

**CARACTERIZACIÓN MULTITEMPORAL DE LAS ISLAS DE CALOR URBANAS
EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA EN EL PERIODO 2000-
2020**

JERÓNIMO RAMÍREZ MOSQUERA

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA
SANTIAGO DE CALI
2024**

**CARACTERIZACIÓN MULTITEMPORAL DE LAS ISLAS DE CALOR URBANAS
EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA EN EL PERIODO 2000-
2020**

JERÓNIMO RAMÍREZ MOSQUERA

Trabajo de grado para optar al título de Geógrafo

Director

Wilmar Loaiza Cerón

Ph.D en Clima y Ambiente

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA
SANTIAGO DE CALI
2024**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

De manera fundamental agradezco a mis padres quienes han contribuido en mi crecimiento personal y profesional desde siempre. ¡Gracias!

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	12
2. JUSTIFICACIÓN	19
3. OBJETIVOS	21
3.1 GENERAL	21
3.2 ESPECÍFICOS	21
4. MARCO CONCEPTUAL.....	22
4.1 TELEDETECCIÓN	22
4.1.2 Espectro electromagnético	23
4.2 ISLA DE CALOR URBANA	24
4.2.1 Temperatura superficial terrestre	26
4.2.2 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.....	27
5. ÁREA DE ESTUDIO.....	29
6. ESTADO DEL ARTE	32
7. METODOLOGÍA.....	37
7.1 TIPO DE ESTUDIO	37
7.2 SELECCIÓN DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 7 ETM+ Y LANDSAT 8 OLI/TIRS	39
7.3 TRATAMIENTO DE LAS IMÁGENES LANDSAT 7 ETM + Y LANDSAT 8 OLI / TIRS	40
7.4 CÁLCULO DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL TERRESTRE (LST)	42
7.5 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)	43
7.6 PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN	44
7.6.1 ICU	44
7.6.2 Tipo de cobertura	44
8. RESULTADOS	46
8.1 BUCARAMANGA	46
8.1.1 LST.....	46
8.1.2 NDVI.....	47
8.1.3 Caracterización multitemporal ICU	48
8.2 FLORIDABLANCA.....	51

8.2.1 LST	52
8.2.2 NDVI	53
8.2.3 Caracterización multitemporal ICU	53
8.3 GIRÓN	56
8.3.1 LST	57
8.3.2 NDVI	58
8.3.3 Caracterización multitemporal ICU	59
8.4 PIEDECUESTA	62
8.4.1 LST	63
8.4.2 NDVI	63
8.4.3 Caracterización multitemporal ICU	64
9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	68
10. CONCLUSIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	71
ANEXOS	77

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Crecimiento intercensal en el AMB durante el periodo 1985 - 1993.....	12
Tabla 2. Población en el AMB en 1993 y 2019.....	17
Tabla 3. Población en el AMB año 2019.	31
Tabla 4. Características de las imágenes satelitales elegidas.	39
Tabla 5. Clasificación de intensidad de ICU.	44
Tabla 6. Clasificación por tipo de cobertura.	45

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1. Área total ICU de Bucaramanga en los años 2000 - 2020.....	49
Gráfico 2. Área por categoría ICU de Bucaramanga en los años 2000 - 2020.....	51
Gráfico 3. Área total ICU de Floridablanca en los años 2000 - 2020.....	54
Gráfico 4. Área por categoría ICU de Floridablanca en los años 2000 - 2020.	56
Gráfico 5. Área total ICU de Girón en los años 2000 - 2020.	60
Gráfico 6. Área por categoría ICU de Girón en los años 2000 - 2020.	62
Gráfico 7. Área total ICU de Piedecuesta en los años 2000 - 2020.	65
Gráfico 8. Área por categoría ICU de Piedecuesta en los años 2000 - 2020.	67

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Huella urbana del AMB 2000 - 2020	14
Figura 2. Vista aérea de los barrios Antonia Santos y Bolívar, Bucaramanga. Año 2002.	14
Figura 3. Vista aérea de los barrios Antonia Santos y Bolívar, Bucaramanga. Año 2019.	15
Figura 4. Vista aérea de los barrios La Concordia y Nuevo Sotomayor, Bucaramanga. Año 2002.....	15
Figura 5. Vista aérea de los barrios La Concordia y Nuevo Sotomayor, Bucaramanga. Año 2019.....	16
Figura 6. Vista aérea del barrio San Francisco, Bucaramanga. Año 2002.....	16
Figura 7. Vista aérea del barrio San Francisco, Bucaramanga. Año 2019.....	17
Figura 8. Formas de teledetección.....	23
Figura 9. Isotermas anuales en París, Francia.....	25
Figura 10. Representación gráfica de la temperatura superficial terrestre en Hanoi, Vietnam 2003 - 2014.	27
Figura 11. Representación gráfica del NDVI en Hanoi, Vietnam 2003 - 2014.....	28
Figura 12. Ubicación geográfica del Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB)....	29
Figura 13. Diseño metodológico.....	38

