ESTIMACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS ISLAS DE CALOR URBANO EN LOS MUNICIPIOS DE EL CERRITO Y PALMIRA EN EL VALLE DEL CAUCA

YESID ORLANDO MEDINA SOLARTE

UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2023

ESTIMACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS ISLAS DE CALOR URBANO EN LOS MUNICIPIOS DE EL CERRITO Y PALMIRA EN EL VALLE DEL CAUCA

YESID ORLANDO MEDINA SOLARTE

Trabajo de Grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2023

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi profundo sentimiento de gratitud y emoción al culminar mi tesis de especialización en Sistemas de Información Geográfica. Este logro representa un capítulo importante en mi vida, y no podría haberlo alcanzado sin el apoyo inquebrantable de quienes me rodean.

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a mi amada familia. A mi querida hija Emilia, quien ha sido mi fuente de inspiración constante, y a mi esposa Alejandra, por su amor, paciencia y apoyo incondicional a lo largo de este arduo proceso. Sus palabras de aliento y su comprensión fueron mi motor para seguir adelante.

También deseo extender mi agradecimiento a la Universidad de Manizales, que a lo largo de este camino demostró una paciencia infinita al permitirme culminar con éxito este trabajo de grado. Los profesores fueron fundamentales en mi formación, brindándome las herramientas y el conocimiento necesario para llevar a cabo este proyecto.

No puedo pasar por alto la invaluable colaboración de los municipios de El Cerrito y Palmira, por su disposición al proporcionar los datos necesarios para realizar el análisis en mi tesis.

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO 7

RESUMEN 9

ABSTRACT 9

INTRODUCCIÓN 10

1. ÁREA PROBLEMÁTICA 11

1.1 DESCRIPCIÓN 11
1.2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO 12

2. OBJETIVOS 15

2.1 OBJETIVO GENERAL 15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 15

3. JUSTIFICACIÓN 16

4. MARCO TEÓRICO 17

4.1 ISLA DE CALOR URBANO - ICU 17
4.2 ESTIMACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA SUPERFICIAL 18
4.3 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA 20
4.3.1 LANDSAT 21
4.4 ANTECEDENTES 23
4.4.1 CONTEXTO NACIONAL 26

5. METODOLOGÍA 28

5.1 DETERMINACIÓN DEL NDVI 30
5.2 TEMPERATURA DE SUPERFICIE – LST 32

5.3 VECTORIZACIÓN DE LAS CAPAS 38

5.4 IDENTIFICACIÓN DE LA ISLAS DE CALOR URBANA (ICU) 39

6. RESULTADOS 40

6.1 . EL CERRITO 41
6.1.1 LST 41
6.1.2 NDVI 42
6.1.3 ICU 44
6.2 PALMIRA 46
6.2.1 LST 46
6.2.2 NDVI 48
6.2.3 ICU 50
6.3 ICU EN EL CERRITO Y PALMIRA 52

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 54

7.1 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN DE VARIABLES 54
7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS 55

8. CONCLUSIONES 57

9. RECOMENDACIONES 58

BIBLIOGRAFÍA 60

GLOSARIO

Isla de Calor Urbana (ICU): Aumento localizado y significativo de la temperatura superficial en áreas urbanas, principalmente debido a la actividad humana y la falta de vegetación.

Temperatura Superficial (LST): La temperatura medida directamente en la superficie terrestre, que puede variar en áreas urbanas debido a factores como la radiación solar y el calor generado por edificios y pavimentos.

Cobertura Vegetal: La proporción de un área cubierta por vegetación, que incluye árboles, arbustos y otros tipos de plantas.

Índice de Vegetación Normalizado (NDVI): Una medida de la cantidad y salud de la vegetación en un área, calculada a partir de la información capturada por sensores remotos, como satélites.

Perímetro Urbano: Los límites geográficos que definen el área de desarrollo urbano de un municipio, generalmente regulados por las autoridades locales.

Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT): Instrumento técnico y normativo de planeación y gestión del territorio; conformado por un conjunto de acciones políticas, normas, programas y proyectos), que orientan el desarrollo del territorio municipal con una población entre los 30.000 y 100.000 habitantes.

Cuencas: Áreas geográficas que drenan hacia un río o lago común, que pueden influir en la dinámica ambiental de una región.

Zona Verde: Áreas en un municipio designadas para la conservación de la vegetación y la promoción de espacios naturales dentro de entornos urbanos.

Vocación Agrícola: La aptitud de un terreno para la agricultura y la producción de cultivos.

Clima Urbano: Las condiciones climáticas específicas que se desarrollan en áreas urbanas debido a factores como la absorción de calor por parte de los edificios y el concreto.

Microclima: Condiciones climáticas locales que pueden variar significativamente de un área a otra dentro de una ciudad debido a diferencias en la topografía, la vegetación y la infraestructura.

Déficit de Zonas Verdes: Una situación en la que una ciudad tiene una cantidad insuficiente de áreas verdes, lo que puede contribuir a un aumento de las Islas de Calor Urbanas.

Cubierta No Vegetal: Superficies como el concreto, el asfalto o los edificios que no están cubiertas por vegetación.

Expansión Urbana: El proceso de crecimiento de las áreas urbanas en territorios previamente rurales o no urbanizados.

Radiación Solar: Energía emitida por el sol que llega a la superficie terrestre y puede contribuir al calentamiento de las ciudades.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC): Ente corporativo de carácter público creado por ley, encargado de administrar los recursos naturales renovables y propender por su desarrollo sostenible en el área de jurisdicción que comprende el departamento del Valle del Cauca.

Acuerdo Municipal: Constituyen la forma a través de la cual los concejos adoptan las decisiones a su cargo. Su naturaleza es la de ser actos administrativos. Para el caso del ordenamiento territorial puede incluir aspectos relacionados con el desarrollo como lo son los cambios en el perímetro urbano.

RESUMEN

El Cerrito y Palmira son dos municipios que se localizan en el departamento del Valle del Cauca, los cuales poseen una vocación del uso del suelo mayormente agrícola, sin embargo, debido a los procesos de densificación de áreas y transformación del paisaje, lo que conlleva a una sensación de stress térmico en áreas urbanas de mayor densidad poblacional y de mayor transformación en e usos del suelo. El objetivo principal de este estudio se concentra en la estimación y análisis comparativo de las Islas de Calor Urbano (ICU) en las áreas urbanas de los municipios de El Cerrito y Palmira para establecer la relación del índice de Vegetación Diferencial Normalizada (NDVI) y la temperatura superficial terrestre (LST). La estimación de las ICU y su análisis comparativo se realiza en tres etapas; la primera en la búsqueda de imágenes de satélite en motores de búsqueda disponibles para el área de análisis, la segunda, el tratamiento de las imágenes y cálculo de las variables como NDVI y LST y la tercera el análisis de información y las recomendaciones generales. Los resultados del estudio permitieron identificar espacialmente las áreas que presentan déficit de zonas verdes y sus implicaciones en la sensación térmica de sus habitantes reflejada en posibles alteraciones de la salud humana. Además, la estimación de las ICU permitió la comprensión del uso de las tecnologías geoespaciales como los proyectos *Landsat* y sus aplicaciones en la observación de la tierra.

ABSTRACT

El Cerrito and Palmira are two municipalities located in the department of Valle del Cauca, which have a mostly agricultural land use vocation, however, due to the processes of densification of areas and transformation of the landscape, which leads to a sensation of thermal stress in urban areas of higher population density and greater transformation in land uses. The main objective of this study is focused on the estimation and comparative analysis of the Urban Heat Islands (UHI) in the urban areas of the municipalities of El Cerrito and Palmira to establish the relationship between the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the land surface temperature (LST). The estimation of the UHI and their comparative analysis is carried out in three stages; the first one in the search for satellite images in search engines available for the area of analysis, the second one, the treatment of the images and calculation of the variables such as NDVI and LST and the third one, the analysis of information and general recommendations. The results of the study allowed to spatially identify the areas that present a deficit of green areas and their implications on the thermal sensation of their inhabitants reflected in possible alterations of human health. In addition, the estimation of the UHI allowed to understand the use of geospatial technologies such as Landsat projects and their applications in earth observation.

INTRODUCCIÓN

La Isla de Calor Urbana (ICU), está definida como la diferencia de temperatura entre un área urbana y sus alrededores, la cual básicamente se asocia con dos procesos: la modificación de la cobertura del suelo por urbanización con materiales como el asfalto o concreto, y actividades como las industriales o de transporte que por sus emisiones térmicas contribuyen al calentamiento del área urbana (Stewart & Oke, 2009).

Los estudios de islas de calor urbano son determinantes y contribuyen a la gestión de la calidad del aire, desarrollar estrategias de ciudades sostenibles e incluso tomar decisiones frente a la salud pública de los habitantes de áreas urbanas (Santamouris *et al.,* 2001). La identificación de las Islas de Calor Urbano, por ende, ayudan a generar un análisis del comportamiento multitemporal de las ciudades, y generar alternativas para mitigar este fenómeno que tiende a volverse crítico debido a las proyecciones relacionadas con el cambio climático (ONU-HABITAT, 2021).

La proporción de población residente en las áreas urbanas en Colombia se multiplicó por doce, al pasar de dos millones y medio en 1938 a 31,5 millones en 2005 (DANE, 2005). Este incremento acelerado es evidente es ciudades como Palmira que en tan solo 5 años pasó de 304.735 habitantes a 354.285 en 2020 (Cámara de Comercio de Palmira, 2021). Esto no es el mismo caso que ha presentado El Cerrito que en un periodo de 26 años pasó de 56.315 a 41.588 habitantes (DANE, 2021).

Esta investigación tiene como objetivo la identificación de Islas de Calor Urbana, mediante el uso de imágenes satelitales obtenidas de Landsat 9, con las cuáles se calcularon la temperatura superficial y el índice de vegetación de diferencia normalizada – NDVI por sus siglas en inglés, que permitieron correlacionar estos dos criterios para identificar y analizar la formación de islas de calor para los municipios de El Cerrito y Palmira en el Valle del Cauca.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA

1.1 DESCRIPCIÓN

La urbanización provoca una alteración de los procesos aerodinámicos, térmicos e hidrográficos que ocurren en la atmosfera local generando una modificación del clima por procesos artificiales (Lombardo, 1997), uno de los problemas identificados por el uso inadecuado del suelo y la infraestructura urbana esta dado en la creación de condiciones para la formación de islas de calor, bien sea por la impermeabilización del suelo con revestimientos de asfalto y cemento, densificación de la ocupación horizontal o vertical, y la disminución de cobertura vegetal natural o densidad de árboles urbanos.

Por otra parte, el aumento de calor en las ciudades puede verse de manera beneficiosa o perjudicial dependiendo de las condiciones climáticas y la percepción de la población. Sin embargo, en las ciudades tropicales con climas cálidos, la ICU aumenta el estrés por el calor, y en algunos casos algunas enfermedades derivadas por esta causa pueden tonarse en mortandad sobre todo para los adultos mayores y recién nacidos (Oke *et al.,* 2017).

Acorde a la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, EPA (2023) por sus siglas en inglés, existen seis razones a las que se le atribuyen el fenómeno de las islas de calor, a saber: reducción de vegetación en zonas urbanas, propiedades de los materiales, geometría urbana, aportes de calos antropogénicos, clima y ubicación geográfica.

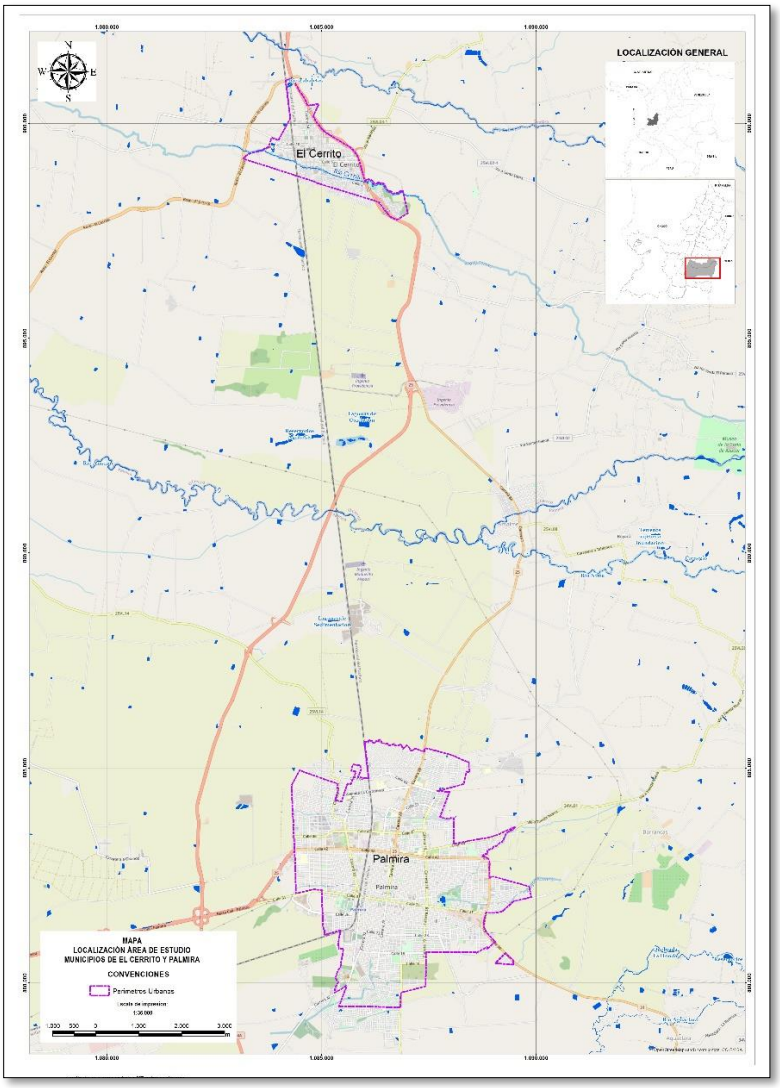
En Colombia, el fenómeno ICU ha sido estudiado a más detalle en la ciudad de Bogotá, en dónde se ha documentado una tendencia al aumento de la temperatura entre zonas urbanas comparadas con las rurales mediante análisis multitemporal (Orozco, 2020; Carvajal, 2020; Salas & Coy, 2019).

No obstante, y debido a los procesos acelerados de urbanización, y crecimiento demográfico en otras ciudades, es importante desarrollar este tipo de estudios que permitan la planificación y ordenamiento territorial de manera ordenada, contemplando por ejemplo la estructura ecológica principal, entre otras herramientas.

La importancia de la utilización de las tecnologías geoespaciales permite identificar problemas ambientales y dar soluciones técnicas basados en información geográfica. Es el caso de los sensores remotos y su impacto en la toma de decisiones para el ordenamiento territorial.

1.2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Figura 1. Área de estudio



Fuente de Datos: CVC, 2021

1.2.1 El Cerrito

El municipio de El Cerrito (Figura 1) posee una extensión de 45.600 hectáreas y una temperatura promedio de 24 °C, ubicándose entre los 987 m.s.n.m hasta los 4.000 m.s.n.m, se destaca por presentar un clima cálido, hasta clima frío y de páramo. Se localiza en el centro del departamento del Valle del Cauca y la cabecera municipal se ubica a 987 m.s.n.m (Municipio de El Cerrito, 2016).

El Cerrito se caracteriza por ser un municipio agrícola e industrial, posee cultivos altamente tecnificados como la caña de azúcar, cosechas temporales de cebolla

junca, frijol, algodón, y arroz, y entre el sector industrial se destaca empresas como la del cuero. La población del municipio acorde al DANE (2018), es de 53,983 habitantes.

Como se aprecia en la figura 2, el casco urbano del municipio de El Cerrito cuenta con 11 barrios dónde se concentra la población urbana, el 50% de la población urbana de acuerdo el documento “análisis de la situación de salud” elaborado en el 2013, reside en los barrios tradicionales de Santa Bárbara, La Estrella. San Rafael, Chapinero, Buenos Aires y El Centro y cerca del 75% de la población rural reside en los 3 corregimientos del área montañosa; El Placer, Santa Elena y San Antonio (Municipio de El Cerrito, 2013).

Figura 2. Suelo Urbano del Municipio de El Cerrito

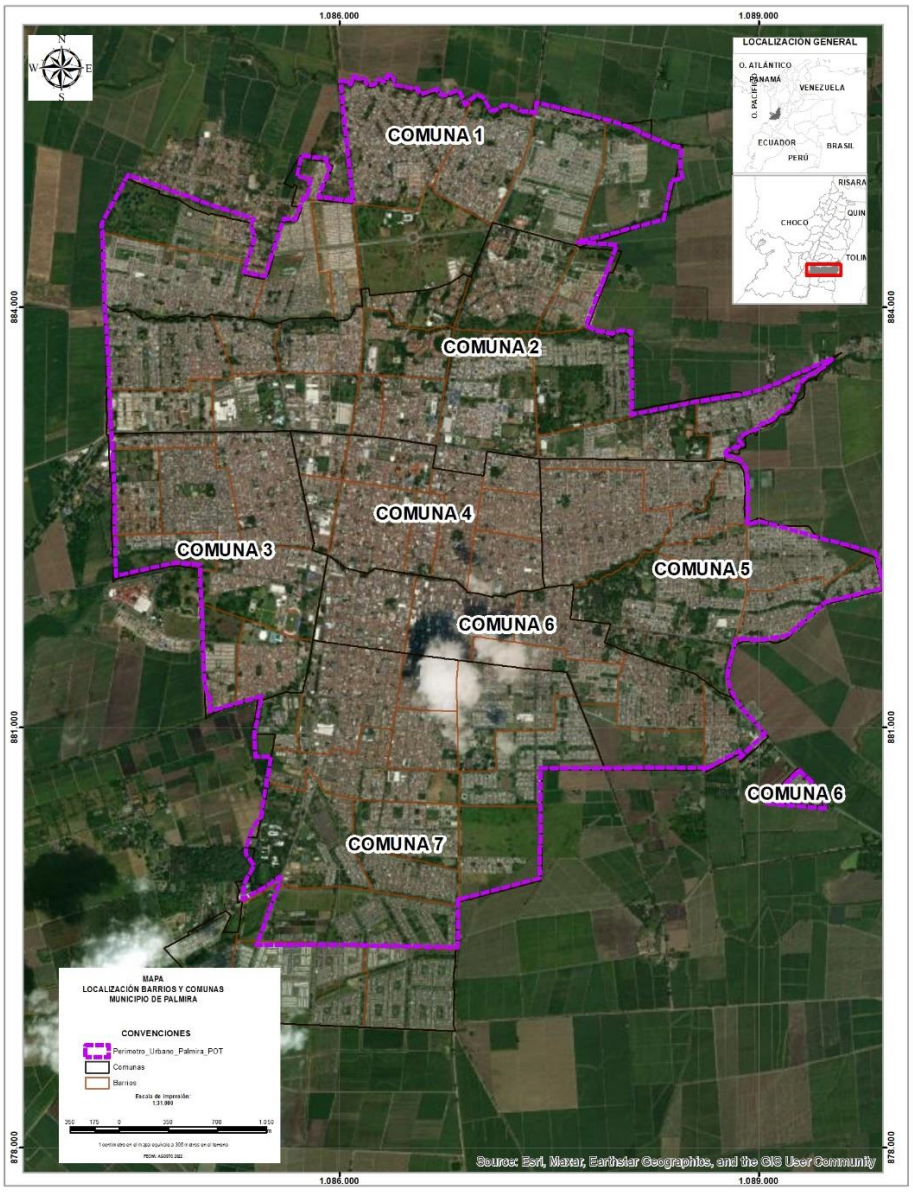
Fuente: Elaboración propia

Acorde con el censo general del 2005 (DANE, 2005), las actividades económicas de mayor importancia para el municipio son comercio que representa el 62,9%, seguido de servicios con 27,2% e industria con el 7%, otro aspecto de importancia para el municipio es que el 82,7% de las viviendas son casas y apenas un 12,2% corresponden a apartamentos.

Para el 2018 el municipio exhibe que la población se encuentra en levemente en mayor proporción en el área urbana con 37.533 habitantes contra 20.732 personas ubicadas en la zona rural.

