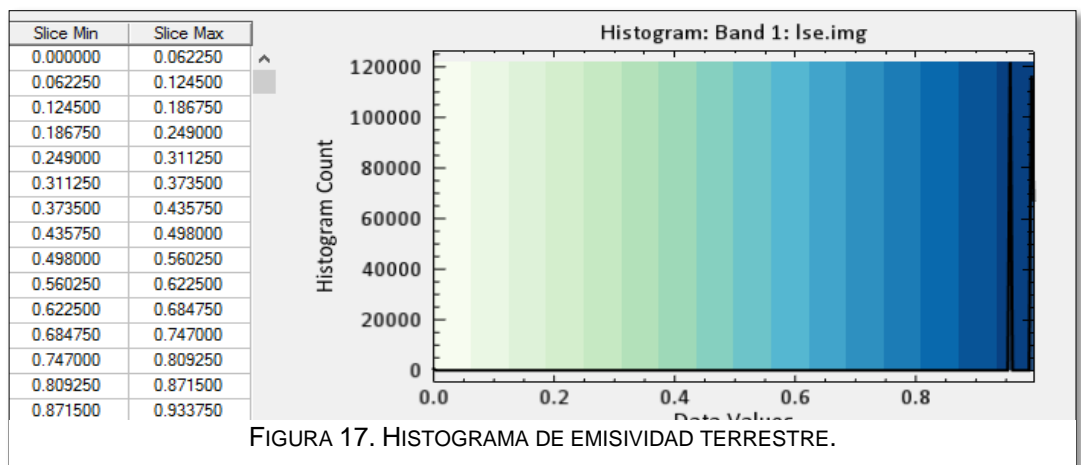


FIGURA 17. HISTOGRAMA DE EMISIVIDAD TERRESTRE.

En la Figura 17 se puede apreciar que el mayor pico de emisividades se encuentra en el azul más oscuro que corresponde a los registros del orden de 0.957 a 0.996

lo cual registra que las mayores emisividades terrestres están dadas por la vegetación de cubierta.

La Figura 18 refleja el comportamiento descrito por el histograma, donde las mayores emisividades terrestres van a estar dadas en los sitios del área de estudio que coinciden con vegetación de cubierta, lo que coincide con una zona de alta productividad tal como el abanico de Ibagué.