Figura 14. División política urbana de Bucaramanga.	46
Figura 15. LST de Bucaramanga en los años 2000 - 2020.	47
Figura 16. NDVI de Bucaramanga en los años 2000 - 2020.	48
Figura 17. ICU de Bucaramanga en los años 2000 - 2020.	49
Figura 18. Tipo de cobertura de Bucaramanga en los años 2000 - 2020.	50
Figura 19. División política urbana de Floridablanca.	51
Figura 20. LST de Floridablanca en los años 2000 - 2020.	52
Figura 21. NDVI de Floridablanca en los años 2000 - 2020.	53
Figura 22. ICU de Floridablanca en los años 2000 - 2020.	55
Figura 23. Tipo de cobertura de Floridablanca en los años 2000 - 2020.	55
Figura 24. División política urbana de Girón.	57
Figura 25. LST de Girón en los años 2000 - 2020.	58
Figura 26. NDVI de Girón en los años 2000 - 2020.	59
Figura 27. ICU de Girón en los años 2000 - 2020.	60
Figura 28. Tipo de cobertura de Girón en los años 2000 - 2020.	61
Figura 29. División política urbana de Piedecuesta.	62
Figura 30. LST de Piedecuesta en los años 2000 - 2020.	63
Figura 31. NDVI de Piedecuesta en los años 2000 - 2020.	64
Figura 32. ICU de Piedecuesta en los años 2000 - 2020.	65
Figura 33. Tipo de cobertura de Piedecuesta en los años 2000 - 2020.	66

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Bases de datos de imágenes satelitales.	77
Anexo B. Datos de temperatura superficial terrestre por división urbana.	78
Anexo C. Datos de NDVI por división urbana.	81
Anexo D. ICU en terreno.	84

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo caracterizar la evolución de las islas de calor urbanas (ICU) en el Área Metropolitana de Bucaramanga en el periodo 2000 - 2020, considerando que esta área ha presentado una considerable urbanización en las últimas décadas. El estudio se desarrolló a través del uso de la teledetección, con imágenes satelitales de sensores remotos del proyecto Landsat 7 ETM + y Landsat 8 OLI/TIRS para obtener indicadores de temperatura superficial terrestre (LST) y del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el área de estudio. Posteriormente, se identificaron y clasificaron las ICU y el tipo de cobertura de acuerdo con los parámetros de clasificación establecidos y se realizó la caracterización del fenómeno en el área. Como resultado, fundamentalmente se halló que las ICU se expandieron en Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta en un 27,3 %; 82,1 %; 163,4 % y 85,8 % de forma respectiva, sobre un tipo de cobertura edificada - descubierta generalmente.

Palabras claves: LST, NDVI, ICU, Tipo de cobertura, Teledetección

INTRODUCCIÓN

Según datos de Naciones Unidas¹, para el año 1950, el 30% de la población mundial residía en zonas urbanas; mientras que para el 2018 esta cifra se incrementó hasta alcanzar el 55% a nivel global. Así, y de acuerdo con lo planteado por Hereher², el cambio de cobertura o uso de la tierra genera un impacto formidable en sus características físicas y ecológicas del área intervenida, por lo que da lugar a diversos fenómenos ambientales sobre esta. Uno de estos fenómenos está asociado a las áreas urbanizadas debido a las propiedades térmicas de los materiales que las conforman y se le conoce como islas de calor urbanas (ICU). Estas se caracterizan por ser un microclima cálido en un área urbana, el cual se diferencia de otros presentes en áreas circundantes.

En consonancia con lo expuesto por *Environmental Protection Agency* (EPA por sus siglas en inglés) en el documento titulado “*Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Urban Heat Island Basics*”³, la presencia del fenómeno ICU genera diversos impactos negativos, entre los que se encuentran: un mayor consumo de energía, problemas en la salud humana, deterioro de la calidad del agua, elevadas emisiones de contaminantes atmosféricos y gases de invernadero.

El Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB), situada al noreste de Colombia, en el departamento de Santander, y conformada por los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta, no ha sido ajena a los procesos de urbanización, ya que en las últimas décadas ha experimentado una importante expansión de las áreas urbanas de sus municipios, así como de procesos de redensificación principalmente en su ciudad núcleo, Bucaramanga.

En ese sentido, esta investigación caracteriza la evolución de las ICU en el Área Metropolitana de Bucaramanga en el periodo 2000 - 2020, mediante el uso de la

¹ NACIONES UNIDAS. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. [En línea]. Nueva York: Naciones Unidas, 2019. p. 21. [Citado el 18 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>

² HEREHER, Mohamed. *Effect of land use/cover change on land surface temperatures - The Nile Delta, Egypt*. Journal of African Earth Sciences [en línea]. 2017, 126. 75 - 83. [Consultado 20 mayo 2024]. ISSN 1464-343. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2016.11.027.

³ ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Urban Heat Island Basics*. [En línea]. Washington D.C.: Environmental Protection Agency, 2008. p. 13. [Citado el 15 de junio de 2024]. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-05/documents/reducing_urban_heat_islands_ch_1.pdf

teledetección, al emplear imágenes satelitales de los sensores remotos Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI/TIRS, para obtener indicadores de temperatura superficial terrestre (LST) y del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el área de estudio, y con base en los parámetros de clasificación, identificar y clasificar las ICU a partir de LST y el tipo de cobertura a partir de NDVI.

El documento contiene diez capítulos en los que se desarrolla la investigación. En el primer capítulo se expone la problemática en la zona de estudio. En el segundo capítulo se aborda la justificación de esta investigación. En el tercer capítulo se formulan los objetivos, los cuales definen los alcances de la investigación. En el cuarto capítulo se desarrolla el marco conceptual en donde se definen variables y conceptos claves sobre los que se fundamentó el estudio. En el quinto capítulo se realiza la descripción de las principales características del área de estudio. El capítulo seis tuvo como finalidad analizar literatura relacionada con el tema de investigación a escala global, nacional y departamental. El séptimo capítulo tuvo como objetivo exponer y explicar la metodología desarrollada en la investigación. El octavo capítulo expone los resultados obtenidos en el estudio al aplicar la metodología propuesta. El noveno capítulo exhibe la discusión de resultados que surge a raíz del estudio. Finalmente, el décimo capítulo abarca las conclusiones en donde se exponen los principales hallazgos de la investigación.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los centros urbanos de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta municipios que conforman el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) fueron erigidos sobre la meseta de Bucaramanga y en los valles aluviales de los ríos de Oro, Suratá, Lebrija, Frío y Hato por lo que sus suelos presentan diversas limitaciones para la expansión urbana, en especial la meseta de Bucaramanga; en ese sentido y con base en la caracterización del poblamiento del Área Metropolitana de Bucaramanga realizada por Rodríguez Navas⁴, se identificó que a partir del año 1985 el suelo urbanizable ya era escaso en la meseta de Bucaramanga, esto generó el poblamiento acelerado y asimétrico en otros municipios cercanos como Girón y Piedecuesta (ver Tabla 1) los cuales poseían tierras urbanizables más económicas que las de Bucaramanga y Floridablanca debido a la conurbación que ya presentaban estos dos municipios.

Tabla 1. Crecimiento intercensal en el AMB durante el periodo 1985 - 1993

Periodo intercensal	Crecimiento intercensal (%)			
	Bucaramanga	Floridablanca	Girón	Piedecuesta
1985 - 1993	17,66	34,09	57,79	50,41

Fuente: elaboración propia a partir del Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, 2012

En consecuencia, en 1994 la Junta Metropolitana adoptó el Plan Integral de Desarrollo Metropolitano (Acuerdo Metropolitano 0061 de 1994)⁵ con el objetivo de orientar las estrategias, políticas, proyectos y acciones para lograr un desarrollo integral, coherente, participativo, sostenible y continuo para la jurisdicción de los municipios del AMB y estableció una serie de criterios entre los cuales se destacan: la descentralización de actividades para descongestionar la meseta, la optimización del uso del suelo mediante la redensificación de las áreas ya ocupadas y el desarrollo de

⁴ RODRÍGUEZ NAVAS, Jaime. Caracterización del poblamiento y la metropolización del territorio del área metropolitana de Bucaramanga. En: Revista IUSTITIA. Enero - diciembre 2012, nro. 10, pp. 38 - 40. ISSN 1692-9403.