1.2.2 Palmira

Figura 3. Suelo Urbano del municipio de Palmira



Fuente: Elaboración propia

Se encuentra localizado en la región sur del departamento del Valle del Cauca (Figura 1), posee una superficie de 112.300 hectáreas, la temperatura promedio es de 23 °C, y se ubica entre los 4.200 m.s.n.m y 980 m.s.n.m; estando su cabecera municipal ubicada a 987 m.s.n.m. El municipio al igual que El Cerrito

presenta un clima y suelos variados, que van desde bosque seco, humedales y páramo (Alcaldía de Palmira, 2023).

Las actividades económicas principales son la agricultura, ganadería, industria y comercio, y según el Censo Nacional de Población y Vivienda (DANE, 2018), posee alrededor de 302.642 habitantes.

A nivel urbano (Figura 3), Palmira se encuentra conformado por 7 comunas que albergan el 80% del total de la población del municipio. El total de barrios para el año 2022, era de 130 barrios, y a nivel rural 35 corregimientos (Alcaldía de Palmira, 2023).

El municipio a nivel rural se encuentra conformado por los siguientes corregimientos: Rozo, La Torre, La Acequia, Matapalo, Obando, La Herradura, Palmaseca, Coronado (rural), Zamorano (rural), La Dolores, Guanabanal, Caucaseco, Juanchito, Bolo San Isidro, Bolo Italia, Bolo Alizal, Amaime, Boyacá, La Pampa, Tablones, Tienda Nueva, Guayabal, Barrancas, La Zapata, Aguaclara, Ayacucho, Combia, Toche, Potrerillo, Caluce y Tenjo (Alcaldía de Palmira, 2023).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Estimar las Islas de Calor Urbano – ICU de los municipios El Cerrito y Palmira en el Valle del Cauca, a partir del sensor (*Operational Land Imager – Thermal Infrared Sensor)* OLI y TIRS del Landsat 9 para establecer comparativamente la correlación de los NDVI y la temperatura superficial.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Interpretar imágenes de satélite Landsat *9* para calcular variables de temperatura superficial y NDVI, en el área urbana de los municipios de El Cerrito y Palmira.

2. Espacializar el comportamiento de los datos de temperatura superficial para identificar las ICU en los municipios de El Cerrito y Palmira.

3. Comparar la temperatura superficial y NDVI para establecer similitudes y diferencias de las ICU en los contextos geográficos analizados.

3. JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con la ONU – HABITAT (2011), uno de los factores que más contribuyen al cambio climático son las ciudades, ya que consumen el 78% de la energía mundial y producen más del 60% de las emisiones de gases efecto invernadero, no obstante, solo abarcan un 2% de la superficie terrestre.

Uno de los fenómenos derivados del cambio climático sin duda se expresa en episodios de calor extremo y su frecuencia e intensidad, se prevé que estos episodios adquieran mayor gravedad en las ciudades debido al efecto de las islas de calor, que junto con otros factores impactan en la economía, salud y bienestar de los habitantes urbanos (ONU – HABITAT, 2011).

El desarrollo y perfeccionamiento de metodologías que permitan comprender los fenómenos derivados de los procesos de urbanización, cobertura vegetal y condiciones climáticas en conjunto, permitirán suplir el rezago que aún existe en las ciudades latinoamericanas frente al monitoreo de las islas de calor para así generar datos y estimaciones estadísticamente significativas.

Las imágenes satelitales como las tomadas por los satélites de observación terrestre estadounidense Landsat 9 en el marco del proyecto operado por la NASA y vinculados al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), son una de las herramientas para medir el comportamiento térmico de las ciudades, y permiten generar registros históricos, que brindan insumos para análisis y ejercicios de planificación y ordenamiento que sin duda son necesarios incorporar en los procesos de urbanización.

De acuerdo a lo anteriormente planteado, el objetivo principal de este trabajo de grado es aportar insumos significativos desde el uso de herramientas de información geográfica y metodologías para la identificación de Islas de Calor Urbano – ICU, para los Municipios de El Cerrito y Palmira, que serán de utilidad en el marco de los procesos de ordenamiento territorial o planificación urbana para la incorporación de consideraciones de cambio climático en aras de mejorar la calidad de vida de los habitantes.

El presente ejercicio analítico, se encuentra alineado con los propósitos de formación de la especialización en Sistemas de Información Geográfica de la Universidad de Manizales, que plantea el uso de tecnología del SIG con bases teóricas y metodológicas, y su incorporación en la planeación y toma de decisiones.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 ISLA DE CALOR URBANO - ICU

De acuerdo al Banco Mundial[1] que estableció un programa específico para ciudades resilientes, en la actualidad alrededor del 56% de la población del mundo habita en ciudades; esta tendencia aumentará dado que alrededor del 80% del Producto Interno Bruto Mundial – PIB, proviene de las urbes; por lo anterior cada día se hace más apremiante la planificación de áreas urbanas sostenibles. Para el año 2020 en el reporte anual del programa se analizaron casos alrededor del mundo mediante una metodología denominada "*city scans*", que incluye identificación de medios de acceso a hospitales o unidades médicas, posibilidad de inundaciones, así como la identificación de ICU, como elementos de planificación urbana como herramienta para mitigar los efectos del cambio climático (Banco Mundial, 2020).

La tendencia al incremento de la población urbana, que según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE, en los últimos veinte años se ha incrementado en un 37.2%, exhibiendo las mayores tendencias al aumento los departamentos de Valle del Cauca, Cundinamarca y Atlántico (Instituto de Estudios Urbanos, 2017).

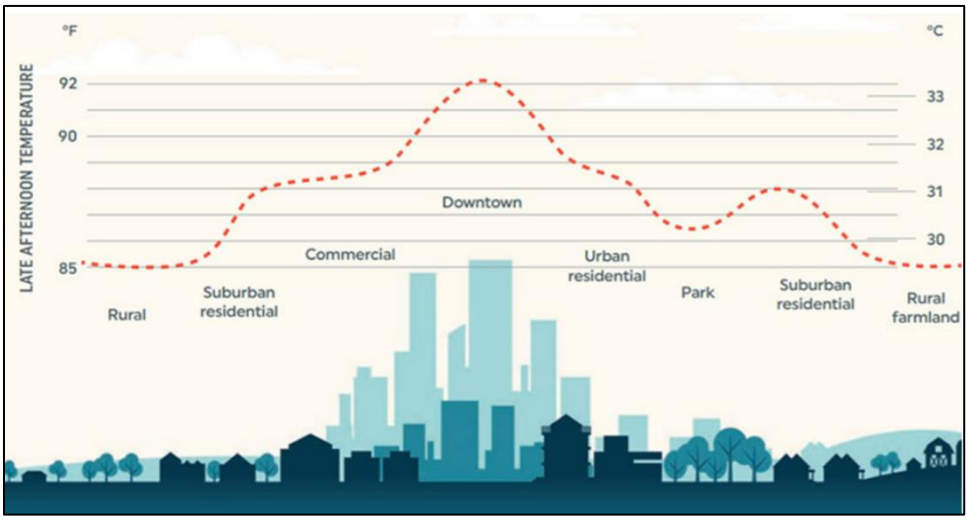
Uno de los efectos de estos fenómenos de densificación de los espacios urbanos, tanto en población, compactación y cambio de uso del suelo, consiste en el aumento de temperatura localizado dentro de la ciudad que se reconoce como isla de calor urbana - ICU (Dimoudi & Nikolopoulou, 2003). En otras palabras, la ICU es el aumento de origen antrópico de las temperaturas de la ciudad en comparación con su entorno inmediato de carácter natural y rural, esta diferencia también puede incluir otros fenómenos como el régimen de vientos, nubosidad entre otros, que pueden intensificar el proceso (Sarricolea *et al.,* 2008).

El concepto de ICU ha sido estudiado y ha tomado relevancia a nivel mundial, esto se refleja en los Objetivos de Desarrollo Sostenible. – ODS, precisamente en el objetivo 11: lograr que las ciudades sean más resilientes y sostenibles, y que entre sus metas se destaca la de aumentar para el 2030 la urbanización inclusiva y sostenible y el objetivo 13: Adoptar medidas urgentes combatir el cambio climático y sus efectos[2].

---

[1] Banco Mundial. Desarrollo Urbano, área de trabajo en ciudades y Cambio Climático: https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment. Consultado: 09/10/2023.
[2] https://onuhabitat.org.mx/index.php/la-dimension-urbana-de-los-objetivos-de-desarrollo-sostenible

Figura 4. Distribución de la temperatura en las áreas urbanas, suburbanas y rurales que exhibe el fenómeno de la Isla de Calor Urbana**.**



Fuente: *Lawrence Berkeley National Lab – U.S Department of Energy*, 2019.

4.2 ESTIMACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA SUPERFICIAL

Las Islas de Calor Urbana - ICU se pueden describir según su intensidad, forma y su máximo térmico: la intensidad, es una medida de su fuerza o magnitud que corresponde a la máxima diferencia de temperatura que es capaz de alcanzar, en su máximo térmico dentro de la capa de dosel urbana, con respecto a la de su entorno natural más inmediato para un momento determinado. En otras palabras, la intensidad es el valor numérico que obtiene la isoterma (curva que representa la misma temperatura), que se encuentra donde se presenta una isla de calor. La forma o configuración, se refiere a la distribución espacial de las isotermas, las cuales suelen tomar un patrón espacial similar al de una isla que se ajusta a la forma espacial de la ciudad. El máximo térmico, es la zona donde se produce la mayor diferencia de temperatura (intensidad) con respecto al área que se ha tomado como referencia.

Según lo expuesto por Soto - Estrada (2019), la intensidad de las ICU depende de múltiples factores, entre ellos: la población, densidad constructiva, orientación de los edificios, comportamiento térmico de los materiales utilizados en las edificaciones y tipo de uso de los espacios abiertos dentro de la ciudad. Adicionalmente, autores como Oke (1976) mencionado por Fernández y Martilli (2012), dividen el fenómeno en dos tipos: ICU atmosférica (ICUa) y superficial (ICUs):

Las ICUa, pueden determinarse mediante la diferencia de temperatura entre el aire de las zonas urbanas y rurales, su estimación se realiza con mediciones

directas a una altura específica del suelo ya sea con instrumentos móviles de medición o mediante información proveniente de estaciones climatológicas. Estas, a su vez se pueden subdividir entre la capa dosel y capa límite. La primera, es la más cercana a la superficie de las ciudades; es aquí donde el aire queda atrapado entre las edificaciones y ocasiona las variaciones de temperatura en el entorno cercano. Mientras que la capa limite, es aquella que se encuentra justo encima de la capa dosel y llega hasta los 1.5 km sobre la superficie.

Por otro lado, y según la figura 4, la ICUs se puede obtener mediante las variaciones de temperatura de superficie (LST, por sus siglas en inglés) entre las superficies antrópicas y superficies naturales (cultivos, bosques, zonas verdes, entre otros) a través de mediciones indirectas, usando imágenes térmicas obtenidas de sensores remotos. Para este análisis se tomará como isla de calor urbana (ICU) la isla de calor urbana de superficie (ICUs).

Herbel y colaboradores (2015) mencionan que existen cinco métodos básicos que permiten determinar la isla de calor urbana: estaciones fijas, transversales móviles, sensores verticales, balance de energía y teledetección, este último será el usado en el presente estudio.

4.2.1 Índice de Vegetación Diferenciada Normalizada – NDVI

El NDVI es in índice de vegetación frecuentemente usado, que estima la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radicación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja; como resultado se obtiene una nueva imagen donde destacan los pixeles que están relacionados con la cobertura vegetal (Alonso, 2015).

Aplicado a las comunidades de plantas, el índice arroja valores de intensidad del verdor de la zona, y da cuenta de la cantidad de vegetación presente en una superficie y su estado de salud o vigor vegetativo. El NDVI es un índice no dimensional (Segura & Bejarano, 2019).

Este índice varía entre los valores -1.0 a 1.0, donde los valores negativos corresponden a elementos como nubes, agua y nieve y los valores positivos representan el verdor. Un valor por debajo de 0,1 corresponde a rocas o arena; valores de. 0,2 a 0,3 representan generalmente terrenos con arbustos y prados; y valores de 0,6 a 0,8 significan presencia de bosques y zonas templadas y tropicales (Segura & Bejarano, 2019).

4.2.2 Temperatura Superficial Terrestre – LST

La LST es uno de los parámetros esenciales en los procesos físicos de la superficie terrestre, y recurrente en los estudios de cambio climático especialmente en las investigaciones sobre el fenómeno de las islas de calor urbano (Oke, 1997).

A diferencia de la temperatura atmosférica o “verdadera” que se puede medir mediante un termómetro que entre en contacto con el objeto o superficie de interés, la LST es una medida del calentamiento directo sobre la superficie terrestre, donde los rayos del son absorbidos y reemitidos (Anaya, 2019).

La LST derivada de satélites se refiere a la temperatura de radiación de la superficie observada por los sensores de estos. La superficie terrestre se define como la parte superior del follaje en áreas vegetadas o la superficie del suelo en zonas sin vegetación y la LST solamente puede ser estimada en condiciones de cielo despejado de nubes a través del infrarrojo (IR). Lo anterior debido a que la que la mayoría de los canales del infrarrojo se ven afectados al pasar por las nubes que absorben la energía en estos canales (Wan, 2008).

4.3 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Los sensores remotos tienen aplicación desde superficie, drones, avionetas y satélites, presentando ventajas y desventajas asociadas a la resolución espacial, costo de medición, área de cobertura, frecuencia temporal de medición, entre otros factores (Cuesta, 2020). Sin embargo, con el avance tecnológico, el internet y las bases de datos de libre acceso, hoy en día se tiene libre acceso a imágenes satelitales de misiones MODIS, Sentinel y Landsat para estudios ambientales (Ibidem).

Otro aspecto importante es la utilización de softwares SIG como son el Arcgis o QGIS que permiten hacer geoprocesamientos y cálculos de variables como el caso del NDVI y LST utilizando la información de teledetección disponible y de acceso abierto. Estas herramientas permiten obtener datos estadísticos y espaciales de los fenómenos estudiados.

Actualmente uno de los programas más conocidos es Landsat, en el que trabaja conjuntamente la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos, proporcionando el mayor registro espacial de la tierra, así como posee la serie de datos más larga de la historia y continúa registrando los cambios de la tierra desde el espacio (Anaya, 2019).

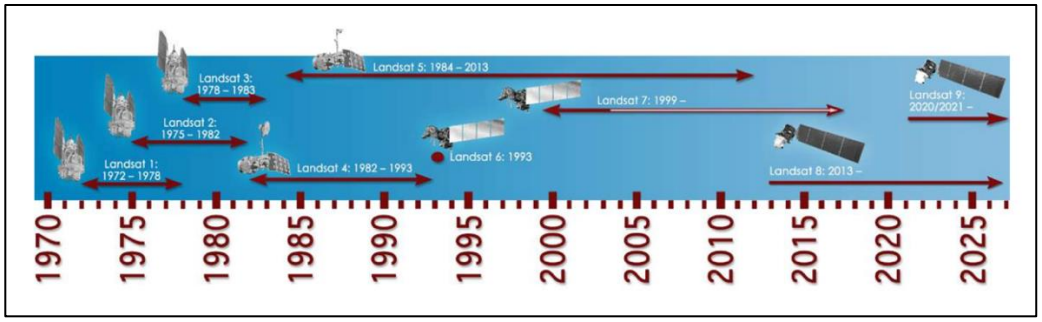
Sin embargo, la mayor limitante en emplear esta tecnología se centra en la interferencia por nubosidad por cercanías al trópico y la frecuencia de repase. Esto último quiere decir que el satélite captura información de la superficie en las áreas de interés cada 16 días.

4.3.1 Landsat

Como se mencionó anteriormente, el programa Landsat es una iniciativa conjunta de la NASA y el USGS que consiste en una serie de satélites de observación de la Tierra que proporcionan imágenes de alta resolución y multiespectrales de la superficie terrestre. El uso del programa Landsat tiene múltiples aplicaciones en diversos campos, como la agricultura, la geología, la hidrología, el urbanismo, la conservación ambiental y el cambio climático, permite monitorear los cambios en el uso del suelo, la cobertura vegetal, los recursos hídricos, los fenómenos naturales y las actividades humanas a lo largo del tiempo, lo que contribuye al conocimiento científico y a la toma de decisiones informadas.

Según la figura 5, el primer satélite Landsat fue lanzado en 1972, y se denominó Landsat 1, actualmente el programa se encuentra en su novena versión, y permiten obtener una imagen actualizada para la misma zona de trabajo cada 16 días. La importancia de estas imágenes de satélites radica en que son de libre acceso, se perfeccionan de manera continua y posee una red de colaboración internacional que inició en 2010, que permitió colectar la serie de datos generada a la fecha en archivos que no prescriben (Servicio Geológico de los Estados Unidos, 2022).

Figura 5. Línea de tiempo de la evolución de los satélites Landsat.

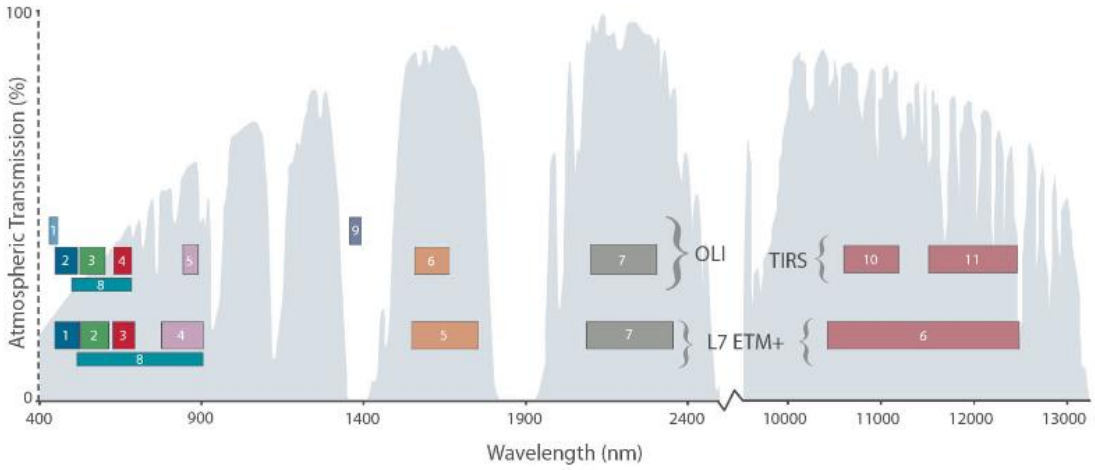


Fuente: Servicio Geológico de los Estados Unidos, 2022

Actualmente se tienen las imágenes multiespectrales más recientes de observación de la tierra de los programas Landsat 8 y 9, fueron lanzados en los

años 2013 y 2021 respectivamente y comparten características similares en cuanto a los instrumentos utilizados, por ejemplo, el sensor *Operational Land Imager* 1 y 2 (OLI- 1 y 2), que captura imágenes en ocho bandas del espectro visible e infrarrojo cercano y el *Thermal Infrared Sensor* 1 y 2 (TIRS 1 y 2), que mide la temperatura de la superficie en dos bandas del infrarrojo térmico (figura 6).

Figura 6. Gráfica sobre las bandas multiespectrales tradicionales y nuevas (b1 – b9)



Fuente: NASA. *Landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/*

Ambos instrumentos tienen sensores con una resolución espacial moderada de 15 m en la banda pancromática (8), 30 m sobre las bandas del espectro visible (2,3,4), en las bandas del espectro del infrarrojo cercano y lejano (SWIR) y 100 m en las bandas térmicas (10 y 11) que mide la temperatura superficial en el infrarrojo térmico (figura 7). El Landsat 9 tiene la capacidad de detectar un rango de intensidad más alto que Landsat 8 (resolución radiométrica de 14 bits frente a la resolución radiométrica de 12 bits).

Figura 7. Bandas Landsat 8 y 9 sensores OLI y TIRS

#	Band	Minimum Lower Band Edge (nm)	Maximum Upper Band Edge (nm)	Center Wavelength (nm)	Maximum Spatial Resolution At Nadir (m)
1	Coastal / Aerosol	433	453	443	30
2	Blue	450	515	482	30
3	Green	525	600	562	30
4	Red	630	680	655	30
5	NIR	845	885	865	30
6	SWIR 1	1560	1660	1610	30
7	SWIR 2	2100	2300	2200	30
8	Panchromatic	500	680	590	15
9	Cirrus	1360	1390	1375	30
10	Thermal	10300	11300	10800	100
11	Thermal	11500	12500	12000	100

Fuente: NASA. *Landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/*

4.4 ANTECEDENTES

La primera referencia acerca de las Islas de Calor Urbana se remonta a 1820, en donde Luke Howard encontró un "*exceso de calor artificial*" en el clima de Londres, en su investigación realizó un registro diario de los parámetros meteorológicos hallando que en la noche la temperatura promedio era 2.1 grados centígrados más caliente que en las áreas circundantes a la ciudad. Posteriormente varios autores documentaron fenómenos similares en diferentes ciudades de Europa (Viena, Paris); no obstante, el primer autor en utilizar la expresión "*Urban Heat Island*" fue Gordon Manley en 1958, en su estudio acerca sobre la variación diurna y estacional de las temperaturas de Londres y otras ciudades de Inglaterra.