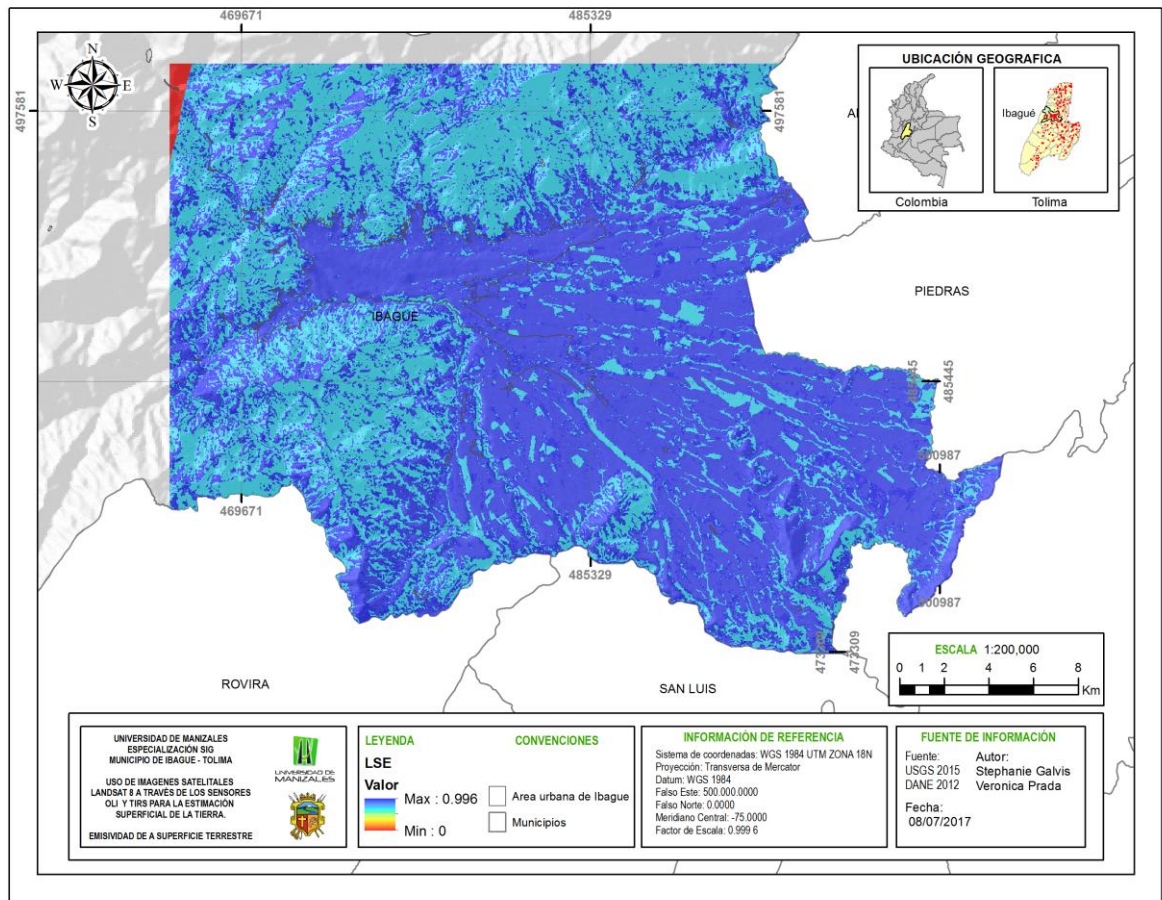


FIGURA 18. MAPA DE EMISIVIDAD DE LA TIERRA.

El abanico de Ibagué en toda la extensión que lo compone con 450 kilómetros comprende una serie de depósitos originados por la actividad volcánica del Nevado del Tolima. Principalmente se componen de flujos piroclásticos, lahares y depósitos glaciáricos que se encuentran relleno de depresiones y drenajes derivados de las estructuras volcánicas mencionadas, presentan espesores variables.

Este cubre áreas de los municipios de Ibagué Piedras y Alvarado. Y su gran productividad se debe a los depósitos volcánicos y a que cuenta con una reserva acuífera de la que captan 59 pozos inventariados, estos se ubican principalmente

en la zona oriental del área y tienen profundidades promedio entre 47 y 190 m. El principal uso del agua es la irrigación, en especial de cultivos de arroz, con 52% de los pozos destinados a esta actividad, el 26% es usado para abastecimiento doméstico, el 11% para abastecimiento público, beneficiando entre 5 y 100 habitantes por pozo y el 11% restante para uso industrial, como la producción textil.