⁵ ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA. Acuerdo Metropolitano 0061 (1994). Por el cual se adopta el Plan Integral de Desarrollo Metropolitano [en línea]. Bucaramanga, 1994. 85 p. [Consultado 3 noviembre 2022]. Disponible en: http://amb.gov.co/jdownloads/Documentos/Juridica/Acuerdos/acuerdo_metropolitano_no._0061_de_1994.pdf

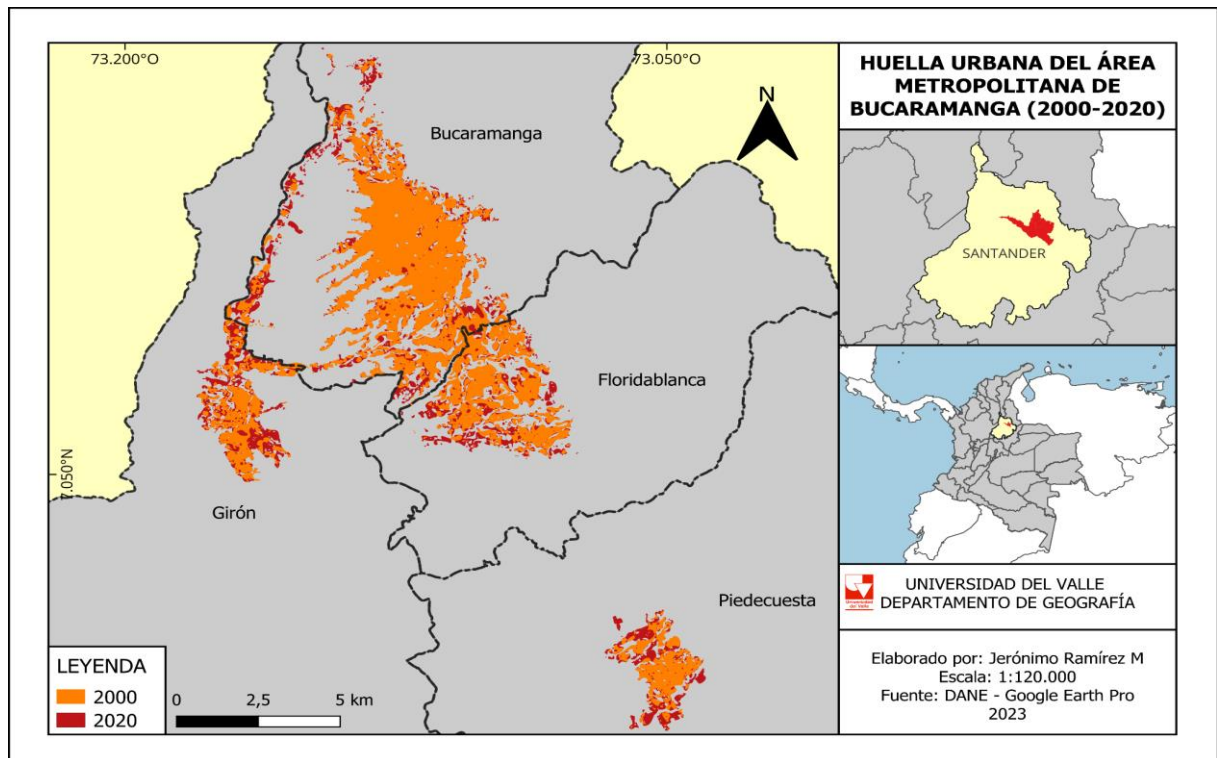
un corredor multifuncional central del área metropolitana con usos autorizados que combinaran alta y media densidad habitacional y alta densidad de otros usos.

Como resultado, conforme a estos lineamientos establecidos en el Plan Integral de Desarrollo Metropolitano de 1994, los municipios del AMB adaptaron sus Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y, en efecto, se encuentra que en las últimas décadas en municipios como Floridablanca se han establecido nuevas sedes de instituciones educativas, así como empresas del sector tecnológico y proyectos de vivienda; en Piedecuesta se han creado proyectos de vivienda para diversos niveles socioeconómicos, centros de recreación y de salud, específicamente en la Mesa de Ruitoque, valle de Mensulí y el casco urbano.