Posteriormente, Oke (1981) recreó un modelo que consiste en simular el comportamiento térmico de las superficies rurales y urbanas utilizando materiales que son expuestos a la radiación infrarroja, dónde hace hincapié a que el fenómeno de islas de calor es típicamente nocturno y lo relaciona con la geometría del espacio, en cuanto a dimensión horizontal y vertical, así como otros factores meteorológicos. Estas simulaciones han sido validadas y adaptadas con datos de temperatura y puntos de verificación en campo en diferentes ciudades del planeta, lo que permitió medir las tasas de enfriamiento radiativo de las superficies.

A lo largo del siglo XXI, los estudios relacionados con la climatología urbana han ido tomando relevancia, especialmente en los Estados Unidos donde ya se cuenta con una plataforma web que integra datos científicos y tecnológicos que analiza los impactos del cambio climático, como por ejemplo, el comportamiento de los puntos de calor urbano en 44 ciudades principales (*Climate Central*, 2023).Los datos de esta plataforma han mostrado que ciudades como Nueva York, poseen

un promedio en la intensificación de las Islas de Calor superior a los 8 grados de sensación térmica, con relación a la periferia (Ibidem).

Es tal la repercusión e interés que ha generado los efectos de las ICU en los Estados Unidos, que la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos – EPA, por sus siglas en inglés, mantiene un repositorio de acciones de la comunidad como medidas de adaptación en épocas de altas temperaturas, como por ejemplo, el uso de techos frío o verdes para disminuir la temperatura, igualmente, han planteado el análisis de las ICU y la equidad, enfocándose en el acceso a espacios verdes en todos los grupos socioeconómicos, es decir, que la mayor vulnerabilidad frente a fenómenos de altas temperaturas se presenta en grupos sociales con menores ingresos y con menor acceso a espacios verdes, por lo que la EPA procura tener un acceso igualitario en los programas y las políticas públicas (EPA, 2023).

Las alteraciones del clima o los impactos del cambio climático en el ambiente, ha sido objeto de estudio de muchos científicos en el mundo, partiendo del análisis del comportamiento de las variables ambientales en el marco de una relación sociedad – naturaleza. En esa perspectiva y con el objetivo de estudiar el incremento de la población y de los asentamientos urbanos en Atenas, Philandras, *et a*l. analizan datos meteorológicos de dos lugares localizados en el área urbana y rural, entre ellos la temperatura máxima y mínima mensuales entre 1890 y 2000, lo que concluyeron que el comportamiento de la temperatura máxima tiene un incremento en la zona urbana de Atenas a partir de la II Guerra Mundial cuando se da un proceso acelerado de urbanización, además, la relación con la brisa marina del mar Mediterráneo hace que esa temperatura se incremente un unos 2°C estacionalmente.

Debido al acelerado proceso de urbanización de las ciudades y los impactos que se producen en el clima por la industrialización, el IPCC *(Intergovernmental Panel on Climate Change)* ha venido publicando una serie de informes donde señala que el clima en el planeta Tierra está cambiando aceleradamente. En estos informes evalúa los impactos del cambio climático y las consecuencias sobre la naturaleza y la humanidad, pero sobre todo el impacto en los centros urbanos donde vive más de la mitad de la población mundial (IPCC, 2022).

En el Sexto Informe de Evaluación del IPCC del año 2022, muestra que el cambio climático ya está causando pérdidas y daños en los centros urbanos. Para el caso de las altas temperaturas y su relación con los cambios en las coberturas verdes, puede afectar la salud, el confort térmico y la calidad de vida de las personas de las ciudades, especialmente durante las olas de calor (IPCC, 2022), para lo que están llamados los gobiernos locales y nacionales a tomar medidas de adaptación frente al fenómeno de las ICU.

A partir de la puesta en órbita de constelación de satélites al espacio y con el desarrollo de tecnologías de observación de la Tierra, se hizo necesario

aprovechar esa tecnología para monitorear los impactos en el cambio del clima y su impacto en la sociedad y en el ambiente. En la década de los 70s el investigador indio Rao (1972) publicó un artículo sobre el fenómeno de islas de calor utilizando datos de sensores remotos del satélite TIROS[3], el cual pudo demostrar los efectos de las ICU con datos en el infrarrojo. Su estudio pudo mostrar que el comportamiento de la temperatura de la superficie es diferente en el contexto urbano que en el rural y que la ICU varía dependiendo la hora del día, la temporalidad estacionaria y el tamaño de la ciudad (Rao, 1972).

Europa cuenta con un servicio denominado *Copernicus Climate Change Service* – C3S, implementado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio – ECMWF y el Servicio de Cambio Climático, que posee registros de intensidad de las ICU en 100 ciudades donde se implementa el programa UrbClim® que colecta registros climáticos desde el año 2008 al 2017, los cuales son insumos para estudio y simulación de los efectos de las ICU, que convergen en la construcción de una modelación del clima parametrizado con observaciones y mediciones en campo de la temperatura del aire, humedad específica, humedad relativa y velocidad del viento para el clima actual (*Climate Copernicus*, 2023). La generación de los datos climáticos y el monitoreo de las ICU en las ciudades europeas, permite a los tomadores de decisiones e investigadores, entender desde el punto de vista de la adaptación y la mitigación los impactos del cambio climático.

En el contexto latinoamericano se han realizado diversas publicaciones que estudian los impactos de las altas temperaturas en la sociedad y en la naturaleza. Para ciudades como México (Grajeda y colaboradores, 2022), se han realizado estudios y análisis sobre la ponderación e importancia del impacto y efectos de las ICU en la formulación de políticas públicas en la planificación urbana. Para Grajeda y colaboradores, pudieron concluir que los estudios realizados en el fenómeno ICU no han tenido relevancia ni impacto en la formulación de políticas públicas, aunque se han diagnosticado muchas ciudades, dichos estudios quedan en estado meramente informativo. Lo que se espera es que los resultados de próximos estudios tengan fuerza vinculante como parte de los procesos de planificación urbana en las ciudades de México.

En Sao Paulo Brasil (Sjovold, 2019) si bien se han identificado que siempre han existido las altas temperaturas, con el cambio climático y con el acelerado y no planificado crecimiento urbano, estos fenómenos de ICU tienden a aumentar en periodos cortos y más severos. Como impactos generados por las ICU se ha identificado el aumento de enfermedades infecciosas transmitidas por vectores como es el dengue, lo cual se ha correlacionado la aparición de esta enfermedad

[3] El satélite TIROS (*Television Infrared Observation Satellite*) fue el primer satélite meteorológico del mundo, lanzado por la NASA el 1 de abril de 1960. El programa TIROS fue el primer paso experimental para determinar si los satélites podrían ser útiles en el estudio de la Tierra. TIROS - NASA Science.

en zonas con temperaturas superficiales superiores a 28°C, con alta densidad demográfica y con baja densidad de espacios verdes.

Lima en Perú (Porras et al., 2022), han determinado las ICU en un periodo de 2018-2020 a partir de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas localizadas en las zonas urbanas y rurales de la Ciudad, con el objetivo de identificar las ICU en términos de variación horaria, mensual y estacional, relacionando también datos de humedad relativa y la dirección de los vientos. Se identificaron patrones de ICU en los horarios diurnos antes del mediodía, con aumentos de temperatura máximo de hasta 8.8°C y en la noche de aumentos de hasta 5.8°C. En cuanto a los meses, los valores ICU máximos promedios son para el mes de abril y los valores mínimos promedio corresponden al mes de julio. Es importante mencionar que en el estudio no se encontró correlación entre las ICU identificadas y la velocidad de los vientos, por lo que se infiere que este fenómeno está más asociado a la menor presencia de contenido de humedad en el aire.

En Chile (Sarricolea & Martín-Vide, 2014), se han desarrollado trabajos de investigación para el monitoreo del fenómeno de las ICU y la correlación de la temperatura superficial con otras variables tanto meteorológicas como con índices de vegetación como NDVI. En este estudio se calculó un indicador como es el de la Máxima Intensidad de Calor de la Isla de Calor Urbana (MICU), el cual utilizó datos de estaciones meteorológicas fijas como estaciones móviles. Como es bien sabido, la expansión urbana descontrolado y los cambios en el uso del suelo, son factores que contribuyen a la intensificación de las altas temperaturas, igualmente, la ausencia de espacios urbanos o de coberturas verdes urbanas es un determinante para la adaptación a este fenómeno y se determina a partir del NDVI.

Como se pudo ver tanto en el contexto internacional como en el latinoamericano, han evolucionado los métodos de determinar las ICU, desde las mediciones tradicionales de temperatura superficial y otros datos mediante estaciones meteorológicas, hacia la medición de la temperatura de la superficie gracias a la disponibilidad de sensores térmicos en misiones como MODIS y Landsat.

4.4.1 Contexto Nacional

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2012), se estimó a partir de datos de 450 estaciones meteorológicas que, la tasa lineal de calentamiento del país entre 1980 y 2011 fue de 0,198 °C por década; lo que significa que durante este periodo la temperatura media de Colombia habría aumentado en 0.614°C aproximadamente. Según los datos del IDEAM, el año de 1998 fue el de mayor temperatura promedio con 22.85°C, la tendencia de finales

de la década de 1990 e inicio del 2000, es la de valores de temperatura promedio elevadas. Hay que recordar que entre 1997 a 1998 se presentó un fenómeno de El Niño donde hay incrementos de temperatura promedio anual en el País.

El fenómeno de la ICU ha sido ampliamente estudiado en la ciudad de Bogotá, esto debido a que es una de las tres ciudades con mayor población de Sur América. En ese sentido, el Jardín Botánico José Celestino Mutis, viene monitoreando los cambios de uso del suelo, que mostraron una disminución del 57% de las áreas verdes de la ciudad en los últimos 29 años y un aumento en superficies urbanizadas del 18%, usando técnicas de teledetección y de percepción remota como es la clasificación supervisada para el monitoreo de coberturas e índices espectrales para identificar los núcleos espaciales de temperatura superficial (Salas et.al., 2019).

La importancia de coberturas verdes y del trabajo de restauración del Distrito, se concluye como un potencial de mitigación que tiene un arbolado urbano de Bogotá en el efecto de las islas de calor. han impulsado para la capital del país normativas que promueven la implementación de tecnologías arquitectónicas sustentables como techos o terrazas verdes[4].

En la ciudad de Armenia, se realizó una investigación liderada por Soto y colaboradores, donde se analizaron las islas de calor urbano desde 1996 a 2018, demostrando la correlación entre la temperatura superficial y la vegetación para la identificación de las ICU en ciertas zonas de la ciudad. En esta oportunidad, se usaron imágenes Landsat para detectar la relación de la pérdida de cobertura verde urbana y el aumento de la temperatura superficial, debido a esa relación, la investigación recomienda aumentar el incremento de áreas verdes en las zonas de mayor concentración poblacional y estudiar alternativas de uso de materiales de construcción que tengan propiedades térmicas como medida de adaptación (Soto-Soto *et al.,* 2020).

Para la ciudad de Medellín Soto-Estrada realizó una investigación para la identificación de las ICU en el área metropolitana del Valle de Aburrá, evidenció que entre las dificultades para estudiar las islas de calor en regiones del Valle de Aburrá están las interferencias atmosféricas, que son originadas por las emisiones gases tanto por las actividades industriales y los procesos de urbanización acelerada. Para el estudio se utilizaron imágenes Landsat TM, TM+ y OLI/TIRS entre los años 1986 y 2016. El estudio arrojó datos acerca de la concentración del fenómeno de ICU en dónde existe mayor densidad urbana y menos exposición a vientos, como por ejemplo, la zona del centro donde se concentran los aumentos de temperatura de 4.81°C aproximadamente a comparación de las zonas más alejadas del centro y de los usos industriales (Soto-Estrada, 2018).

[4] Acuerdo 418 de 2009 "*por el cual se promueve la implementación de tecnologías arquitectónicas sustentables, como techos o terrazas verdes, entre otras en el D.C, y se dictan otras disposiciones*".

Otros estudios realizados en el contexto nacional se han centrado en identificar estrategias de mitigación de la isla de calor urbana en ciudades como Barranquilla, donde Zuluaga y colaboradores identificaron estrategias de adaptación a los cambios extremos del clima como es la evaluación del empleo de árboles en los espacios públicos. Se realizaron simulaciones de la temperatura superficial para el escenario 2020 y 2050, donde se compararon opciones de sombra de las especies arbóreas teniendo en cuenta la radiación solar, como resultado se evidenció que, para este escenario de tiempo con condiciones de temperatura cambiante, los árboles pueden ser elemento de mitigación y adaptación de los valores de temperatura de las ICU. Esto puede resultar útil para el diseño de espacios públicos con mayor cobertura verde a partir del impacto de la arborización (Zuluaga *et al.,* 2023).

Para el Valle del Cauca se han realizado estudios de ICU sobre todo para la ciudad de Santiago de Cali. Para el año 2011 se realizó la identificación de ICU haciende una comparación para el periodo 1989 y 2001 de los valores de temperatura superficial y cobertura vegetal, para ese propósito, se emplearon técnicas de teledetección bajo imágenes de satélite Landsat TM y TM+, este estudio mostró como el cambio del uso de suelo es una de las causales del incremento de temperatura, y que las emisiones antropogénicas influencian directamente la intensidad de las ICU (Preciado & Aldana, 2011).

5. METODOLOGÍA

Para la realización del análisis comparativo y la estimación de las ICU en el área de estudio, se utilizaron imágenes satelitales Landsat OLI/TIRS del año 2022. Las imágenes utilizadas son multiespectrales, es decir, son imágenes que tienen la característica de abarcar longitudes de onda de luz más allá del rango visible, como son las longitudes de onda del infrarrojo y del rango del ultravioleta. Posteriormente, se utilizan las imágenes en las bandas correspondientes para calcular la temperatura superficial y el NDVI. Estas dos variables trabajan desde el infrarrojo cercano hasta la banda que térmica del Landsat 9, las cuales son procesadas a nivel de pixel a través del software Arcgis 10.8.

Las imágenes de satélite Landsat se obtuvieron a través del portal web del servicio Geológico de los Estados Unidos (http://earthexplorer.usgs.gov/). Se descargaron un total de una escena (1) con imágenes del año 2022 (tabla 1), con un porcentaje de nubosidad inferior al 45%, con este insumo se determinó la temperatura de superficie (LST) y el índice (NDVI), para ambos municipios (El Cerrito y Palmira).

Figura 8. Escena Imagen Landsat 9 para los Municipios de El Cerrito y Palmira

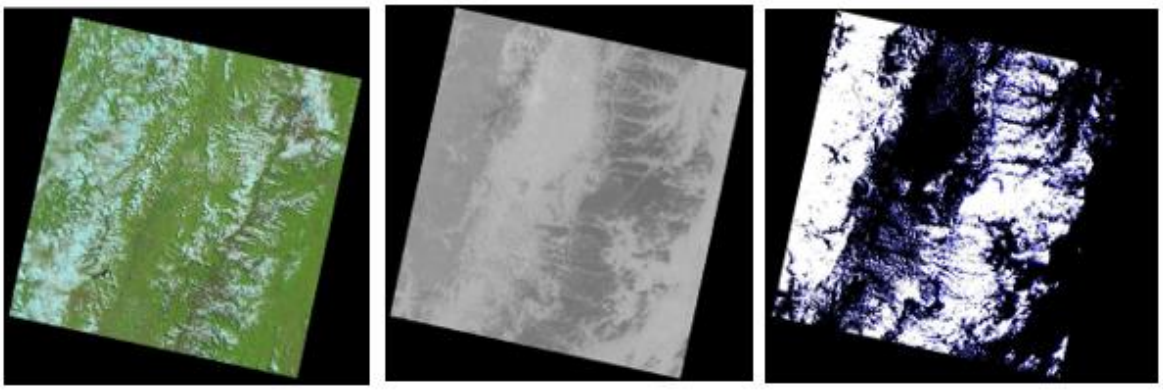


Tabla 1. Imágenes de satélite empleadas para el cálculo de LST y NDVI.

Satélite	Nombre Escena	Fecha	Variable Calculada
Landsat 9	LC09_L1TP_009058_20220818_20220818 02T1	18 agosto 2022	NDVI, LST

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 8 se puede ver la escena de las imágenes Landsat 9 con un cubrimiento de un área de 170 km x 183 km. Estas imágenes son multiespectrales con resoluciones espaciales de 15, 30 y 100 metros de pixel. Tiene un periodo de revisita cada 8 días, lo que significa que pasa por un mismo punto cada 8 días, a comparación con las imágenes Landsat 8 que tiene una revisita de 16 días. Esta cobertura global y repetitiva ha permitido a los satélites Landsat crear un acervo de información inigualable en todo el mundo en cuanto a antigüedad, continuidad, cobertura mundial y detalle[5].

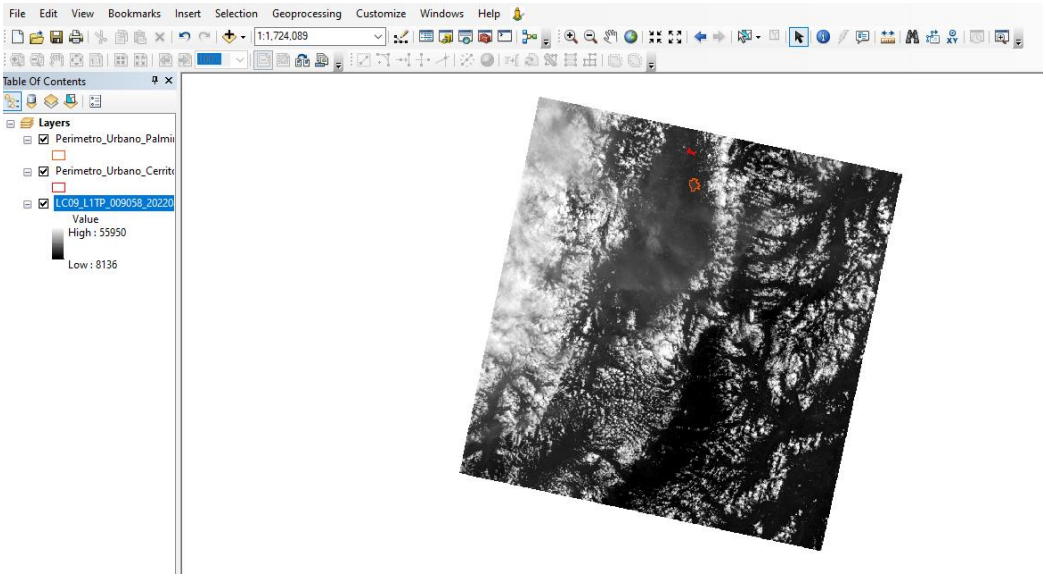
Como se mencionó anteriormente, la Landsat 9 está equipado con dos instrumentos de alta precisión. Por un lado, está el instrumento que captura la radiación en ondas electromagnéticas en nueve bandas espectrales como es el OLI-2 y por otro lado, está el sensor que captura la radiación térmica en dos bandas espectrales (10 y 11) como es el TIRS-2[6]. Una de las características de las imágenes Landsat 9, es la mejora en la capacidad de diferenciar 16000 tonalidades de color, lo que significa, tener una resolución radiométrica de 14 bits.

Una vez teniendo en cuenta la instrumentación y los insumos como son las bandas multiespectrales para el cálculo de las variables o indicadores, que permitan llegar a la identificación de las ICU.