### 7.1.5 Temperatura superficial de la tierra

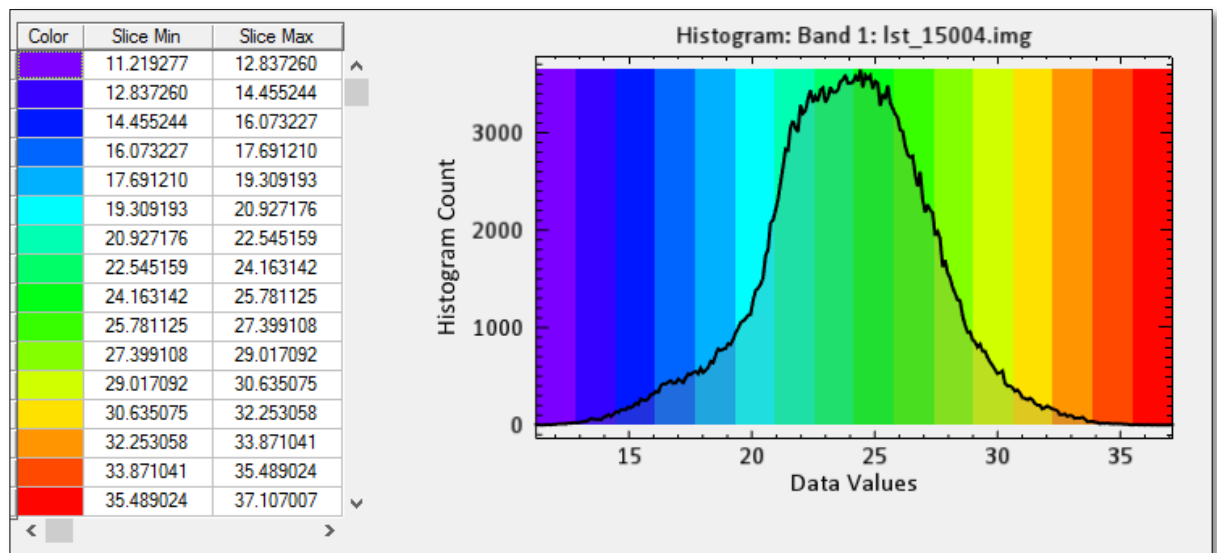


FIGURA 19. HISTOGRAMA DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA TIERRA

El algoritmo de Barsi o LST recuperado permitió determinar a partir de los datos OLI y TIRS del satélite Landsat 8 la temperatura superficial de la tierra en unidades Celsius como se observa en la Figura 19 con temperaturas que van desde una mínima de 11°C hasta los 37°C, dado que la fecha de obtención de la imagen corresponde a diciembre de 2015, periodo estacional que se considera temporada de lluvias en esta zona del país por estar en la confluencia de la cordillera central y el valle del río Magdalena; la vegetación en el área de estudio es muy densa, con una fracción de cubierta media del 80% para la mayoría de las áreas, excepto las áreas con desarrollos urbanos.

La Figura 20 muestra la distribución espacial de la LST recuperada que oscila entre 11 ° C y 33 ° C con una media de 23 ° C. en el área urbana, específicamente, la ciudad de Ibagué tiene un clima es cálido seco.