Por otra parte, en Bucaramanga, mediante los planes de renovación urbana, se han demolido predios de bastante antigüedad o degradación y posteriormente se han redensificado mediante la construcción de edificios destinados a un uso residencial. Específicamente, ello se observa en barrios como: Antonia Santos, Bolívar, La Concordia, Nuevo Sotomayor y San Francisco en donde se aprecia un incremento importante de la redensificación urbana, especialmente por la aparición de edificios entre 2002 a 2020 y, por último, en Girón se han creado establecimientos dedicados principalmente a actividades industriales ⁶(ver Figuras 1 a 7). Por lo cual, la población del AMB experimentó un incremento aproximado de 400.000 personas entre los años 1993 y 2019 (ver Tabla 2).

⁶ RODRÍGUEZ, Op., Cit., p.40.

Figura 1. Huella urbana del AMB 2000 - 2020



Fuente: elaboración propia, con base en DANE, 2022 y Google Earth Pro, 2022

Figura 2. Vista aérea de los barrios Antonia Santos y Bolívar, Bucaramanga. Año 2002



Fuente: GOOGLE EARTH. Imagen satelital de Bucaramanga 2002 [en línea]. [Consultado: 20 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://lc.cx/4BC-nN>

Figura 3. Vista aérea de los barrios Antonia Santos y Bolívar, Bucaramanga. Año 2019



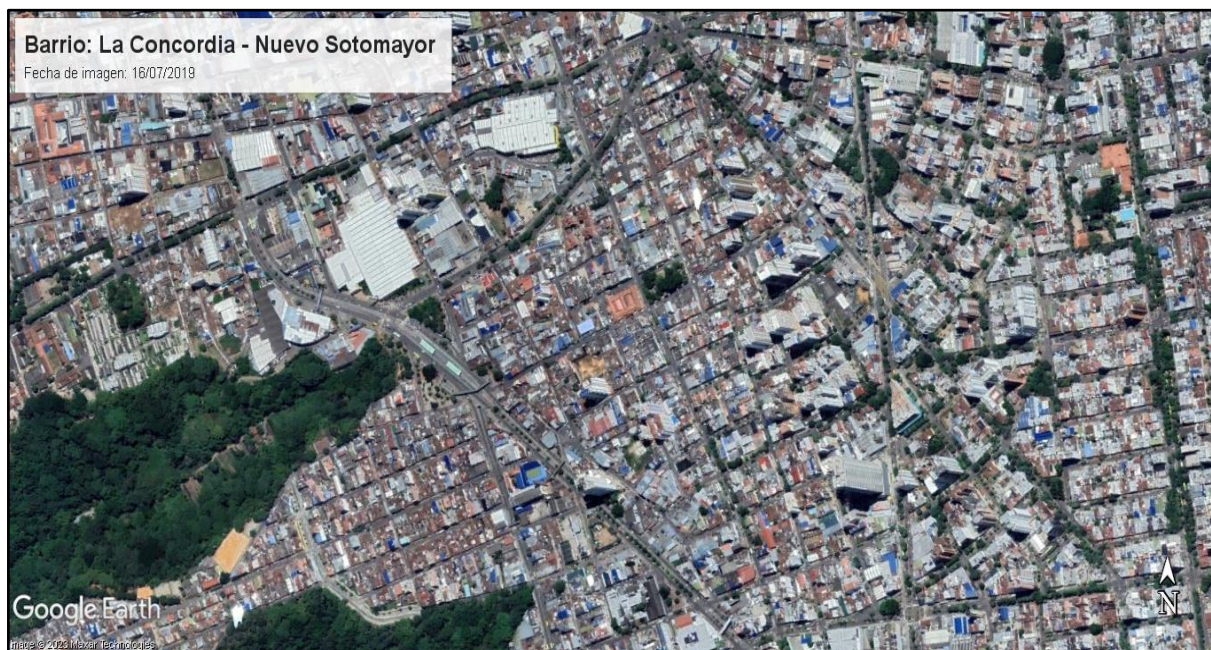
Fuente: GOOGLE EARTH. Imagen satelital de Bucaramanga 2019 [en línea].
[Consultado: 20 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://lc.cx/4BC-nN>

Figura 4. Vista aérea de los barrios La Concordia y Nuevo Sotomayor, Bucaramanga. Año 2002