[5] Aspectos técnicos de imágenes Landsat (inegi.org.mx).
[6] Una vista de Los Ángeles, cortesía de Landsat 9 - NASA Ciencia

A continuación, se hace la descripción de las ecuaciones utilizadas para el cálculo de las variables utilizando el "*raster calculator"* del software arcgis 10.8 usando las bandas indicadas como archivos *raster* para encontrar la LST y el NDVI:

Figura 9. Localización de la Escena de la Imagen Landsat 9 en Arcgis 10.8



5.1 DETERMINACIÓN DEL NDVI

Existen índices de vegetación permiten identificar patrones del estado de salud de la vegetación a partir de las bandas del rojo y del NIR, realizando operaciones algebraicas entre las mismas bandas espectrales. Entre los índices se encuentran el NDVI, el cual, como se ha mencionado anteriormente, identifica espacialmente el vigor, la abundancia y la actividad clorofílica de la vegetación y sus valores varían de -1 cuando el sensor identifica cuerpos de agua o nubosidades y valores cercanos a 1 en presencia de vegetación vigorosa. Se calcula este índice a partir de la siguiente ecuación:

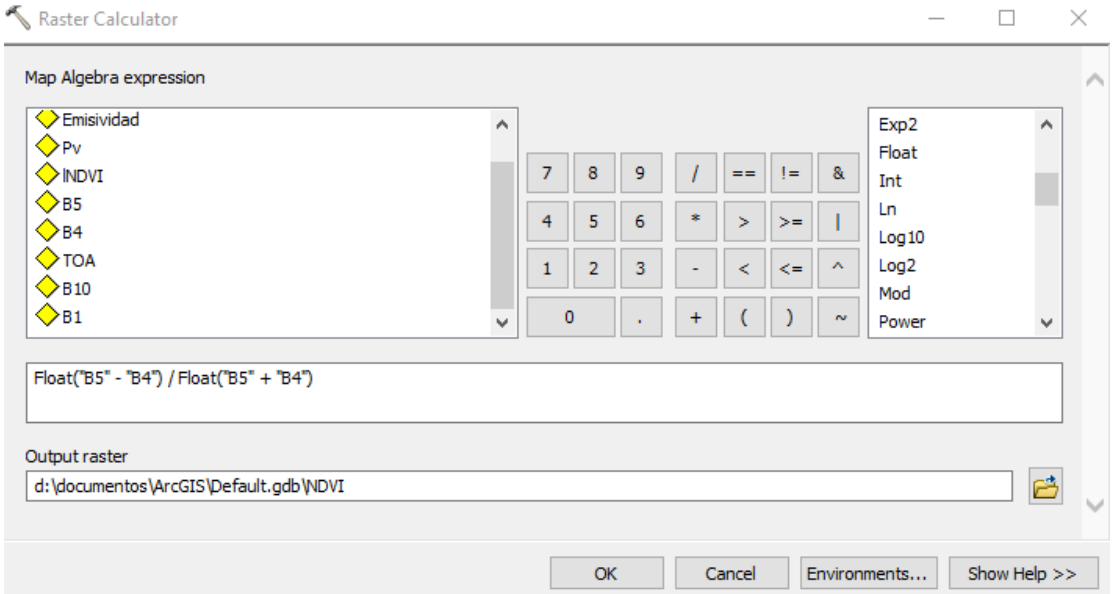
$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \; Ec.1$$

Donde:

NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada entre -1 y 1.
NIR: Banda del infrarrojo cercano o NIR (banda 5 en Landsat 9).
RED: Banda del rojo (banda 4 en Landsat 9).

Este índice de vegetación se utiliza para determinar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación y se calcula haciendo medición de la intensidad de la radiación que la vegetación emite, mostrando para el caso de la vegetación sana mayor reflejo en el NIR y en la banda del verde y absorbe más luz roja y azul.

Figura 10. Cálculo de NDVI Usando "*Raster Calculator*" de Arcgis 10.8



Los valores del índice de vegetación NDVI se agrupan en seis categorías de acuerdo a las coberturas identificadas como se evidencia en la siguiente tabla, sin embargo, para ecosistemas tropicales y perennes, la cobertura muy densa tiene valores por encima de los 0.6, es una categoría que se incorpora de acuerdo al informe técnico del CITCE-UNIVALLE[7] y que a su vez es recogida por Herrera 2017 pero a cinco categorías, (ver tabla 2).

Posterior a la identificación de la LST y del NDVI, se realiza el corte de los *raster* para el área de interés, como es la zona urbana de los municipios de El Cerrito y Palmira, para luego hacer la categorización de los valores del NDVI y el análisis de la LST y evidenciar su la espacialización de los *cluster* de temperatura que son los valores de intensidad de las ICU.

[7] Informe 8 y 9 del convenio Interadministrativo 141 del 2020 entre la CVC y la UNIVALLE a través del CITCE para la formulación de ocho programas de mejoramiento de los elementos naturales del espacio público (ENEP) y arbolado urbano en ocho cabeceras municipales del Valle del Cauca.

Tabla 2. Rangos de interpretación para el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

NDVI	COBERTURA DE LA TIERRA	INTERPRETACIÓN
< a 0,1	Clases no vegetales	Cuerpos de agua, nubes, construcciones.
0,1 a 0,15	Suelo descubierto	Tierras degradadas, asentamientos, vías, suelo sin cobertura vegetal.
0,15 a 0,25	Vegetación muy abierta	Tierras cultivadas, herbazales, arbustos, pastizales, terreno arado.
0,25 a 0,40	Vegetación dispersa	Vegetación leñosa, plantación arbustiva, bosque seco.
0,40 a 0,60	Vegetación cerrada	Plantas densas en crecimiento, bosque húmedo.
>0,6	Vegetación muy densa	Cobertura con altas densidades de hojas verdes.

Fuente: CVC-UNIVALLE, Adaptado de Herrera, N. V. (2017).

5.2 TEMPERATURA DE SUPERFICIE – LST

La temperatura superficial se refiere a la temperatura radiante de la superficie terrestre, para lo cual, todo objeto o cobertura de la superficie emite radiación electromagnética en función de la temperatura. Para el cálculo de la LST se debe de seguir unos pasos que incluyen técnicas de procesamiento de imágenes que se mencionan a continuación:

- Conversión Niveles Digitales a Radiancias

Este cálculo es importante en el proceso del cálculo de la LST, porque convierte los valores digitales brutos en valores de radiancia que son útiles para la interpretación de las imágenes. Las bandas obtenidas del sensor *TIRS* se encuentran en formato de niveles digitales enteros (ND) con una resolución radiométrica de 14 bits. Estos datos se convierten en valores de reflectancia en el techo de la atmósfera (*TOA,* por sus siglas en ingles) de las bandas 1 a la 9 y radiación térmica de las bandas 10 y 11 (Ariza 2013). con factores de escala previstas en el metadato del producto.

$$TOA = AL + ML * B10 \quad Ec.2$$

Donde:

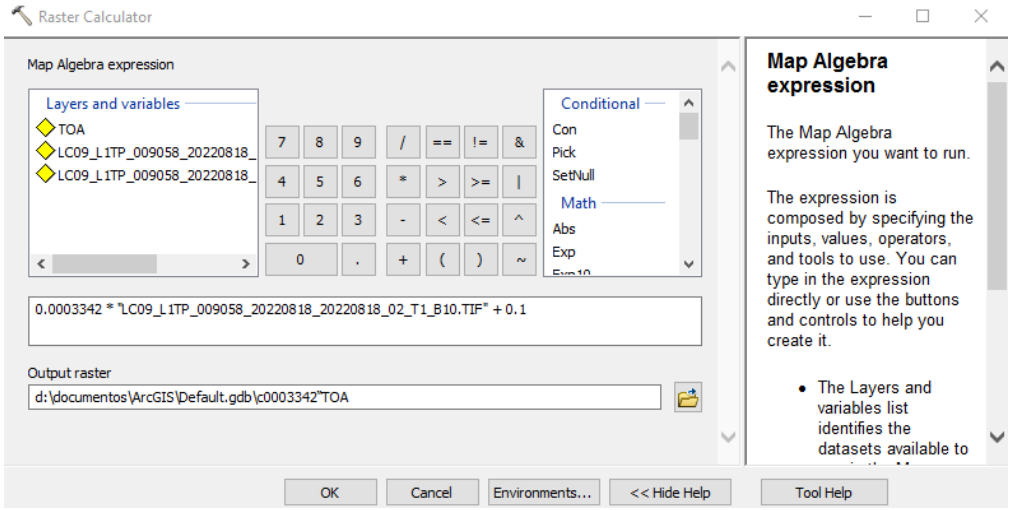
TOA: Radiancia espectral recibida por el sensor (Watts /m2 * srad * µm).
ML y AL: Coeficientes de calibración para la banda 10 (radiance_mult_band_x, radiance_add_band_x) obtenidos de los metadatos de la imagen.
B10: Producto estándar cuantificado y calibrado por valores de píxel (ND).

Figura 11. Valores de los Coeficientes de Calibración de la Banda 10

```
  QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_10 = 1
  QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_11 = 65535
  QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_11 = 1
END_GROUP = LEVEL1_MIN_MAX_PIXEL_VALUE
GROUP = LEVEL1_RADIOMETRIC_RESCALING
  RADIANCE_MULT_BAND_1 = 1.2239E-02
  RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.2570E-02
  RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.1550E-02
  RADIANCE_MULT_BAND_4 = 9.7898E-03
  RADIANCE_MULT_BAND_5 = 6.0062E-03
  RADIANCE_MULT_BAND_6 = 1.5004E-03
  RADIANCE_MULT_BAND_7 = 5.0664E-04
  RADIANCE_MULT_BAND_8 = 1.1082E-02
  RADIANCE_MULT_BAND_9 = 2.4916E-03
  RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.8000E-04
  RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.4900E-04
  RADIANCE_ADD_BAND_1 = -61.19376
  RADIANCE_ADD_BAND_2 = -62.85083
  RADIANCE_ADD_BAND_3 = -57.75164
  RADIANCE_ADD_BAND_4 = -48.94906
  RADIANCE_ADD_BAND_5 = -30.03097
  RADIANCE_ADD_BAND_6 = -7.50224
  RADIANCE_ADD_BAND_7 = -2.53319
  RADIANCE_ADD_BAND_8 = -55.40870
  RADIANCE_ADD_BAND_9 = -12.45799
  RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000
  RADIANCE_ADD_BAND_11 = 0.10000
  REFLECTANCE_MULT_BAND_1 = 2.0000E-05
  REFLECTANCE_MULT_BAND_2 = 2.0000E-05
  REFLECTANCE_MULT_BAND_3 = 2.0000E-05
  REFLECTANCE_MULT_BAND_4 = 2.0000E-05
```

Los valores de los coeficientes de calibración como es el factor de reescalamiento multiplicativo y aditivo de la banda 10 utilizada, están disponibles en el archivo de texto metadatos (MTL) buscando la línea *RADIANCE_MULT_BAND_x*, donde x es el número de banda y *RADIANCE_ADD_BAND_x*, donde x es el número de banda.

Figura 12. Cálculo de TOA Usando "*Raster Calculator*" de Arcgis 10.8



Se realiza la operación algebraica con los valores de calibración correspondiente a la banda 10 en la herramienta "*Raster Calculator*" del software Arcgis 10.8.

- Determinación de la Temperatura de Brillo

Una vez obtenidos los valores de radianza o reflectancia, se continua con el cálculo de la temperatura de brillo o TB, la cual es la parte donde se calcula la intensidad del calor que emite un objeto, es decir, la cantidad de calor que emite la superficie. Se calcula mediante la ecuación de Planck (Riaño et al., 2000), la cual, se transforman las bandas del infrarrojo térmico del sensor a valores de temperatura de brillo:

$$TB = \frac{\mathrm{k2}}{\ln\left(\frac{k1}{TOA}+1\right)} \quad Ec.3$$

Donde:

TB: Temperatura de brillo aparente (Kelvin).
TOA: Radiancia espectral recibida por el sensor (Watts /m2 * srad * µm).
K1: Es la constante de conversión K1 específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato (k1_constant_band_x, donde x es el número de la banda).
K2: Es la constante de conversión K2 específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato (k2_constant_band_x, donde x es el número de la banda).

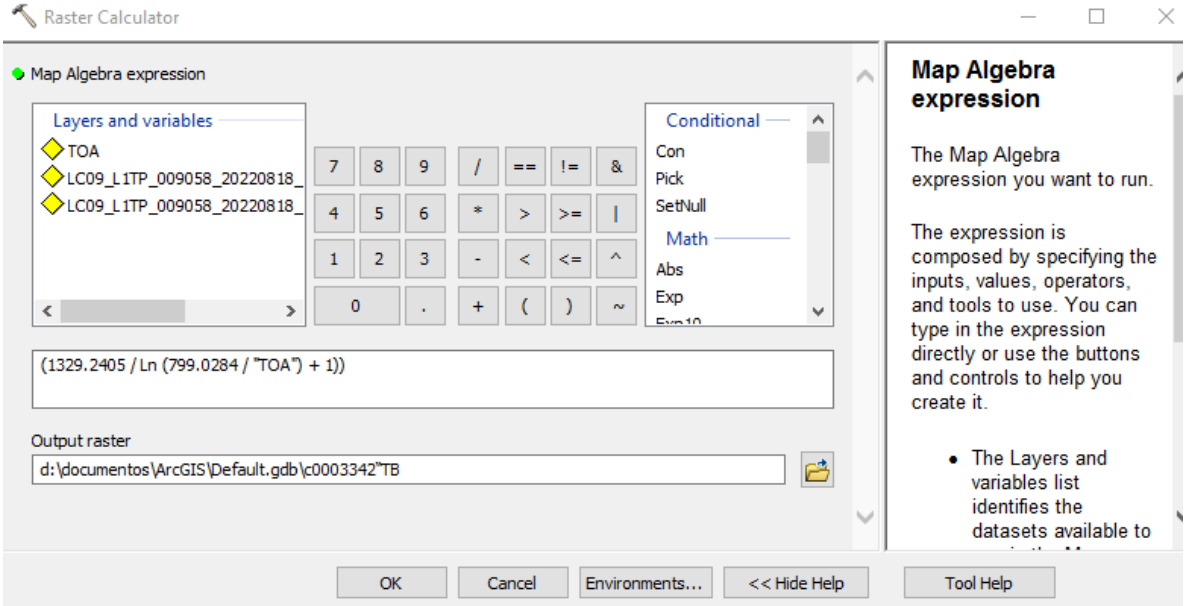
Utilizamos la TOA como variable calculada para la banda 10 y se utilizan Las constantes de conversión (figura 12) para la misma banda (K1 y K2) que se encuentran en el archivo de texto (MTL).

Figura 13. Valores de las Constantes de Conversión para la Banda 10 de la Landsat 9

```
    REFLECTANCE_ADD_BAND_1 = -0.100000
    REFLECTANCE_ADD_BAND_2 = -0.100000
    REFLECTANCE_ADD_BAND_3 = -0.100000
    REFLECTANCE_ADD_BAND_4 = -0.100000
    REFLECTANCE_ADD_BAND_5 = -0.100000
    REFLECTANCE_ADD_BAND_6 = -0.100000
    REFLECTANCE_ADD_BAND_7 = -0.100000
    REFLECTANCE_ADD_BAND_8 = -0.100000
    REFLECTANCE_ADD_BAND_9 = -0.100000
  END_GROUP = LEVEL1_RADIOMETRIC_RESCALING
  GROUP = LEVEL1_THERMAL_CONSTANTS
    K1_CONSTANT_BAND_10 = 799.0284
    K2_CONSTANT_BAND_10 = 1329.2405
    K1_CONSTANT_BAND_11 = 475.6581
    K2_CONSTANT_BAND_11 = 1198.3494
  END_GROUP = LEVEL1_THERMAL_CONSTANTS
  GROUP = LEVEL1_PROJECTION_PARAMETERS
    MAP_PROJECTION = "UTM"
    DATUM = "WGS84"
    ELLIPSOID = "WGS84"
    UTM_ZONE = 18
    GRID_CELL_SIZE_PANCHROMATIC = 15.00
    GRID_CELL_SIZE_REFLECTIVE = 30.00
    GRID_CELL_SIZE_THERMAL = 30.00
    ORIENTATION = "NORTH_UP"
    RESAMPLING_OPTION = "CUBIC_CONVOLUTION"
  END_GROUP = LEVEL1_PROJECTION_PARAMETERS
END_GROUP = LANDSAT_METADATA_FILE
END
```

Se realiza el cálculo con la herramienta "*Raster Calculator*" del software Arcgis 10.8.

Figura 14. Cálculo de TB Usando "*Raster Calculator*" de Arcgis 10.8



El raster resultante es un archivo con nombre TB, con valores de temperatura de brillo en grados Kelvin (°K), por lo que todavía no se hace la conversión a grados Celsius (°C), en el cálculo de la LST se hace esta conversión directamente.

- Determinación de la Temperatura Superficial Terrestre (LST)

Aunque teniendo los valores de la TOA y la TB, todavía no se podría calcular la LST. Se debe de calcular primero el índice de vegetación NDVI para poder obtener los valores de la proporción de le vegetación (Pv) y que es utilizado para el cálculo de la emisividad espectral (ε), que hace referencia a los diferentes rangos de emisividad térmica de los objetos o materiales. Para este caso se realizaron derivando los valores de emisividad correspondientes de los valores de NDVI para cada píxel. Las temperaturas de la superficie terrestre con corrección de emisividad (LST) se han calculado siguiendo a Artis y Carnahan (1982).

$$LST = \frac{TB}{1 + \left(\lambda * \frac{TB}{\rho}\right) ln(\varepsilon)} - 273.15 \quad Ec.4$$

Donde:

LST: Temperatura de superficie (Celsius)

TB: Temperatura de brillo aparente (Kelvin)
λ: Longitud de onda de la radiancia emitida en cada banda.
ρ: h · c/σ = 14380 mK.
σ: Constante de Boltzmann (1,38*10-23 J/K).
h: Constante de Planck (6,626*10-34 Js).
c: Velocidad de la luz (2,998*108 m/s).
ε: Emisividad = 0,004· Pv + 0,986

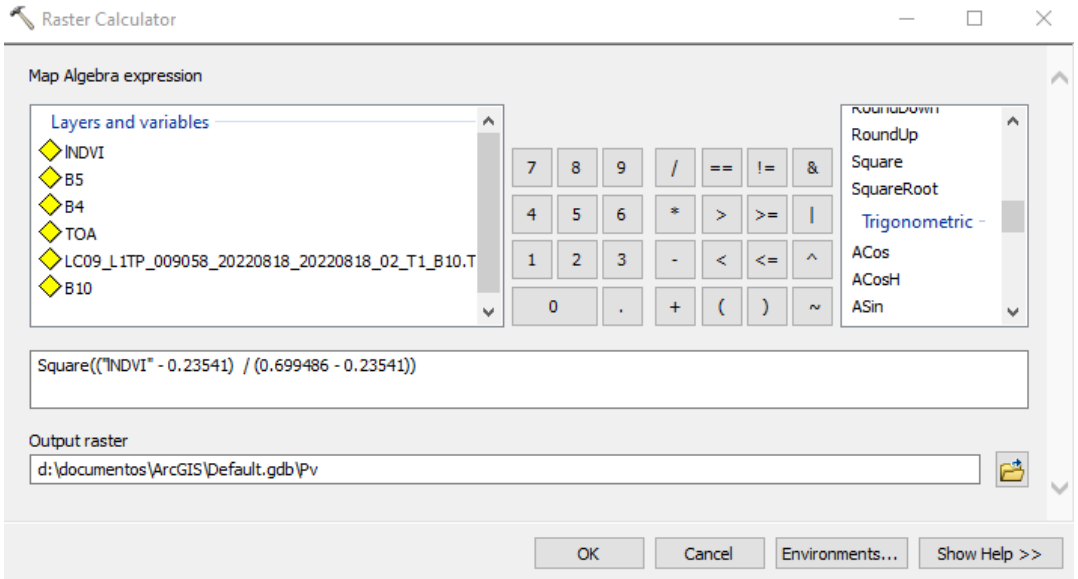
Se van a tomar los valores del NDVI calculados previamente para poder hallar los valores de Pv y ε en el posterior cálculo de la LST.

La proporción de la vegetación (Pv), es un índice que se utiliza para calcular la reflectancia de la luz visible y de la luz infrarrojo cercano en la vegetación y utiliza los valores mínimos y máximos del NDVI, la cual se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Pv = \left[\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN}}\right]^2 \quad Ec.5$$

Para el cálculo de la Pv se utilizó el NDVI previamente calculado y anteriormente mostrado en este trabajo, con los valores máximos y mínimos, utilizando la herramienta "*Raster Calculator*" del software Arcgis 10.8.