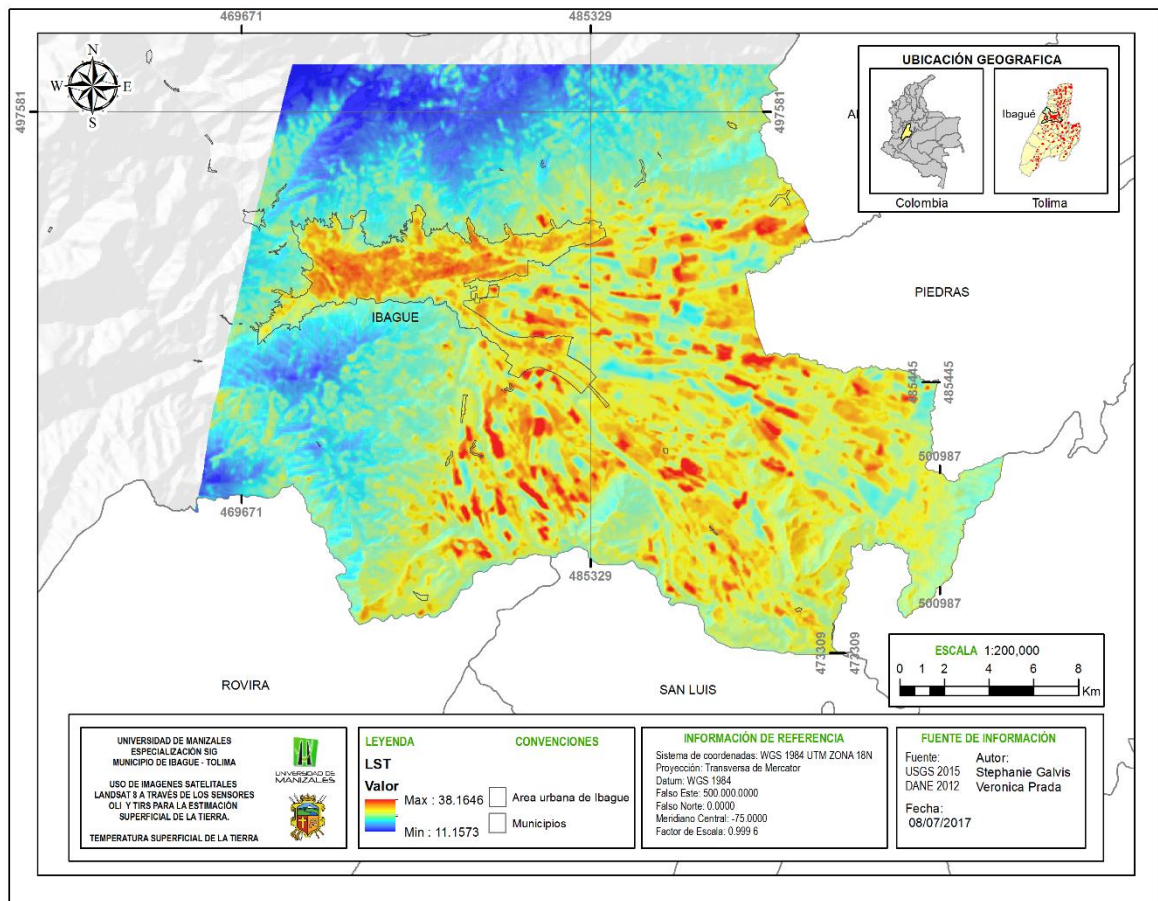


FIGURA 20. MAPA DE DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA TIERRA

Las áreas suburbanas ubicadas espacialmente hacia la zona oriental sobre el abanico de Ibagué tienen una LST que oscila entre 20°C y 38 ° C. Por lo tanto, la diferencia LST entre el área urbana y el área suburbana en la región es de  $\geq 5$  ° C.

Otra característica de la distribución de LST en el área de estudio es que las áreas del sector occidental tienen un LST muy baja, debido a que estas áreas son zona de la cordillera central y la altitud promedio de 1800 msnm que determina no solo usos del suelo con predominante vegetación de bosque que genera mayores precipitaciones haciendo de estas zonas lugares más fríos, y explicado también en el hecho de que la cantidad de energía recibida en cada lugar varía en función de la latitud de modo que el proceso de enfriamiento es más intenso en estas zonas de montaña.

## 8. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### 4.5 Validación de datos obtenidos a partir de imágenes Landsat 8

Uno de los mayores problemas que plantea la estimación de la temperatura superficial de la tierra a partir de sensores remotos es la acción combinada de las perturbaciones debidas al efecto atmosférico y la variabilidad en las emisividades de las diferentes coberturas de la tierra.

No obstante, el nivel de precisión requerido en este estudio exigió la exactitud de los modelos de remuestreo, dicho de otra forma, la anticipada corrección de los datos obtenidos de la imagen Landsat 8 del 4 de diciembre de 2015, en función a las características específicas en términos de la información espectral y discriminación del algoritmo de temperatura superficial de la tierra.

Es por esto que se llevó a cabo la conversión de niveles digitales a radiancia dando como resultado como se observa en la Figura 21 los valores correspondientes a la porción de energía reflejada que alcanza el sensor en cada una de sus bandas teniendo mayor respuesta a partir de 0.636  $\mu\text{m}$  hasta los 0.879  $\mu\text{m}$ , lo que coincide con una alta energía en las bandas del rojo e infrarrojo cercano.

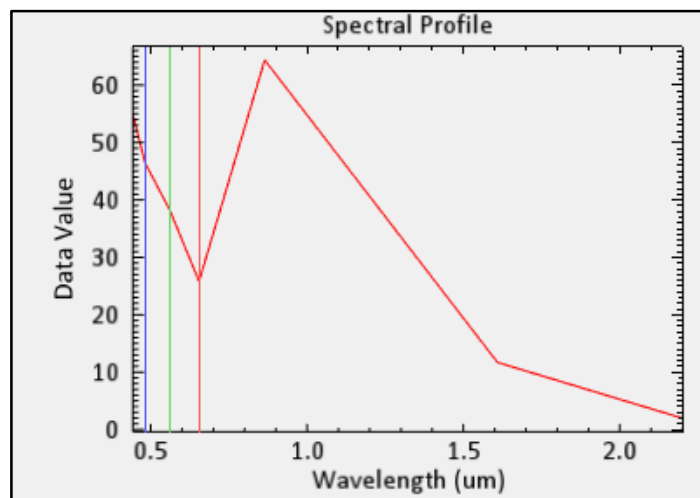


FIGURA 21. PERFIL DE RADIANCIA.

Seguidamente la reflectancia de la imagen permitió determinar el espectro de radiancia medio de toda la escena, en relación del espectro medio con todos los espectros de píxeles, es decir, la relación entre la cantidad de energía que llega al sensor en dicha banda, esto se puede apreciar en la Figura 22.