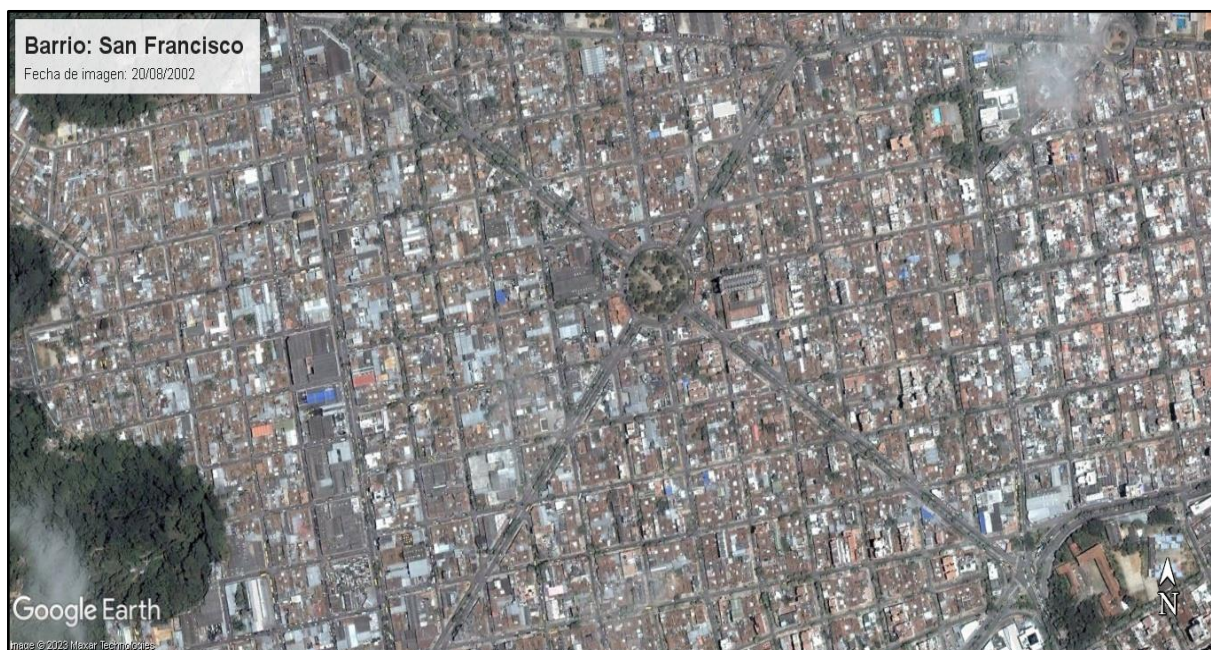
Fuente: GOOGLE EARTH. Imagen satelital de Bucaramanga 2002 [en línea].
[Consultado: 20 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://lc.cx/4BC-nN>

Figura 5. Vista aérea de los barrios La Concordia y Nuevo Sotomayor, Bucaramanga. Año 2019



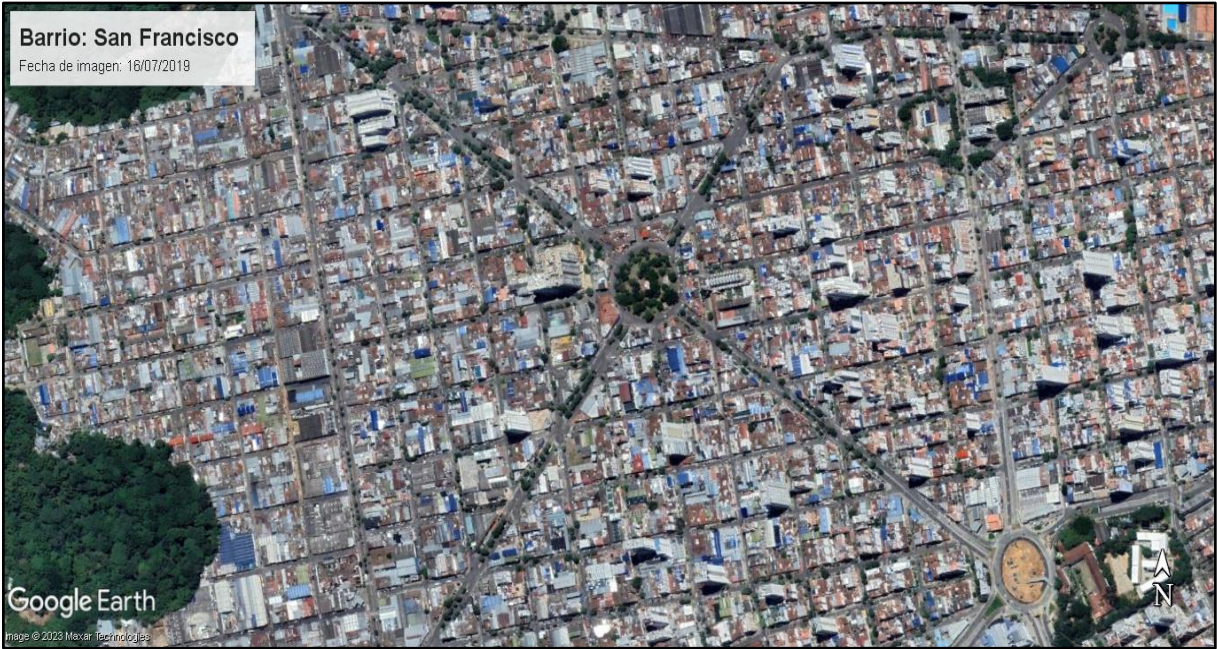
Fuente: GOOGLE EARTH PRO. Imagen satelital de Bucaramanga 2019 [en línea]. [Consultado: 20 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://lc.cx/4BC-nN>