Figura 15. Cálculo de Pv Usando "*Raster Calculator*" de Arcgis 10.8

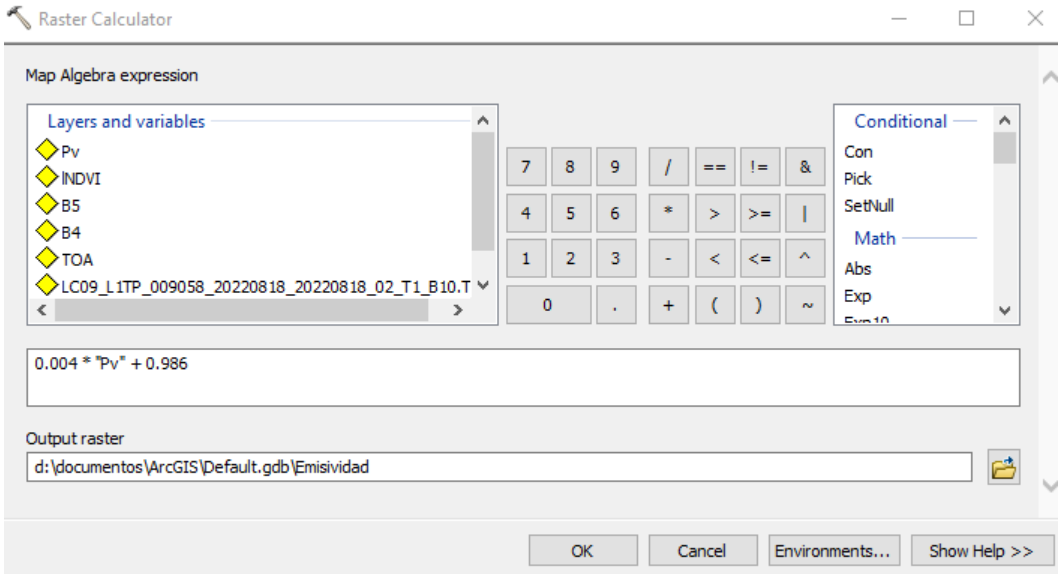


La Emisividad espectral (ε), es un término que se asocia a la proporción de la radiación térmica emitida por los objetos en la superficie hacia el espacio, en esta oportunidad, se relacionan los valores del Pv y su reflectancia discriminada por las coberturas. La Emisividad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = 0.004 * \mathrm{Pv} + 0.986. \; Ec.6$$

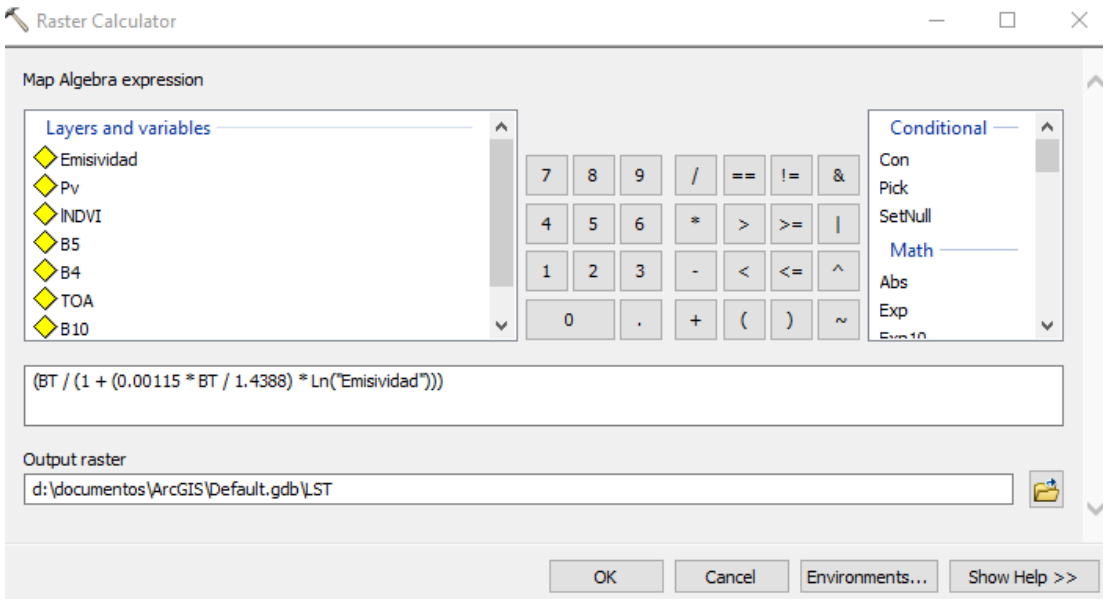
Donde, 0.986 es un valor de corrección de la ecuación y se utilizó la herramienta "*Raster Calculator*" del software Arcgis 10.8, como se evidencia en la siguiente figura.

Figura 16. Cálculo de Emisividad Usando "*Raster Calculator*" de Arcgis 10.8



Teniendo los valores completos de todas las variables, se hace el cálculo de la LST en grados Celcius, mediante la ecuación 3 utilizando la herramienta "*Raster Calculator*" del software Arcgis 10.8 de la siguiente manera:

Figura 17. Cálculo de Emisividad Usando "*Raster Calculator*" de Arcgis 10.8



5.3 Vectorización de las Capas

Para el tratamiento de los datos generados y poder hacer procesos y cálculos como proporciones y poder cruzarlos con otra información como son los barrios y comunas, se hace necesario convertir a formato vectorial la información utilizando la herramienta "*Raster to Polygon*", que convierte los archivos raster a polígono, para así, agrupar los valores y realizar los análisis

Figura 18. Corte de Capas *Raster* al Área de Interés del Estudio

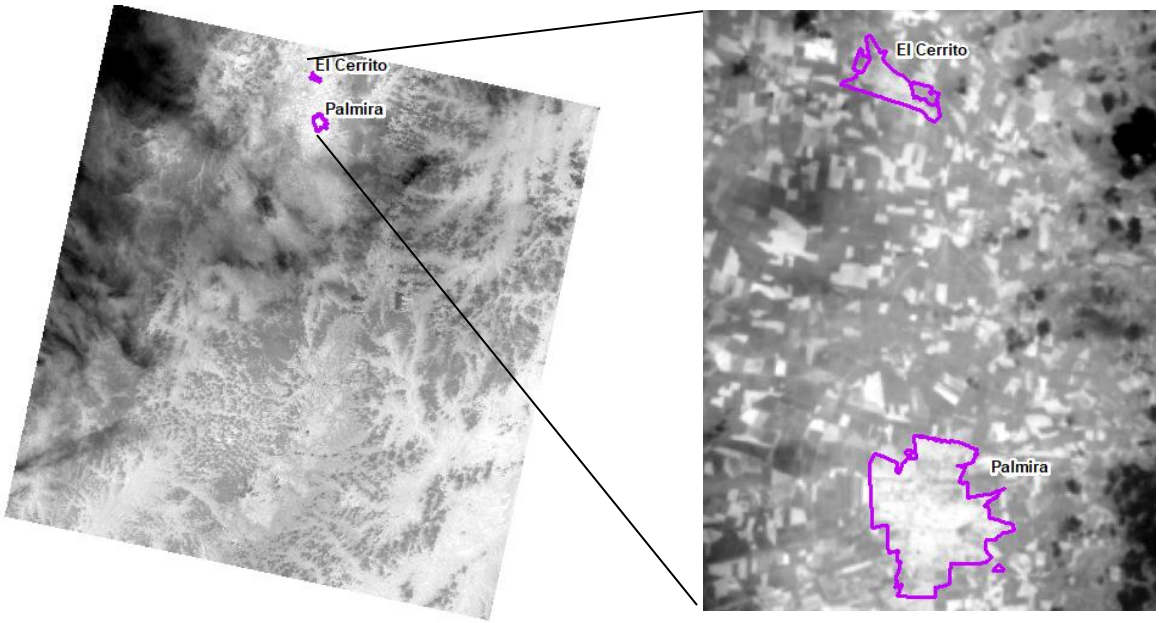
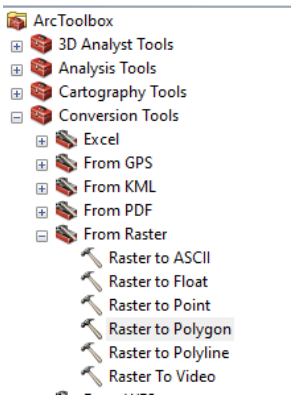


Figura 19. Vectorización de Archivos *Raster* con la Herramienta "*Raster to Polygon"* de Arcgis 10.8



5.4 IDENTIFICACIÓN DE LA ISLAS DE CALOR URBANA (ICU)

Como ya se ha mencionado anteriormente, los procesos acelerados de la urbanización llevan a cambios de uso en el suelo, pasando de coberturas verdes a infraestructura urbana, como el asfalto, los edificios y la red vial, alterando el equilibrio entre la radiación del suelo y del aire, reduciendo la evaporación, aumentando la escorrentía superficial y disminuyendo la velocidad de los vientos (Fernández et al,. 2012), causando la pérdida de capacidad de enfriamiento de las ciudades en épocas de calor.

A causa de los desbalances de energía entre la atmosfera y la superficie, se ha podido relacionar directamente proporcional con un aumento en la temperatura superficial con el aumento de las superficies duras que absorben más energía solar, lo cual contribuyen a la conformación de ICU. Para determinar y clasificar el aumento de la temperatura superficial, se tomó la adaptación que realizó CVC-UNIVALLE basados en la metodología de Fernández (1996) donde la intensidad se calcula con la diferencia entre la temperatura media y la temperatura de la superficie. De acuerdo con las diferencias y/o variaciones de temperatura, la intensidad de las ICU se reclasificó en las siguientes categorías:

Tabla 3. Categorías de clasificación de la intensidad de (ICU).

CLASIFICACIÓN DE TEMPERATURA (°C)	Δ TEMPERATURA (°C)
Débil	Hasta 1
Moderadamente débil	1 a 2
Moderada	2 a 3
Moderada mente fuerte	3 a 4
Fuerte	4 a 5
Muy fuerte	>5

Fuente: Tomado del CVC-UNIVALLE[8] adaptado de Fernández (1996).

Aunque en el libro sobre climatología aplicada de Fernández (1996), sugiere trabajar con una clasificación de la temperatura con cinco categorías, es pertinente hacer la diferencia entre categorías intermedias para conocer las transiciones entre una y otra, espacialmente se podrían identificar esos límites que deben de tener un tratamiento hacia el mejoramiento del confort climático.

Las clasificaciones de la temperatura se realizaron en aquellos lugares donde los valores de la temperatura máxima están por encima de 1°C de la temperatura superficial promedio, es decir, que la ICU se clasifica de acuerdo a su variación por encima del promedio de la temperatura superficial. Los datos y análisis de los resultados, se hicieron para cada municipio.

6. RESULTADOS

Para observar la relación de las ICU con la temperatura superficial (LST) y el índice de vegetación normalizado (NDVI) en los dos municipios, se exhiben los resultados inicialmente por cada unidad de análisis (área urbana municipal) y posteriormente se correlacionan para así cumplir con los objetivos planteados de la investigación.

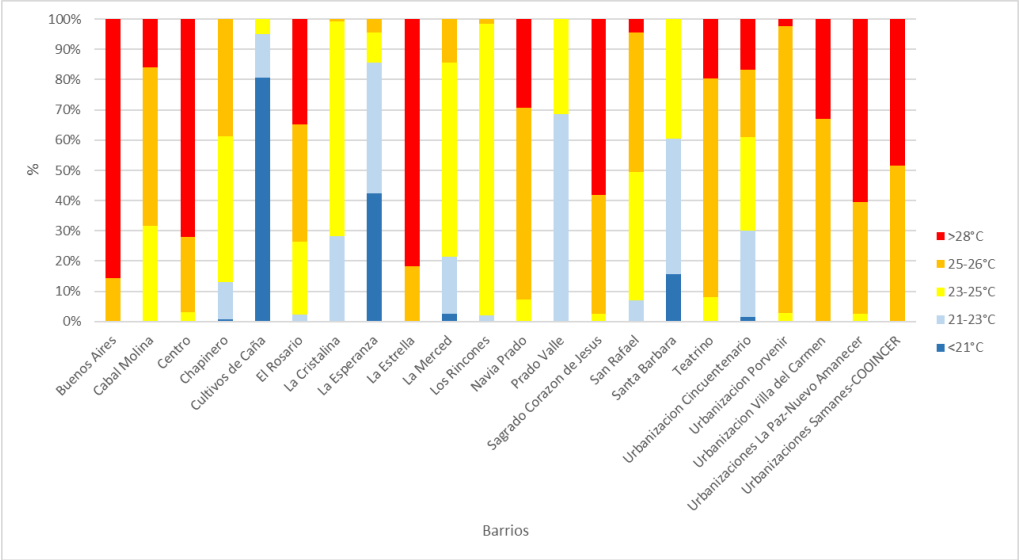
[8] Informe 8 y 9 del convenio Interadministrativo 141 del 2020 entre la CVC y la UNIVALLE a través del CITCE para la formulación de ocho programas de mejoramiento de los elementos naturales del espacio público (ENEP) y arbolado urbano en ocho cabeceras municipales del Valle del Cauca.

6.1. **EL CERRITO**

6.1.1 LST

En el municipio de El Cerrito y su área urbana, el comportamiento de la LST varía entre los valores 19,3°C y 28,4°C, este último se localiza sobre los límites del barrio Cabal Molina y el barrio El Centro (figura 20).

Figura 20. Barrios de El Cerrito y su distribución valores de temperatura superficial

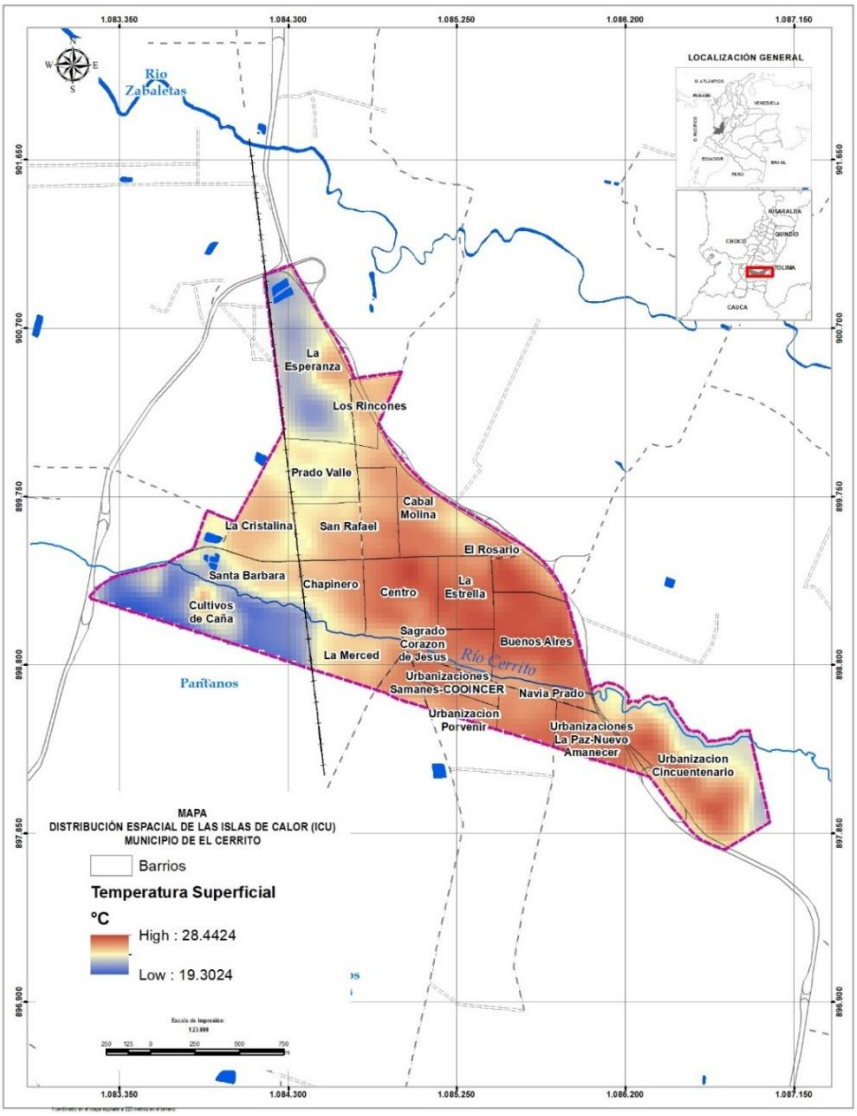


Fuente: Elaboración propia

Otros barrios con tendencia hacia las altas temperaturas son el barrio El Rosario, Buenos Aires y el barrio La Estrella, los cuales tienen temperaturas que están en el rango entre 27,94°C y 28,44°C.

Como se dijo anteriormente y teniendo en cuenta la figura 21, los valores de LST más altos se distribuyen sobre el sector del centro de la Ciudad, como lo son los barrios Buenos Aires, Centro, La Estrella y Sagrado Corazón de Jesús, temperaturas que están por encima de los 28°C. Por otro lado, se encuentran los valores mínimos de temperatura superficial según el censor TIRS del Landsat 9 para los niveles digitales localizados en los barrios La Esperanza, Santa Barbara, La Merced y la Urbanización Cincuentenario.

Figura 21. Mapa de distribución del LST en el municipio de El Cerrito.

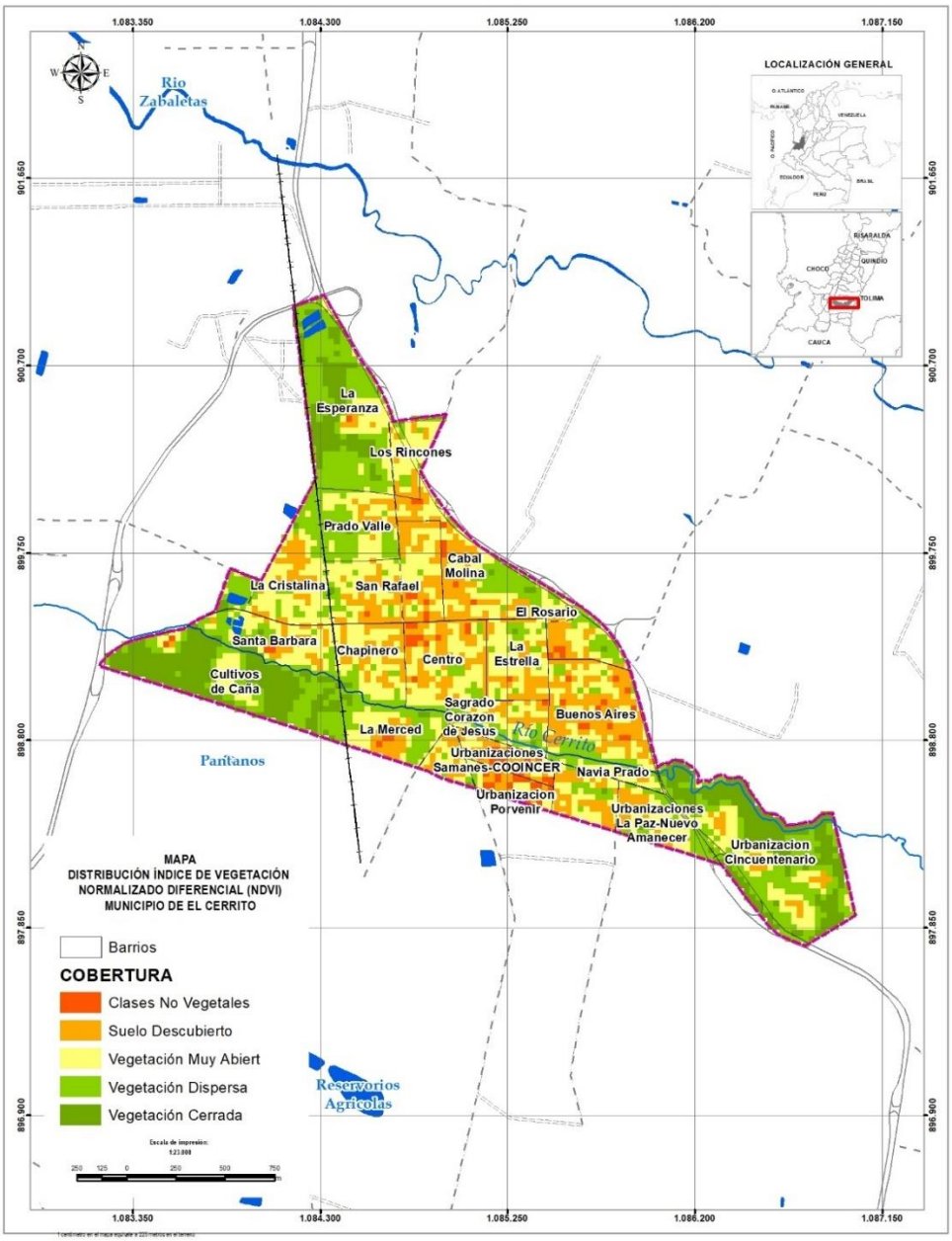


Fuente: Elaboración propia.