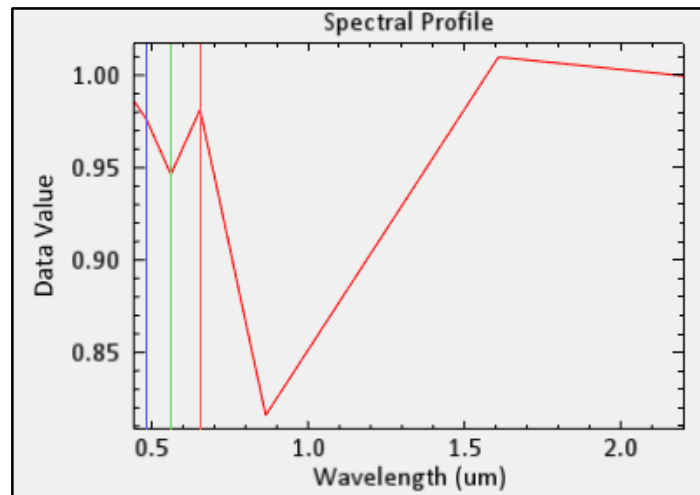


FIGURA 22. PERFIL DE REFLECTANCIA.

Donde la mayor cantidad de energía solar está siendo capturada en el sensor por la banda del rojo con valores entre 0.636 - 0.673 um.

En este orden de ideas el redimensionamiento de los datos se aplicó mediante algoritmos de interpolación, en el proceso de agregación se evaluó por medio de un modelo de ajuste que consideró el método del vecino más cercano como el adecuado para estimar los valores próximos, teniendo en cuenta el píxel más cercano redondeando las coordenadas del punto de interpolación deseado, donde el error espacial máximo será la mitad del tamaño de celda.

En relación con el algoritmo de la temperatura estimada de un píxel, esta es el resultado de la cantidad de radiación emitida en el mismo y captada por el sensor. Si el píxel considerado corresponde a la resolución de 30 metros la relación medida dependerá de la temperatura promedio de área considerada.

Entonces, dentro del área del píxel existen variaciones naturales, aún dentro de superficies cuya cubierta vegetal y tipo de suelo varíen sucesivamente. El resultado obtenido a partir de la agregación por valores promedios de la imagen Landsat 8 admiten que se genere la variabilidad térmica contenida en el píxel de forma promediada, tal como estaría contenida en los píxeles de la imagen.

Los datos remuestreados fueron los correspondientes a los índices de NDVI, PV, LSE y LST. Así que es correcto afirmar que una vez concluido el proceso se obtuvo una imagen de temperatura superficial del suelo, la misma muestra valores extremos mínimos que fluctúan en el rango de 11 a 19 °C, las zonas con esta temperatura pertenece a la cordillera central. Mientras los valores extremos más altos fluctúan en un rango de 33 a 37 °C, las zonas con esta temperatura se ubican en la zona urbana y el abanico de Ibagué.