Figura 6. Vista aérea del barrio San Francisco, Bucaramanga. Año 2002



Fuente: GOOGLE EARTH. Imagen satelital de Bucaramanga 2002 [en línea]. [Consultado: 20 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://lc.cx/4BC-nN>

Figura 7. Vista aérea del barrio San Francisco, Bucaramanga. Año 2019



Fuente: GOOGLE EARTH PRO. Imagen satelital de Bucaramanga 2019 [en línea]. [Consultado: 20 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://lc.cx/4BC-nN>

Tabla 2. Población en el AMB en 1993 y 2019

Año	1993	2019
Bucaramanga	414.365	528.610
Floridablanca	192.856	267.538
Girón	79.799	200.733
Piedecuesta	72.631	163.362
Total AMB	759.651	1.160.243

Fuente: elaboración propia, con base en DANE y Observatorio Metropolitano de Bucaramanga, 2022

De igual modo, en cuanto a población arbórea, en el año 2014, mediante el censo arbóreo metropolitano⁷, se contabilizó una cifra aproximada de 50.000 árboles en el AMB, distribuidos en parques, separadores viales, zonas verdes y antejardines; lo que evidencia la ínfima población arbórea urbana al servicio de los habitantes en comparación con la población para el año 2019. Por otra parte, en lo que respecta al

⁷ ALCALDÍA DE BUCARAMANGA. Manual de silvicultura de Bucaramanga. Bucaramanga: Gómez Anaya, W.F , 2023. p. 9.

parque automotor metropolitano, según la Dirección de Tránsito de Bucaramanga y la entidad del Área Metropolitana de Bucaramanga⁸, en el año 2000 el parque automotor de toda el área metropolitana se contabilizaba en 80.300 vehículos aproximadamente, mientras que para el año 2020 esta cifra ascendió a 760.746 vehículos, lo cual evidencia un abrupto crecimiento en 2 décadas.

En ese sentido, se identificaron elementos que influyen en la génesis e intensificación de las islas de calor urbanas, entre ellos se halla uno de los más influyentes, como lo es la urbanización vertiginosa. De esta manera, lo expuesto en este apartado nos conduce a formular la pregunta de investigación orientada a: ¿Cómo han evolucionado las islas de calor urbanas en el Área Metropolitana de Bucaramanga en el periodo 2000 - 2020?

⁸ DIRECCIÓN DE TRÁNSITO DE BUCARAMANGA. Parque automotor del Área Metropolitana de Bucaramanga [diapositivas]. Bucaramanga: Dirección de Tránsito de Bucaramanga, 2022. 5 diapositivas. [Consultado 16 marzo 2024]. Disponible en: <https://transitobucaramanga.gov.co/dtb/wp-content/uploads/2023/01/PARQUE-AUTOMOTOR-AREA-METROPOLITANA-CORTE-31-DIC-2022.pdf>

2. JUSTIFICACIÓN

Según datos de ONU Hábitat⁹, entre el año 2000 y 2015, los asentamientos urbanos crecieron un 1,5 % anual en lo que respecta al área construida, este crecimiento fue mayor en países de ingreso bajo (2,6 %) que en países de ingreso medio o alto (1,7 y 1,0 respectivamente). En consecuencia, para el año 2020 se contabilizaron 1.934 metrópolis con más de 300.000 habitantes, lo cual representa aproximadamente el 60 % de la población mundial residiendo en ciudades¹⁰. Debido a este crecimiento, muchas urbes se han expandido más allá de sus límites político-administrativos.