6.1.2 NDVI

Según la figura 22, el 25,02% de los valores del NDVI corresponde a las coberturas desprovistas de vegetación y se localizan en su gran mayoría en los barrios Buenos Aires, La Estrella y El Centro, por lo que su tendencia es al aumento de sensación térmica de altas temperaturas.

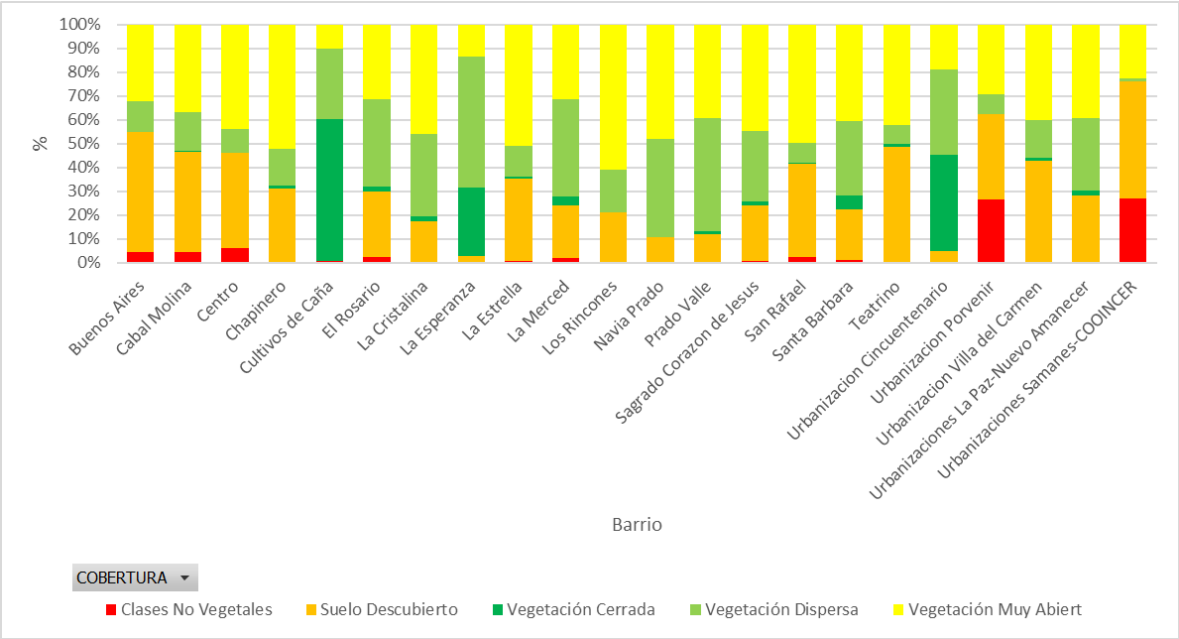
Figura 22. Mapa de distribución del NDVI en el municipio de El Cerrito.



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la figura 23, el 74,98% del índice indica que el área analizada corresponde a coberturas verdes, localizándose en su gran mayoría en el Urbanización Cincuentenario, el cual, está rodeado de vegetación cerrada y tiene la influencia del Parque Recreacional y un área con vocación de área forestal de protección del río Cerrito.

Figura 23. Barrios de El Cerrito y su distribución de NDVI



Fuente: Elaboración propia

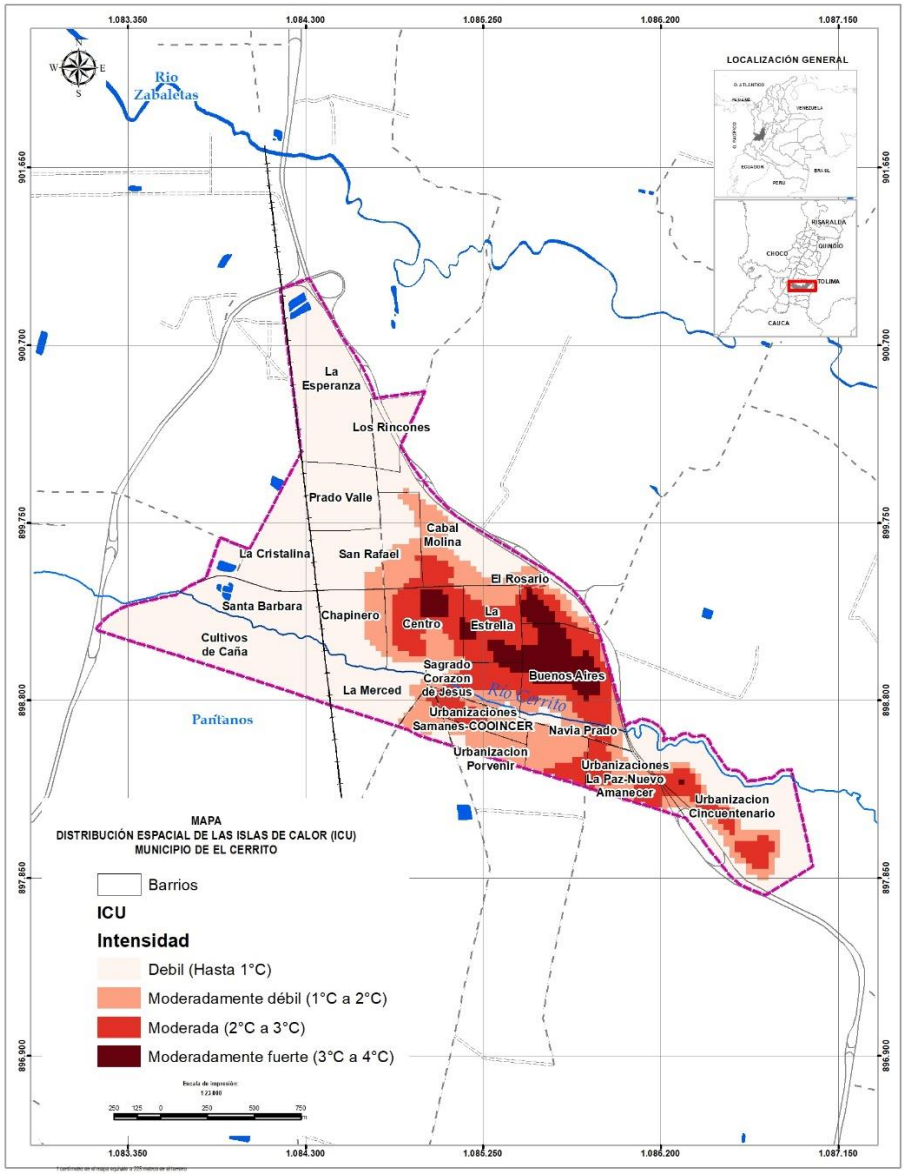
Por otra parte, la Urbanización Cooincer y Los Samanes, también se pueden considerar con alta presencie de coberturas no vegetales y/o suelo descubierto y con déficit de zonas verdes. Igualmente, la Urbanización Porvenir y todo el sector de El centro, tienen mayor presencia de coberturas no verdes.

Hay un sector que se encuentra al interior del perímetro urbano que está conformado por cultivos de caña, donde hay valores de NDVI que corresponden a coberturas vegetales de pastos y cultivos.

6.1.3 ICU

En cuanto a las ICU identificadas en El Cerrito, se observa que el 5% del área urbana se encuentra bajo la intensidad de moderadamente fuerte con aumentos de temperaturas de 3 °C a 4 °C por encima del promedio. Esa intensidad se localiza en los barrios Buenos Aires, La Estrella, El Centro y El Rosario (figura 24).

Figura 24. Mapa de distribución de las Islas de Calor Urbanos (ICU) en el municipio de El Cerrito.

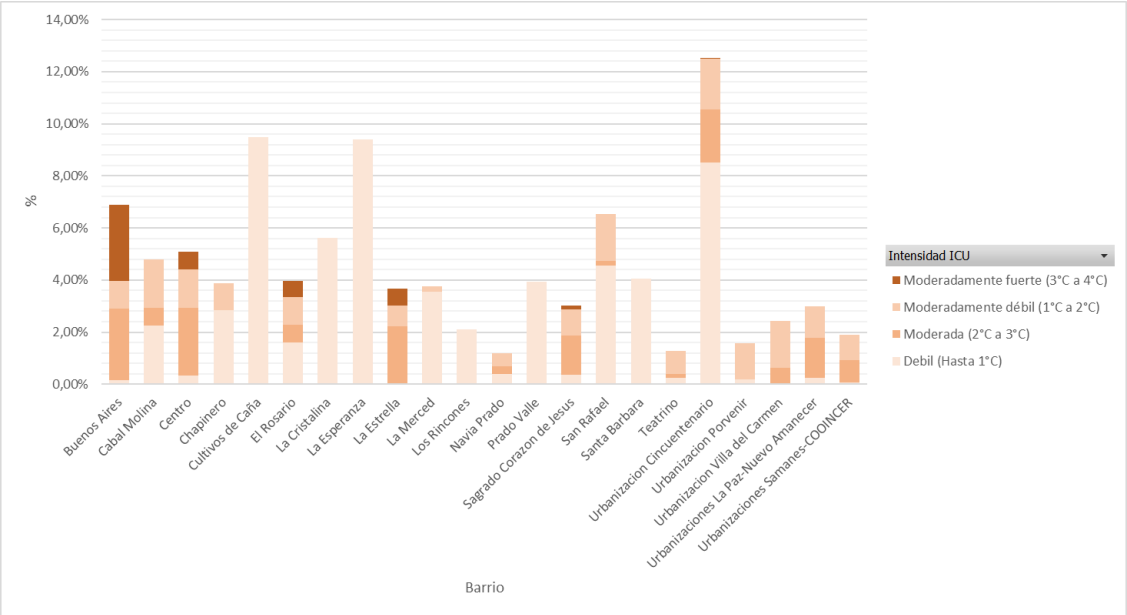


Fuente: Elaboración propia.

Hay una distribución de los valores de temperatura y de NDVI que se correlacionan al interior del Centro Urbano, es el área más desarrollada y donde hay mayor ausencia de coberturas verdes.

A excepción del sector de cultivos de caña de azúcar, los barrios de La Cristalina, La Esperanza y La Urbanización Cincuentenario son las áreas donde se distribuyen los valores de Islas de Calor débil (figura25).

Figura 25. Barrios de El Cerrito y la identificación de las ICU



Fuente: Elaboración propia

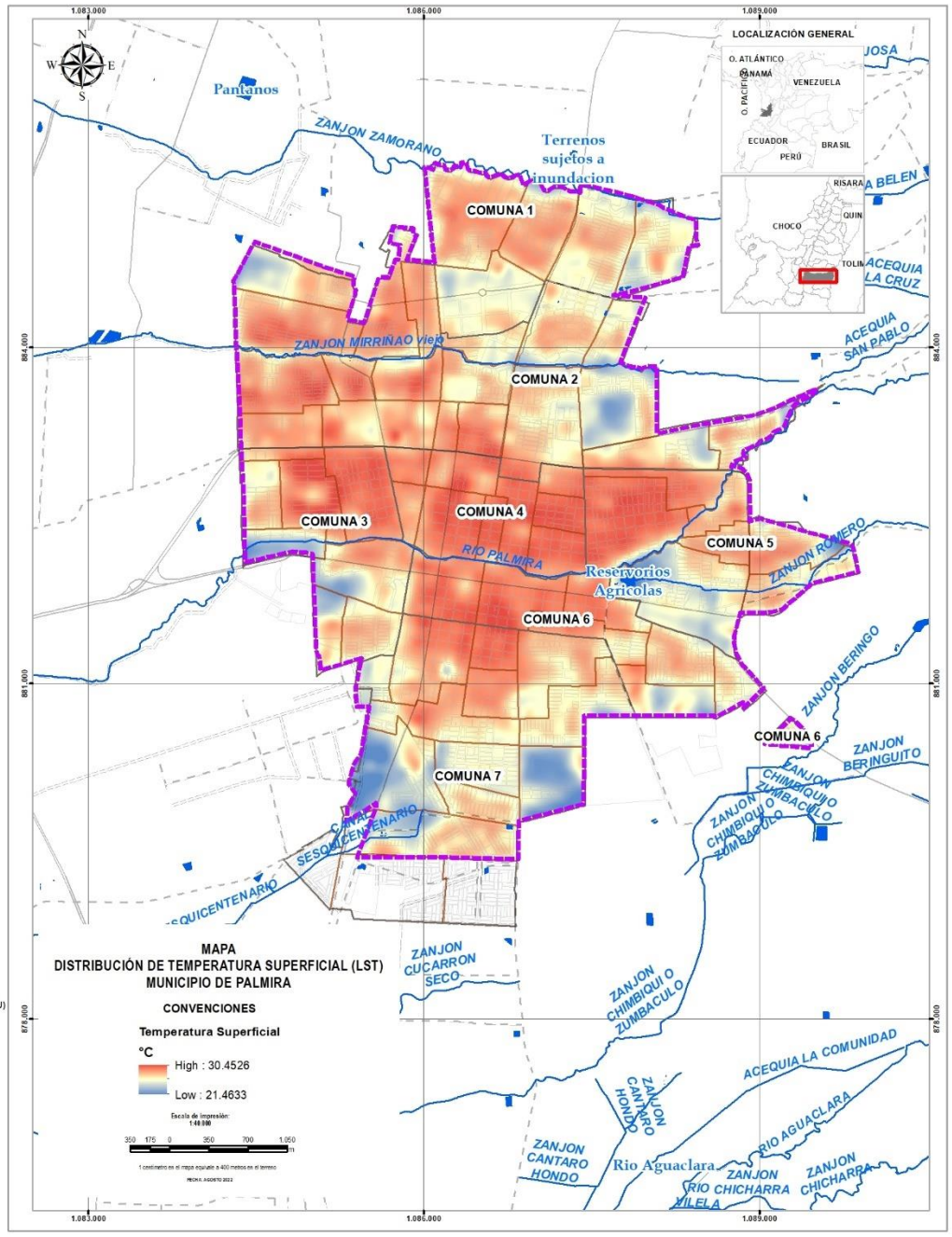
6.2 PALMIRA

6.2.1 LST

La información de LST para el municipio de Palmira tiene unos valores máximos y mínimos que van desde 21,46 °C hasta 30,40 °C y con un promedio de temperatura de 27,28 °C (figura 26).

El análisis se hará a escala de comunas, las cuales en el perímetro urbano de Palmira hay conformadas siete (7) comunas, para lo cual, la temperatura máxima tiene presencia en la comuna 3 en los alrededores del barrio El Prado, localizado en cercanías al río Palmira, sin embargo, según los valores del NDVI, hay presencia de coberturas mayormente que van desde las clases no vegetales hasta el suelo descubierto con un 5,60% de las coberturas del Barrio.

Figura 26. Mapa de distribución del LST en el municipio de Palmira.

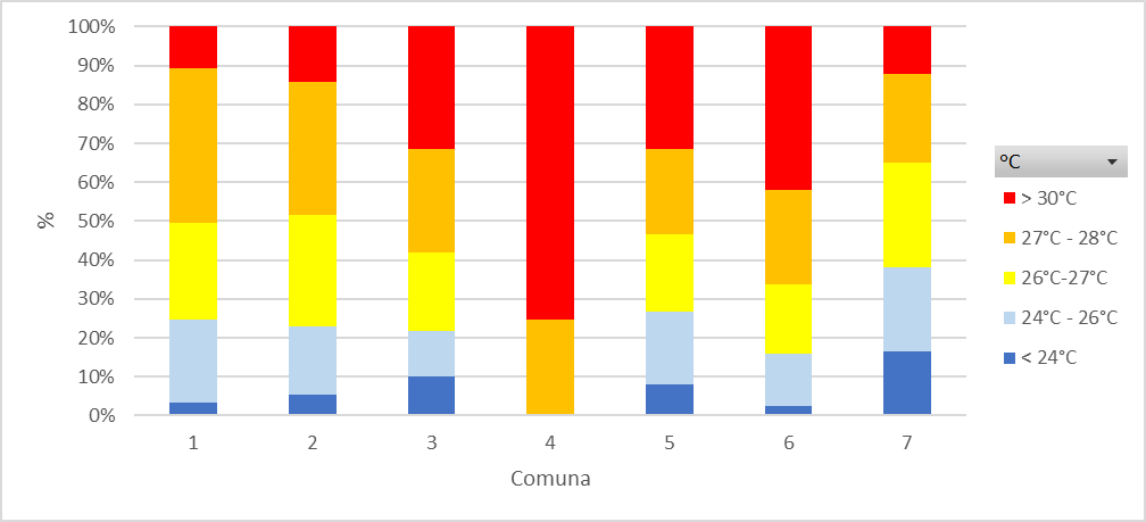


Fuente: Elaboración propia.

Tomando la figura 27 y al hacer el análisis a partir del promedio de las temperaturas al interior del perímetro urbano, los resultados indican que la comuna 6 y la comuna 4 poseen los mayores valores con un 27,82 °C y 28,94 °C respectivamente. Por otro lado, y siguiendo el análisis con los valores promedio, el

barrio con la temperatura promedio más alta es el barrio Bizerta con 29,5 °C y pertenece a la comuna 4.

Figura 27. Comunas de Palmira y su distribución de Temperatura Superficial



Fuente: Elaboración propia

Hay presencia de valores de temperaturas >30°C en todas las comunas de Palmira, su distribución es mayor en la comuna 4 como se dijo anteriormente, sin embargo, en las comunas 6, 5 y 3 igualmente hay presencia de las más altas temperaturas (figura 27).

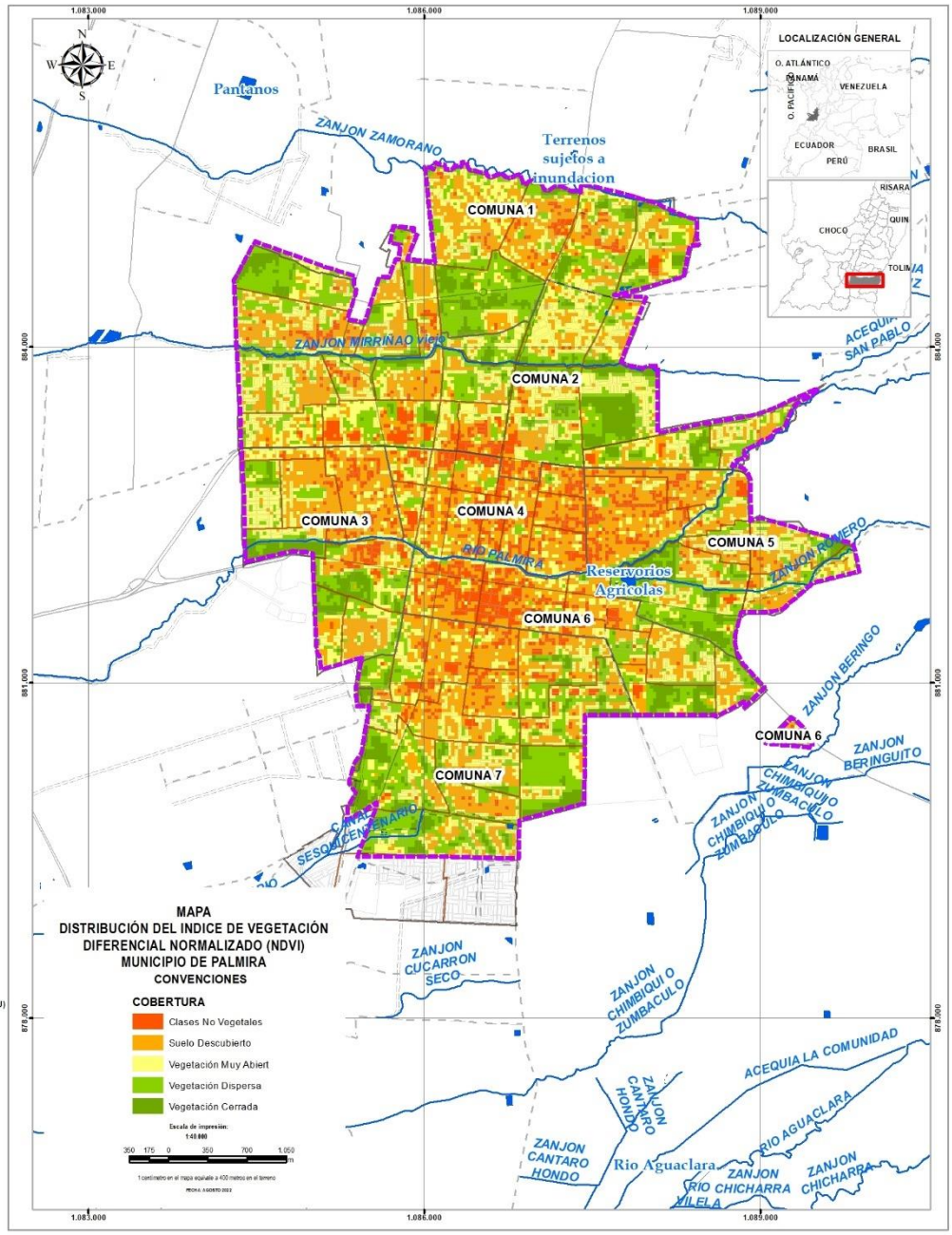
Por otro lado, la comuna 7 tiene valores inferiores a < 24°C y menor presencia de los valores más altos de temperatura, es la comuna con mayor confort térmico.