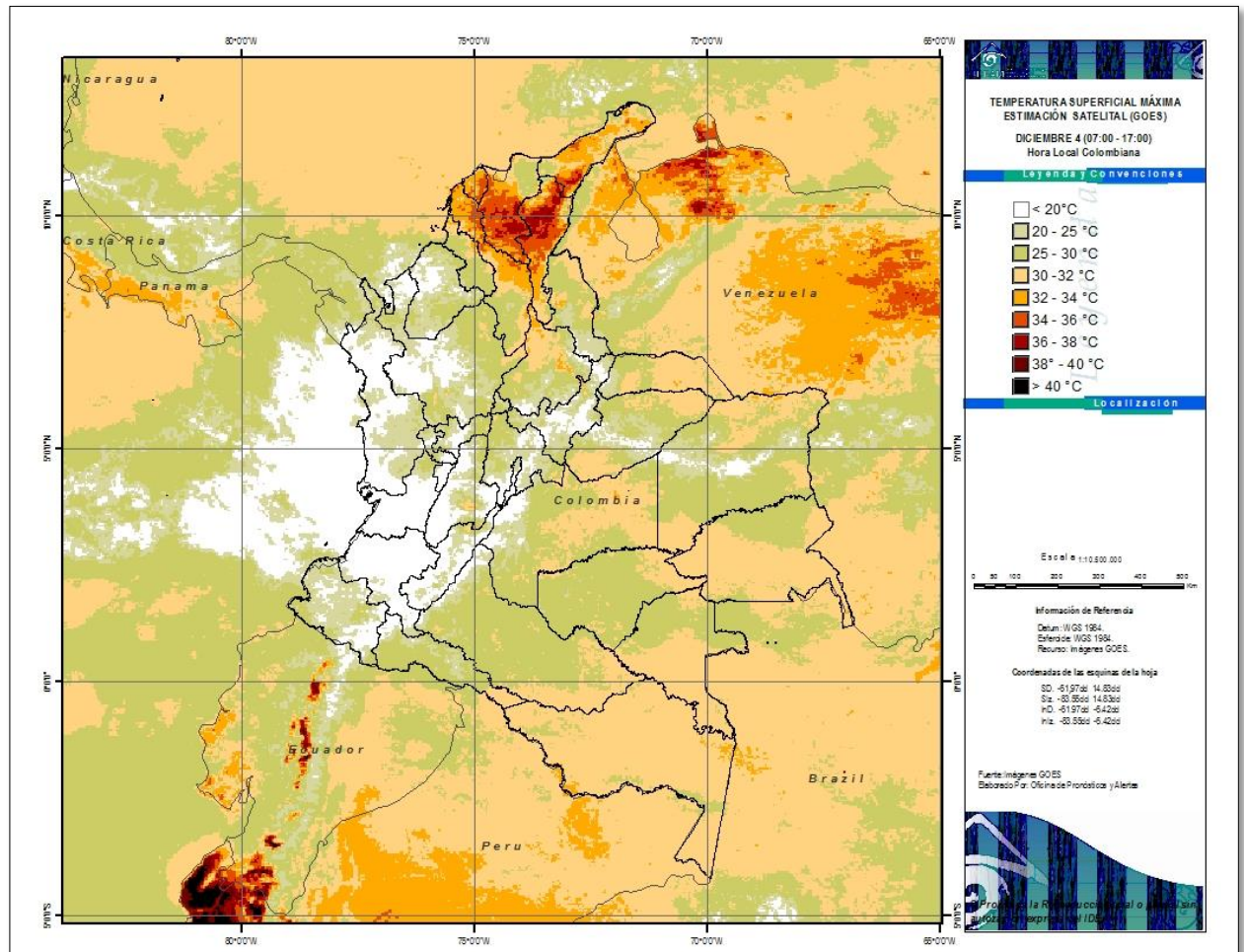


FIGURA 23. MAPA DE TEMPERATURAS DE COLOMBIA.

La Figura 23 del 4 de diciembre de 2015, misma fecha en que fue capturada la imagen del satélite landsat 8 con la que se calculó la temperatura superficial, muestra la distribución de la temperatura superficial determinada a nivel nacional por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Sin embargo se puede notar que el patrón de colores que completan el departamento del Tolima las temperaturas oscilan entre valores menores a 20°C hasta los 34°C, sobretodo en la zona de Ibagué se observa que predomina el color verde que indica que la temperatura va hasta los 30°C.

En consecuencia de lo anterior, tenemos que es precisa la comparación entre la estimación satelital realizada por el IDEAM y la llevada a cabo en este estudio ya que permite determinar variaciones que en el presente proyecto son explicadas en razón de utilidad de la banda térmica 10 ya que ayudó a discriminar coberturas, sobre todo en la época húmeda o de lluvias que está dada por los primeros días de diciembre en el valle alto del río Magdalena, donde la diferencia de temperaturas

entre clases es más fácil de pasar por alto. En esta época la vegetación natural como matorrales secos y pastizales presentan temperaturas mayores de 35°C. Estas coberturas, entre otras, se desarrollan en suelos superficiales (1-25 cm de profundidad) lo que hace que se confundan con suelo desnudo u otras coberturas, sin embargo al incorporar la banda térmica se produce la discriminación de dichas coberturas y disminuye su confusión con las clases.

Es importante aclarar que la temperatura superficial es mayor que la temperatura ambiente, también se debe tomar en cuenta que el satélite captura la imagen entre 10:30 y 11:30 de la mañana hora en la que existe una cantidad alta de radiación solar. Teniendo en cuenta que la temperatura máxima se registra de 10:00 a 13:00 horas del día, constituyéndose en los máximos absolutos. Mientras que la temperatura reportada por las estaciones meteorológicas toman en cuenta la temperatura del aire a la sombra, a distintas horas del día y las promedia, por lo que la temperatura de las 6:00 de la mañana no va a ser la misma que la temperatura del medio día, y aún su promedio, por lo que este estudio no consideró pertinente comparar la temperatura de las estaciones con la del área de estudio, por ende para este estudio fue imperante la necesidad de estimar la temperatura superficial a partir del algoritmo de Barsi basado en las respuestas de la imagen de satélite.



## 9. CONCLUSIONES

- El principal inconveniente para la elaboración de estudios ambientales utilizando imágenes satelitales está dada por la falta de disponibilidad debido a la escasa resolución temporal, principalmente por errores de captura o distorsiones atmosféricas por la cobertura de nubes existentes en zonas que por sus condiciones geográficas son propensas a tener gran cubrimiento de nubes lo cual contribuye a la pérdida de secuencia lo que afecta la periodicidad.
- Es por ello que para este estudio fue precisa la selección de una imagen con un porcentaje de nubes  $\leq 10\%$ , exactamente de 3,89% valor referenciado en el metadato de la imagen, lo cual permite estimar temperaturas mínimas en atmosferas inestables debido a la presencia de nubes pero además porque determina la fracción evaporativa existente en la imagen.
- Este trabajo ha mostrado la viabilidad técnica de obtener la temperatura superficial de la tierra y diagnósticos del estado los componentes de la superficie terrestre tales como: agua, suelo, vegetación y construcciones a través de las bandas del rojo, infrarrojo cercano y térmico del sensor landsat 8.
- El algoritmo de Barsi como todos los métodos existentes en la actualidad para determinar temperaturas tales como: MODTRAN y Monocanal de Jiménez proporcionan errores aceptables que en el presente caso están dadas por la variación de las temperaturas en función de la hora de captura que oscila en  $\pm 5^\circ$ , y la elección de uno de ellos dependerá de las condiciones y datos disponibles en cada situación.
- Es un algoritmo simple basado en teledetección que sirve para estimar temperatura de referencia no dependiente de datos auxiliares lo cual resulta funcional para su implementación en grandes áreas.
- Aunque la resolución espacial de la imagen es de 30 metros el nivel diagnóstico que ofrecen los índices como de NDVI y PV que tienen que ver directamente con el comportamiento de las coberturas, especialmente vegetales respecto de sus condiciones permiten generar alertas de su estado de crecimiento y sanidad, de modo que se observa hacia la zona oriental una zona potencial con estrés hídrico dado que las temperaturas están aumentando.
- Se puede evidenciar un potencial déficit hídrico en relación a la temperatura superficial y el índice de vegetación, es decir a mayor temperatura mayor déficit hídrico; lo contrario sucede con la cobertura vegetal, a mayor temperatura menor cobertura vegetal. En la zona noroccidental del área de estudio donde existe una mayor cantidad de bosques, el déficit hídrico es leve, mientras que en el sector de la zona urbana de Ibagué y el abanico de Ibagué el déficit hídrico se comienza a evidenciar como moderado o alto.

- Los mapas obtenidos constituyen insumos para el análisis del territorio y son precisos para su incorporación al Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático y se encuentran en coordinación con las políticas nacionales, que plantea la necesidad de encontrar mecanismos que garanticen la consecución de la línea estratégica del PGAR 2013 – 2023 del Tolima “Gestión del Riesgo y de una estrategia regional para la mitigación y adaptación al Cambio Climático la sublínea de la identificación de áreas susceptibles a los efectos del cambio climático y la variabilidad climática. A través del fortalecimiento del ordenamiento territorial y la planificación entendiéndose que para realizar una adecuada planificación, se requiere de un diagnóstico que constituya el soporte técnico para la toma de decisiones o formulación de propuestas.
- Los algoritmos seleccionados, fueron escogidos a partir de una exhaustiva validación, que tiene como objetivo asegurar que estos generaban un resultado estable en el tiempo. Futuros trabajos tendrán que verificar la exactitud de la información distribuida.