6.2.2 NDVI

En cuanto a los valores del NDVI, se puede decir que el 41,23% de las coberturas son de tipo no verde, donde la comuna 2 y la comuna 7 presentan las mayores áreas de coberturas sin vegetación con un 6,40% y un 7,29% respectivamente.

Las dos comunas antes mencionadas, sin embargo, tienen en su área total mayor proporción de coberturas verdes con un 15,49% para la comuna 2 y un 12,47% para la comuna 7, con mayor predominio de la clase de cobertura vegetación muy abierta, siendo los barrios, Poblados de Comfaunión y Luís Carlos Galán, los que más aportan de área (figura 28).

Figura 28. Mapa de distribución del NDVI en el municipio de Palmira.

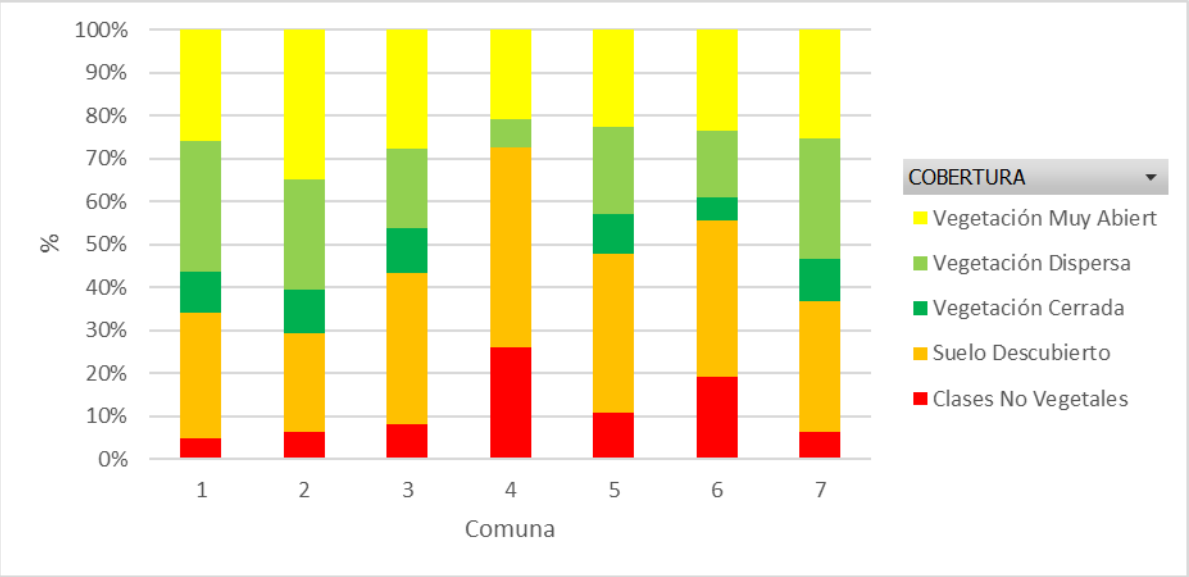


Fuente: Elaboración propia

Según la figura 29, el 58,77% del total de coberturas del Municipio son las vegetales, donde las comunas con menores porcentaje coberturas verdes son la comuna 4 la comuna 6, donde predominan las coberturas sin vegetación con un 5,61% y 5,31% de su área total respectivamente, siendo los barrios Colombia de

la comuna 4 y Central de la comuna 6, los que mayor aportan a las coberturas en cada comuna correspondiente.

Figura 29. Comunas de Palmira y los valores de NDVI



Fuente: Elaboración propia

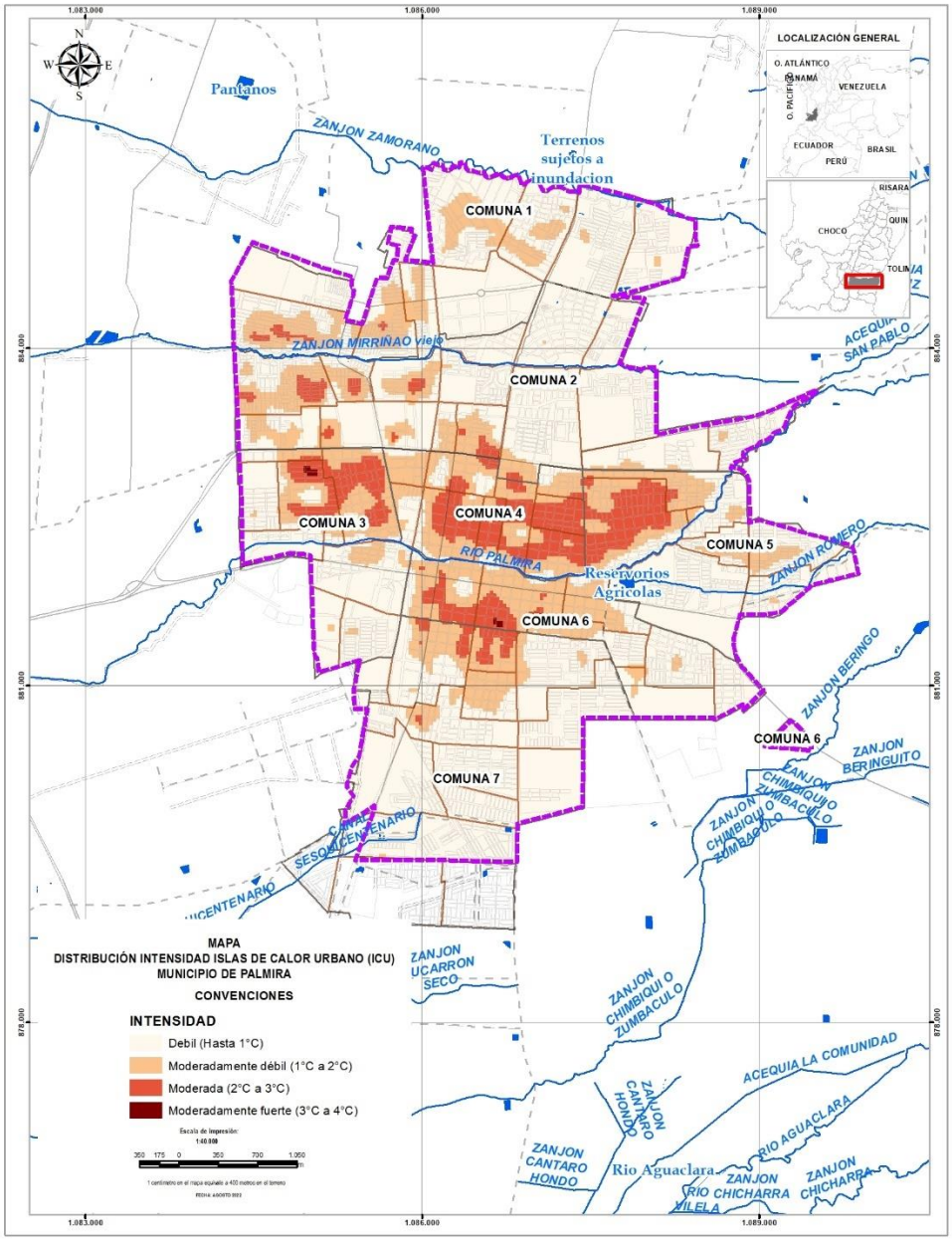
La comuna 2 es la que mayor área con vegetación posee con un 15,49% de su área total, seguidas por la comuna 7 y a comuna 1 con un 12,47% y 12,38%, respectivamente.

6.2.3 ICU

La identificación de las ICU en el municipio de Palmira tiene una intensidad que van desde las débiles hasta las moderadamente fuertes, siendo el 8,55% del Municipio identificado con una intensidad de moderada a moderadamente fuerte, la comuna 2 y comuna 7 se encuentran con los mayores niveles de esta intensidad con un 17,36% y 16,68% respectivamente. Las intensidades con niveles moderados se presentan en sus mayores niveles en la comuna 4 con un 2,86% entre todas las comunas.

En general, la identificación de islas de calor en el perímetro urbano de Palmira se clasifica en moderadamente fuerte en un 0,07% del área total del suelo urbano y se encuentran presente en las comunas 3 y 6 según la figura 30.

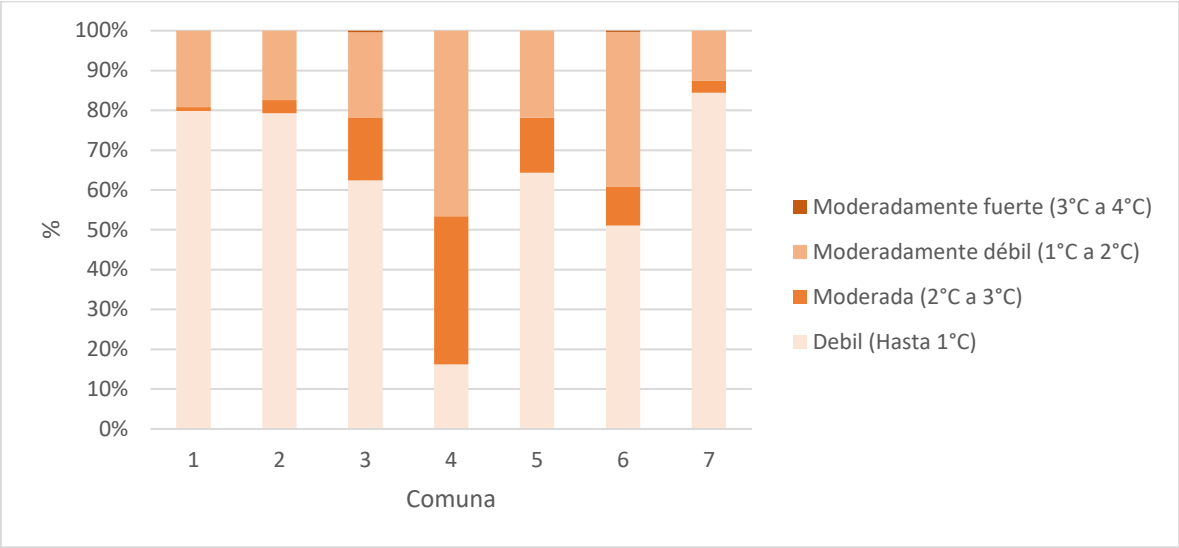
Figura 30. Mapa de distribución de las Islas de Calor Urbana (ICU) en el municipio de Palmira.



Fuente: Elaboración propia.

Como un modelo de comportamiento espacial, la ICU se distribuye en el sector del centro de la Ciudad, sobre el eje del río Palmira que comprende las comunas 3, 4, 5 y 6 (figura 31).

Figura 31. Comunas de Palmira y las ICU

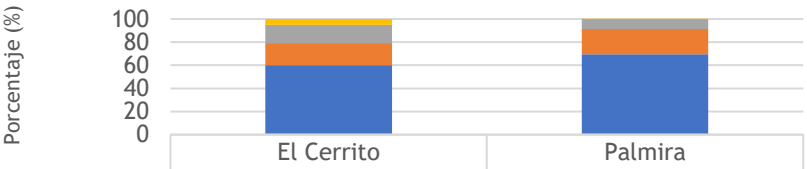


Fuente: Elaboración propia

6.3 ICU EN EL CERRITO Y PALMIRA

A modo general, el comportamiento de las ICU al interior de los 2 municipios es similar, se presenta una dominancia de la condición Débil (<1°C) que oscila alrededor de 60% en cada municipio, seguido de la categoría Moderadamente Débil (1° a 2°C). En contraste, las variaciones se identifican sobre las categorías de Moderado (2° a 3°C) en adelante, donde se intensifica el aumento de temperatura en la superficie en municipios con menos expansión urbana al interior del perímetro urbano y aun se presentan predios con vocación agrícola principalmente hacia las zonas perimetrales (figura 32).

Figura 32. Porcentaje de la Intensidad de las Islas de Calor por Municipio.



	El Cerrito	Palmira
Muy Fuerte	0.0	0.0
Fuerte	0.0	0.0
Moderadamente Fuerte	5.0	0.1
Moderado	15.9	8.5
Moderadamente Débil	18.9	21.8
Débil	60.2	69.6

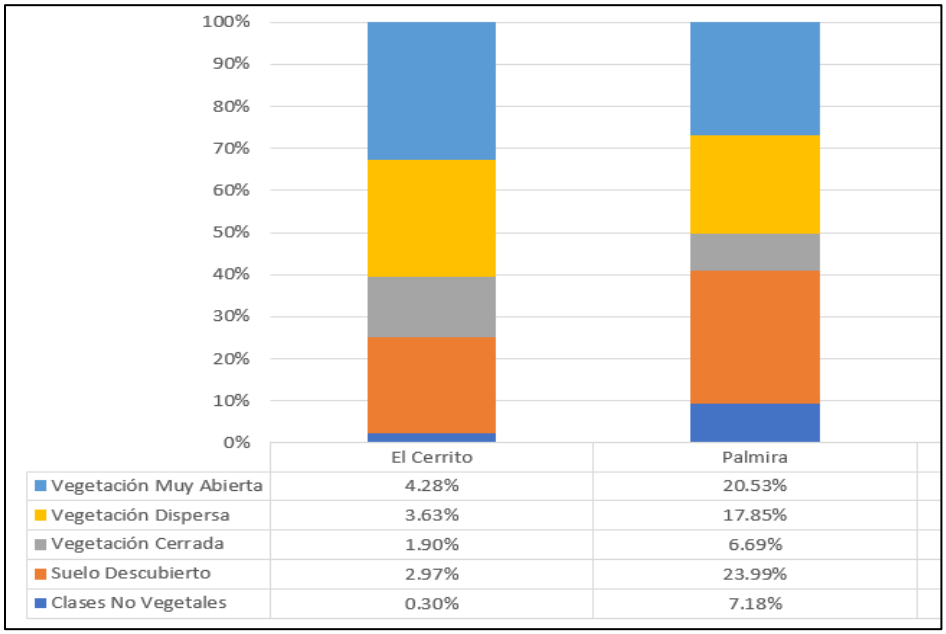
Fuente: Elaboración propia.

Aunque en ninguno de los dos municipios se presenta las categorías más altas de intensidad de ICU (Fuerte; 4 a 5 °C y Muy Fuerte; >5 °C), si se presentan las categorías Moderadamente Fuerte (3° a 4°C) y Moderada (2° a 3°C), siendo este un panorama de alerta temprana que permita tomar a futuro medidas de mitigación en la planificación territorial u ambiental.

El municipio con mejor panorama por presentar la menor área en categorías de ICU Moderadamente Fuerte y mayor áreas en categorías de ICU Débil y Moderadamente Débil, es Palmira con un 69,6% y 21,8%, respectivamente. Mientras que, para el municipio de El Cerrito se presenta el mayor porcentaje de su área en categorías de ICU Moderadamente Fuerte (5,0%), comparado Palmira.

Por otro lado, y según la figura 33, se cuenta al interior de los perímetros urbanos municipales, los valores del NDVI con una tendencia hacia la presencia de las categorías con coberturas verdes, que van desde la vegetación cerrada, vegetación dispersa y vegetación muy abierta, este grupo de coberturas tiene una presencia del 60,85% del total de las áreas urbanas. Adicionalmente, se encuentran las categorías que agrupan las coberturas no verdes, que son el suelo desnudo y las clases no vegetales con un total de 39,15% del total de las áreas urbanas.

Figura 33. Porcentaje de NDVI por Municipio.



	El Cerrito	Palmira
Vegetación Muy Abierta	4.28%	20.53%
Vegetación Dispersa	3.63%	17.85%
Vegetación Cerrada	1.90%	6.69%
Suelo Descubierto	2.97%	23.99%
Clases No Vegetales	0.30%	7.18%

Fuente: Elaboración propia.

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como se ha expuesto anteriormente, el análisis de una isla de calor urbano mediante la aplicación del NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y la LST (Temperatura Superficial de la Tierra) permite investigar la interacción entre la cobertura vegetal y la temperatura superficial en relación con variables urbanas como la densidad poblacional y el uso del suelo. Este estudio no solo busca examinar la correlación existente sino también comprender las dinámicas subyacentes que contribuyen al estrés térmico y ambiental intensificado por la urbanización.

El propósito de esta investigación trasciende la identificación de zonas con variaciones térmicas; aspira a revelar áreas críticas donde la intervención mediante estrategias de mitigación o adaptación puede generar un impacto significativo en la resiliencia urbana frente al cambio climático. A través de este análisis, se destacan las oportunidades para implementar soluciones de infraestructura verde, promoviendo así una planificación urbana que armoniza el desarrollo con la conservación ambiental y la mejora de la calidad de vida urbana. Al visualizar las áreas potenciales para estas intervenciones, el estudio proporciona una base científica para la posterior toma de decisiones estratégicas en el ámbito de la gestión territorial y el diseño urbano sostenible de los municipios en cuestión.

7.1 Análisis de Correlación de Variables

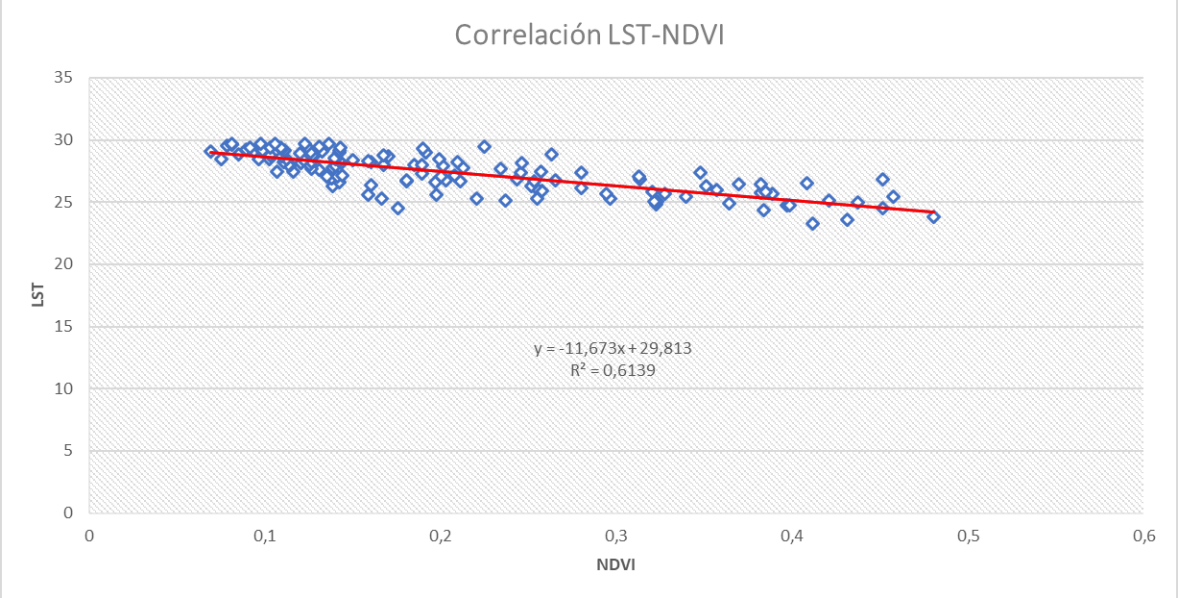
El NDVI, un indicador clave de la cantidad y salud de la vegetación, y la LST, que refleja el balance energético entre la superficie terrestre y la atmósfera, están intrínsecamente vinculados a través de una relación inversa. Esta relación sugiere que, en general, a un mayor valor de NDVI, correspondiente a una densa cobertura vegetal, se asocia una menor LST, debido a la capacidad de la vegetación para enfriar la superficie por medio de la evapotranspiración y el sombreado. Sin embargo, esta correlación no es uniforme y se ve influenciada por diversos factores ambientales y antrópicos, tales como las condiciones climáticas, el tipo específico de vegetación, el uso y manejo del suelo, así como los niveles de estrés hídrico.