## 10.RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis multitemporal con las diferentes imágenes satelitales con la finalidad de detectar cambios en el uso de la tierra y climáticos, el seguimiento de cultivos, entre otros.
- Comparar los cambios que han ocurrido en el uso de la tierra, por el avance de la zona urbana.
- Aplicar índices de quema, estrés hídrico y otros que permitan el seguimiento del estado de las coberturas en relación a la detección de temperaturas contribuyendo al seguimiento de los procesos de la superficie terrestre.
- Utilizar la banda 9 (cirrus) para la detección y enmascaramiento de nubes que generen distorsiones en los resultados.
- Incorporar al análisis imágenes ASTER permite completar y enriquecer estos estudios con la novedad de que permiten realizar análisis a partir de características topo-meteorológicas de lo cual se obtienen potenciales análisis de erosión lo cual constituye una herramienta útil en la determinación de medidas para su manejo.
- Comparar el algoritmo de Barsi con los algoritmos Monocanal y MODTRAN que permitan visualizar las variaciones de la temperatura superficial de la tierra en la misma área de estudio.

## 11.REFERENCIAS

- ALEX ORDOÑEZ HOYOS, J. P. (2015). *ANALISIS SUPERFICIAL Y MULTITEMPORAL DE IMÁGENES LANDSAT 7*. MANIZALES: UNIVERSIDAD DE MANIZALES.
- Burítica, C. E. (2016). Boletín de prensa Gobernación del Quindío 2016-2019. *Gbernación del Quindío*, 27.
- CHUVIECO. (2008). *Teledetección Ambiental*. Madrid, España ed.: Madrid, España ed.
- CORTOLIMA. (2013). *Plan de Gestión Ambiental Regional del Tolima 2013-2023*. Ibagué - Tolima.
- DANE. (23 de Agosto de 2015). *Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. Obtenido de Departamento Administrativo Nacional de Estadística: <http://geoportal.dane.gov.co/v2/?page=elementoEstimaciones>
- Díaz Cordero, G. (2012). EL CAMBIO CLIMÁTICO. *Ciencia y Sociedad*, XXXVIIAbril-Junio, 227-240. , 15.
- G. Tyler Miller, J. (2008). Ciencia ambiental Desarrollo sostenible Un enfoque integral. *Innovación Educativa*.
- HABITAT, O. (23 de Noviembre de 2011). *ONU HABITAT Por un mejor futuro urbano*. Obtenido de ONU HABITAT Por un mejor futuro urbano: [http://www.onuhabitat.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=642:presentacion-del-qestado-de-las-ciudades-de-mexico-2011q&Itemid=258](http://www.onuhabitat.org/index.php?option=com_content&view=article&id=642:presentacion-del-qestado-de-las-ciudades-de-mexico-2011q&Itemid=258)
- IDEAM. (2010). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes, para la cuantificación de la deforestación en Co*. Instituto de Hidrogeología , Meteorología y estudios Ambientales.
- IGAC, I. G. (2013). *Descripción y corrección de productos Landsat 8 LDCM Vs 1.0*. Bogotá: IGAC.
- Ministerio de Ambiente, V. y. (2008). *Política de Gestión Ambiental Urbana*. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Morales, C. M. (2016). *Proyecto de acuerdo plan de desarrollo del municipio de Armenia 2016-2019 "sigamos adelante"*. Armenia: Alcaldía Municipal.
- Mundial, B. (20 de Agosto de 2016). *Banco Mundial BIRF - AIF*. Obtenido de Banco Mundial BIRF - AIF: <http://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS>

Senay, G. (8 de abril de 2004). *Percepción remota*. Obtenido de Percepción remota: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/34487>[fechaacceso=16 de abril de 2014}}</ref>

sevilla, U. d. (2006). *Guía básica de conceptos de Radiometría y fotogrametría*. Profesor,Dr, Emilio Gómez, González.

Sobrino. (2004). *Estimacion de la temperatura del suelo*. et al. .

Sostenible, M. d. (2017). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático PNACC*. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=476:plantilla-cambio-climatico-32>

USGS. (29 de 11 de 2016). *U.S. Department of the Interior | U.S. Geological Survey*. Obtenido de Ask Landsat: <https://landsat.usgs.gov>