El análisis detallado de la correlación entre el NDVI y la LST, ilustrado en la Figura 34, devela cómo estos factores modulan la dinámica de interacción entre la vegetación y la temperatura superficial. Esta comprensión profunda permite no solo detectar cambios ambientales, sino también identificar áreas prioritarias para la implementación de estrategias de conservación o restauración ecológica. La gráfica evidencia una tendencia clara: en condiciones de alta temperatura, predominan valores de NDVI que se acercan a -1, indicativo de escasa o nula

cobertura vegetal, mientras que, en ambientes más frescos, los valores del NDVI tienden hacia 1, reflejando áreas de intensa vegetación.

Esta relación subraya la importancia de integrar medidas de manejo del suelo y estrategias de reforestación o creación de espacios verdes urbanos, como herramientas vitales en la mitigación del efecto isla de calor y en la promoción de un entorno urbano más sostenible y habitable. La evidencia presentada en este análisis fundamenta la necesidad de políticas de planificación territorial que fomenten la conservación y expansión de la cobertura vegetal como un componente crítico en la adaptación y mitigación del cambio climático a nivel local.

Figura 34. Análisis de Correlación entre el NDVI y LST



Fuente: Elaboración propia.

7.2 Análisis de Resultados

Este estudio ha demostrado que, en los municipios analizados, los patrones de formación e intensidad de las Islas de Calor Urbanas (ICU) están estrechamente vinculados con la presencia limitada de vegetación y con rangos de temperatura superficial que varían de moderados a moderadamente fuertes. Se ha identificado una predominancia de la categoría "Débil" en la intensidad de las ICU en ambos municipios, representando el 60,2% en El Cerrito y el 69,6% en Palmira, lo que indica una tendencia general hacia condiciones térmicas urbanas menos severas, pero aún significativas.

La gradualidad en las zonas de transición térmica observada en ambos municipios sugiere un efecto moderado de las estructuras urbanas y la densidad de

edificación en la formación de las ICU. Este fenómeno se ve influenciado por los patrones de densificación urbana, donde, según datos del DANE, una mayoría significativa de la población reside en viviendas unifamiliares (77,5% en Palmira según DANE 2018, y 82,7% en El Cerrito según DANE 2005). Este aspecto de la configuración urbana resalta la relación entre el tipo de ocupación del suelo y la intensidad de las ICU, sugiriendo que las áreas con mayor densidad de casas pueden tener una capacidad moderada para mitigar el efecto de las islas de calor, en comparación con las zonas de alta densidad de edificación multifamiliar o comercial.

Además, estos hallazgos enfatizan la necesidad de incorporar estrategias de verde urbano y gestión de la cobertura vegetal en la planificación territorial, con el objetivo de fortalecer la resiliencia urbana frente a las ICU. La evidencia sugiere que la integración de espacios verdes, tanto en el diseño de nuevas urbanizaciones como en la regeneración de áreas existentes, podría ser clave para atenuar las temperaturas superficiales y promover entornos urbanos más saludables y sostenibles.

Luego, tras el cálculo y análisis de la temperatura superficial (LST) y el índice de vegetación normalizado (NDVI) en los municipios de estudio, se han develado hallazgos significativos que arrojan luz sobre la dinámica de las Islas de Calor Urbanas (ICU) y el estado de la cobertura vegetal en estos entornos urbanos. Los resultados clave se sintetizan de la siguiente manera:

- En ambos municipios, se ha observado un patrón consistente respecto a la intensidad de las ICU, con una predominancia notable de la categoría "Débil" (<1°C de aumento de temperatura), que representa alrededor del 60% y el 69% del área urbana de Palmira y El Cerrito, respectivamente. Esto indica una manifestación generalizada de ICU de menor intensidad, lo que sugiere una influencia moderada de la urbanización en la temperatura superficial en comparación con áreas de mayor densificación urbana.

- Sin embargo, es crucial destacar que, aunque las categorías más extremas de ICU ("Fuerte" y "Muy Fuerte") no se presentan, sí se observan categorías de "Moderadamente Fuerte" (3° a 4°C) y "Moderada" (2° a 3°C), especialmente en El Cerrito, donde la menor presencia de zonas verdes y una mayor densificación contribuyen a elevaciones más significativas en la temperatura superficial. Este patrón resalta la importancia de implementar medidas correctivas para atenuar el fenómeno de las ICU y promover un desarrollo urbano más sostenible y resiliente al cambio climático.

- Por otro lado, el análisis del NDVI revela una inclinación hacia una presencia notable de coberturas verdes en ambos municipios, con aproximadamente el 58,7% y 74,75% del área urbana de Palmira y El

Cerrito, respectivamente, cubierta por vegetación. Aunque este es un indicador positivo, aún persisten áreas significativas con coberturas no vegetales, lo que subraya la necesidad de estrategias enfocadas en la expansión y mantenimiento de la infraestructura verde urbana para mejorar la calidad ambiental y el bienestar de los habitantes urbanos.

En conjunto, estos resultados subrayan la complejidad de las interacciones entre la cobertura vegetal, la urbanización y la formación de Islas de Calor Urbanas, ofreciendo una base sólida para futuras iniciativas de planificación y gestión urbana dirigidas a mitigar los impactos negativos del cambio climático y fomentar la sostenibilidad en los entornos urbanos de Palmira y El Cerrito.

8. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran una correlación negativa significativa entre el NDVI y la LST, revelando que un mayor índice de vegetación se asocia con temperaturas superficiales más bajas, y viceversa. Este patrón subraya el rol esencial de la vegetación como un mecanismo natural de enfriamiento, mediante la reducción de la radiación solar incidente y la promoción de la evapotranspiración. Contrariamente, las áreas con escasa cobertura vegetal exhiben incrementos en la LST, atribuibles a una mayor absorción de energía solar y una reducción en la eficacia de la disipación del calor. Estos descubrimientos están en concordancia con lo reportado por investigaciones previas, resaltando su relevancia para el manejo ambiental y la formulación de estrategias dirigidas a mitigar el fenómeno de las islas de calor urbano.

La densidad poblacional, definida como el número de habitantes por unidad de superficie, se correlaciona directamente con la intensificación de la infraestructura urbana. Este aumento de infraestructura dura, caracterizado por la acumulación de asfalto, edificaciones, vehículos y otras fuentes antrópicas de calor, contribuye significativamente al fenómeno de las Islas de Calor Urbanas (ICU). En este sentido, las áreas urbanas, densamente pobladas, experimentan temperaturas superficiales notablemente superiores en comparación con sus contrapartes rurales menos densas. Esta diferencia térmica se atribuye no solo a la concentración de infraestructura dura, sino también a la intensidad de las actividades humanas. Por lo tanto, la relación entre la densidad poblacional y las ICU subraya cómo la aglomeración de personas y el desarrollo urbano acelerado generan un aumento en el efecto térmico en las ciudades, destacando la necesidad de estrategias de mitigación que consideren tanto la distribución espacial de la población como la configuración de la infraestructura urbana.

Las áreas urbanas de El Cerrito y Palmira están situadas en regiones caracterizadas por un clima típico de bosque seco, donde naturalmente se

experimentan temperaturas elevadas durante los periodos secos. No obstante, estas temperaturas se ven aún más incrementadas en las zonas céntricas de ambos municipios, donde la concentración poblacional y la infraestructura dura son más densas, y donde la presencia de cobertura verde es significativamente menor. Este fenómeno demuestra cómo la estructura urbana y la distribución de los espacios verdes pueden influir en la intensificación del calor en áreas específicas.

A pesar de estas condiciones, las Islas de Calor Urbanas identificadas en El Cerrito y Palmira no alcanzan las categorías de intensidad más alta, es decir, no se clasifican dentro de las ICU 'fuertes', que se definen por incrementos de temperatura superiores a 5°C por encima del promedio ambiental. Sin embargo, sí se registran valores que corresponden a categorías 'moderadas' y 'moderadamente fuertes', indicando la presencia de variaciones térmicas notables, aunque no extremas.

Los sensores remotos, esenciales en el campo de la teledetección, son instrumentos avanzados que capturan información de objetos o áreas sin necesidad de contacto físico directo. Estos dispositivos juegan un papel crucial en la investigación de las Islas de Calor Urbanas (ICU), fenómenos caracterizados por temperaturas significativamente más elevadas en zonas urbanas en comparación con sus alrededores rurales.

9. RECOMENDACIONES

Para mitigar los efectos del cambio climático y optimizar el manejo de las Islas de Calor Urbanas (ICU) dentro de los instrumentos de ordenamiento territorial, se recomienda considerar detenidamente los siguientes aspectos: uso del suelo, densificación urbana, estratificación social, y la configuración del paisaje urbano. Esto facilitará la incorporación de variables climáticas en la planificación urbana, permitiendo una respuesta más adaptada y sostenible a los desafíos ambientales actuales.

Es necesario incluir el análisis de las ICU dentro de los estudios sobre cambio climático y variabilidad climática. Esto ayudará a establecer directrices claras para todos los sectores, especialmente en lo que respecta al inmobiliario en el ordenamiento territorial y la expansión urbana. La integración de estas medidas es crucial para diseñar ciudades más resilientes y sostenibles.

El estudio de las ICU se enriquecería notablemente mediante la inclusión de variables climáticas medidas *in situ*, tales como la dirección del viento, datos de estaciones meteorológicas y el análisis de patrones durante fenómenos como El

Niño. Estos datos brindarían una comprensión más profunda de las dinámicas climáticas locales y su impacto en la formación de ICU.

Mediante el uso de la teledetección, se facilita no solo la identificación de las áreas más afectadas por las ICU, sino también la evaluación de sus efectos adversos sobre el clima local y la salud pública. La teledetección emerge como una herramienta esencial para explorar y recomendar estrategias de mitigación efectivas contra las ICU. Entre estas estrategias, se destacan el fomento de áreas verdes, la mejora de la ventilación urbana, y la implementación de materiales constructivos con propiedades reflectantes. Estas acciones, sustentadas por el análisis detallado que ofrecen los sensores remotos, pueden contribuir significativamente a la reducción del impacto térmico de las ICU, mejorando la calidad ambiental y el bienestar en los entornos urbanos.

Por tanto, se recomienda una integración holística de herramientas de teledetección en la planificación urbana y territorial, para abordar de manera efectiva las problemáticas asociadas a las Islas de Calor Urbanas y sus implicaciones en el cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

Alcaldía de Palmira. (2023). *Documento técnico de soporte para la formulación: Revisión ordinaria de contenidos de largo plazo del plan de ordenamiento territorial del municipio de Palmira* (septiembre 2023). 898 p.

Alonso, D. (2015, 6 de junio). *NDVI: qué es y cómo calcularlo con SAGA desde QGIS*. MappingGIS. https://mappinggis.com/2015/06/ndvi-que-es-y-como-calcularlo-con-saga-desde-qgis/

Anaya, P. (2019). *Temperatura superficial terrestre a partir de imágenes satelitales: Herramienta para su cálculo* [Trabajo de Fin de Grado, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Ingeniería Geomática y Topografía].

Ariza, A. (2013). *Descripción y corrección de productos Landsat 8 LDCM v.1.0*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Centro de investigación y desarrollo CIAF. Bogotá, Colombia.

Banco Mundial. (2020). *Reporte anual Julio 2019 – Junio 2020: Programa de Ciudades Resilientes*. Global Facility for Disaster Reduction and Recovery GFDRR – Confederación Suiza – Ministerio Federal de la República de Austria. 38 p.

Carvajal Téllez, R. (2020). *Análisis de la isla de calor urbana a nivel de superficie y de dosel en el periodo de 1981 a 2015 para la ciudad de Bogotá, Colombia*. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales.

Climate Central. (2021, 14 de julio). *Hot zones: Urban heat islands*. Research Brief by Climate Central. https://www.ctfassets.net/Hot_Zones_Urban_Heat_Islands_2021_UHI_Report.pdf

Climate Copernicus. (2023). *Demonstrating heat stress in European cities: Urban heat island intensity for European cities from 2008 to 2017 derived from reanalysis*. https://www.copernicus.eu/en/UHI

Cuesta, J. (2020). *Caracterización de la isla de la calor urbana (ICU) mediante el uso de imágenes obtenidas por satélite, procesadas mediante software de código abierto QGIS* [Trabajo de Máster, Universidad Politécnica de Valencia, Máster Universitario en Transporte, Territorio y Urbanismo].

Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE. (2018). *Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018: Boletín de resultados Valle del Cauca*. 12 p.

Didimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: Microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings, 35*(1), 69-76. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00081-6

Elsayed, I. (2012). Mitigation of the urban heat island of the city of Kuala Lumpur, Malaysia. *Middle East Journal of Scientific Research, 11*, 1602-1613.

Environmental Protection Agency (EPA). (2023). *Urban heat island basics: Reducing urban heat islands: Compendium of strategies*. https://www.epa.gov/heatislands/learn-about-heat-islands

EUMeTRain. (2017). *Meteorological satellite data training: Product tutorial on land surface temperature (LST)*. https://resources.eumetrain.org/data/4/460/index.htm

Fernández, F. (1996). *Manual de climatología aplicada: Clima, medio ambiente y planificación*. Madrid, España: Editorial Síntesis.

Fernández, F., & Martilli, A. (2012). El clima urbano: Aspectos generales y su aplicación en el área de Madrid. *Índice, Revista de Estadística y Sociedad*, (50), 21-24.

Gálvez, J. A. (2014). Criterios para la planificación y el diseño de corredores fluviales urbanos para la mitigación de la isla de calor. *Memoria del Congreso Nacional del Medio Ambiente*, 1-24.

Grajeda, M., Levet, A., Mondragón, M., & Velázquez, C. (2022). La importancia de la isla de calor urbano como un indicador más a tomar en cuenta en los procesos de planeación urbana en las ciudades de México. *Revista e-Rua, 15*(03), 9. https://doi.org/10.0000/e-Rua2022.03

Herbel, I., Croitoru, A., Imbroane, A., & Petrea, D. (2015). Methods to detect atmospheric and surface heat islands in urban areas. *Riscuri și catastrofe, 17*(2), 7–17.

Herrera Vargas, N. (2017). *Implementación de biomodelos estimativos de la calidad ecosistémica en el Nevado del Cocuy al año 2030 producto del retroceso glaciar*. http://hdl.handle.net/11349/25624

Howard, L. (1818). *The climate of London: Deduced from meteorological observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis* (Vol. 1). W. Phillips.

Instituto de Investigaciones Ambientales - IDEAM. (2012). *Indicadores que manifiestan cambios en el sistema climático de Colombia (Años y décadas más calientes y las más y menos lluviosas)* (IDEAM-METEO/001-2012). https://www.ideam.gov.co/documents/21021/553571/Indicadores+que+manifiestan+cambios+en+el+sistema+clim%C3%A1tico+de+Colombia.pdf

Instituto de Estudios Urbanos-IEU. (2017). *Crecimiento urbano en Colombia: Alcances y restricciones*. Universidad Nacional de Colombia. http://ieu.unal.edu.co/en/medios/noticias-del-ieu/item/crecimiento-urbano-en-colombia-alcances-y-restricciones

IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

Lombardo, M. (1997). Estudos interdisciplinares e metodologias e técnicas de análise do clima urbano. *Universidad de Buenos Aires*.

Manley, G. (1958). On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 84*(359), 70–72.

Municipio de El Cerrito. (2016). *Acuerdo No 015 de 2016: Por medio del cual se adopta el Plan de Desarrollo del Municipio El Cerrito, Valle del Cauca, para el Periodo 2016 – 2019 "El Cerrito una familia en paz para todos"*. Consejo Municipal. https://elcerritovalle.gov.co/MiMunicipio/ProgramadeGobierno/Acuerdo%20No.%20015%20de%202016%20Plan%20de%20Desarrollo%202016%20-%202019.pdf

Oke, T. R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology, 1*, 237-254.

Oke, T., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781139016476

Oke, T.R. (1976). Inadvertent modification of the city atmosphere and the prospects for planned urban climates. *Proceedings of the WMO Symposium on Meteorology as Related to Urban and Regional Land-Use Planning*. Asheville, WMO No. 444. Geneva: World Meteorological Organization, 150–175.

Organización de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos – ONU HABITAT. (2011). *Las ciudades y el cambio climático: Orientaciones para políticas*. Informe Mundial sobre Asentamientos Humanos 2011. Earthscan.

Orozco, L. (2020). *Análisis del fenómeno de islas de calor con sensores remotos y estaciones climáticas en Bogotá, Colombia*. [Tesis de pregrado, Universidad del Norte]. https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/9469/141557.pdf

Parra-Henao, G. (2010). Sistemas de información geográfica y sensores remotos: Aplicaciones en enfermedades transmitidas por vectores. *CES Medicina,*

24(2), 75–90. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-87052010000200007

Philandras, C.M., Metaxas, D.A., & Nastos, P.T. (1999). Climate variability and urbanization in Athens. *Theoretical and Applied Climatology, 63*(1), 65-72.

Porras, P., Marin, L., & Will, L. (2022). *Estudio de determinación de la intensidad de las islas de calor urbana en la provincia de Lima*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Ministerio del Ambiente de Perú – Municipalidad de Lima.

Preciado Vargas, M., & Aldana Olave, A. (2011). Análisis de presencia de islas de calor en Santiago de Cali empleando técnicas de teledetección. *Ventana Informática, 24*, 95-114.

Rao, P. K. (1972). Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society, 53*(7), 647-648. https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/53/7/1520-0477-53_7_646.xml

Salas, C., & Coy, D. (2019). Análisis espacial de islas de calor en la ciudad de Bogotá: Los efectos de la urbanización, un estudio desde la teledetección. [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/16028

Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A., & Assimakopoulos, D. (2001). On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Solar Energy, 70*(3), 201–216.

Sarricolea, P., Aliste, E., Castro, P., & Escobedo, C. (2008). Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. *Revista de Climatología, 8*, 71-84.

Segura, D., & Bejarano, F. (2019). Análisis del índice normalizado de diferencia de vegetación (NDVI) en la zona sur del departamento del Tolima. [Monografía, Universidad de Ibagué].

Sjovold, K. (2019). El efecto de la isla de calor urbana en Sao Paulo – Brasil. *ArcGIS Story Maps*. https://storymaps.arcgis.com/stories/El-Efecto-de-La-Isla-de-Calor-Urbana

Soto-Estrada, E. (2019). Estimación de la isla de calor urbana en Medellín, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 35*(2), 421-434. https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.02.13

Soto-Soto, J., Garzón, J., & Jiménez, G. (2020). Análisis de islas de calor urbano usando imágenes Landsat: Caso de estudio Armenia – Colombia 1996 – 2018. *Revista Espacios, 41*(08), 9.

Stewart, I., & Oke, T. (2009). Classifying urban climate field sites by “local climate zones”: The case of Nagano, Japan. *The Seventh International Conference on Urban Climate*.

Streutker, D. (2003). Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *Remote Sensing of Environment, 85*, 282–289.

Wan, Z. (2008). New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products. *Remote Sensing of Environment, 112*(1), 59–74.

Zuluaga, S., Londoño, F., & Parra, E. (2023). El impacto de la arborización como estrategia de mitigación de la isla de calor urbana en el Caribe colombiano. *Revista Científica de Arquitectura y Urbanismo, 44*(2).