Como consecuencia de dicha dinámica, los procesos de urbanización han generado diversos cambios, uno de los más evidentes es el impacto en las alteraciones del uso del suelo y, por ende, la modificación de las dinámicas naturales entre la atmósfera y la superficie terrestre edificada. Un claro ejemplo de lo anterior se encuentra en la aparición de un microclima cálido que se distingue de los microclimas presentes de las áreas circundantes, a esto se le conoce como isla de calor urbana o ICU y se define como “un pico anormal de la temperatura en los centros urbanos en comparación con las zonas suburbanas y rurales que la rodean”¹¹.

De acuerdo con EPA¹², el crecimiento urbano altera las condiciones climáticas a través del aumento de la temperatura del aire y de las emisiones de superficie, lo que facilita la aparición de las ICU. Por ende, estas variaciones de temperatura presentan serias repercusiones en el medio ambiente y la salud humana.

Así, las ICU causan un impacto negativo en los ecosistemas y en el clima local, además de aumentar la demanda energética en las ciudades. Adicionalmente, este fenómeno incrementa la ocurrencia de enfermedades relacionadas con las altas temperaturas, como dificultades respiratorias e insolación, debido a la disminución del confort térmico entre los habitantes, así como otras cuyos vectores se ven favorecidos

⁹ PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS. Estado Global de las Metrópolis 2020 - Folleto de Datos Poblacionales. Nairobi: ONU Habitat, 2020. p.4.

¹⁰ Ibid., p. 3.

¹¹ GIRALDO, Ana *et al.* Análisis de los Islotes de Calor Intra Urbanos en Bogotá, Colombia. ResearchGate [en línea]. 2022. p. 2. [Consultado 15 noviembre 2022]. DOI:10.13140/RG.2.2.27865.19044.

¹² ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, citado por SOTO, José; GARZÓN, Julián y JIMÉNEZ, Gonzalo. Análisis de islas de calor urbano usando imágenes Landsat: caso de estudio Armenia-Colombia 1996-2018. Revista Espacios. 2020. p. 2.

con las nuevas condiciones climáticas. En síntesis, las ICU repercuten en la calidad de vida de la población, su productividad y de igual manera afectan al medio ambiente.

3. OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Caracterizar la evolución de las islas de calor urbanas en el Área Metropolitana de Bucaramanga en el periodo 2000 - 2020.

3.2 ESPECÍFICOS

- Determinar la temperatura superficial terrestre (LST) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en los centros urbanos del Área Metropolitana de Bucaramanga en el periodo evaluado.
- Identificar y clasificar las islas de calor urbanas en los centros urbanos del Área Metropolitana de Bucaramanga en el periodo evaluado.
- Identificar y clasificar el tipo de cobertura en los centros urbanos del Área Metropolitana de Bucaramanga en el periodo evaluado.

4. MARCO CONCEPTUAL

4.1 TELEDETECCIÓN

Según Chuvieco¹³, la teledetección se define como la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores remotos instalados en plataformas espaciales. En ese sentido, y de acuerdo con la definición anterior, se tiene en cuenta la relación existente entre el sensor y La Tierra en aspectos como la recepción, almacenamiento e interpretación de los datos, a lo cual se denomina sistema de teledetección espacial y lo componen los siguientes elementos¹⁴:

1. Fuente de energía: se entiende como el origen de la radiación electromagnética detectada por el sensor. Puede provenir de un punto externo o generada por el mismo sensor.
2. Cubierta terrestre: conformada por vegetación, agua, suelo o áreas construidas, la cual recibe la señal energética y la refleja de acuerdo con sus propiedades.
3. Sistema sensor: lo compone el sensor y su plataforma. Tiene como función captar la energía procedente de la superficie terrestre, compilarla y enviarla al sistema de recepción.
4. Sistema de recepción - comercialización: tiene como misión recibir la información transmitida por la plataforma, corregirla y enviarla.
5. Intérprete: convierte los datos en información
6. Usuario final: analiza la información derivada de la interpretación.

Para adquirir los datos a partir de un sensor remoto es necesario que exista un flujo de radiación desde la superficie terrestre hacia este (ver Figura 8), lo cual puede ser posible por medio de¹⁵:

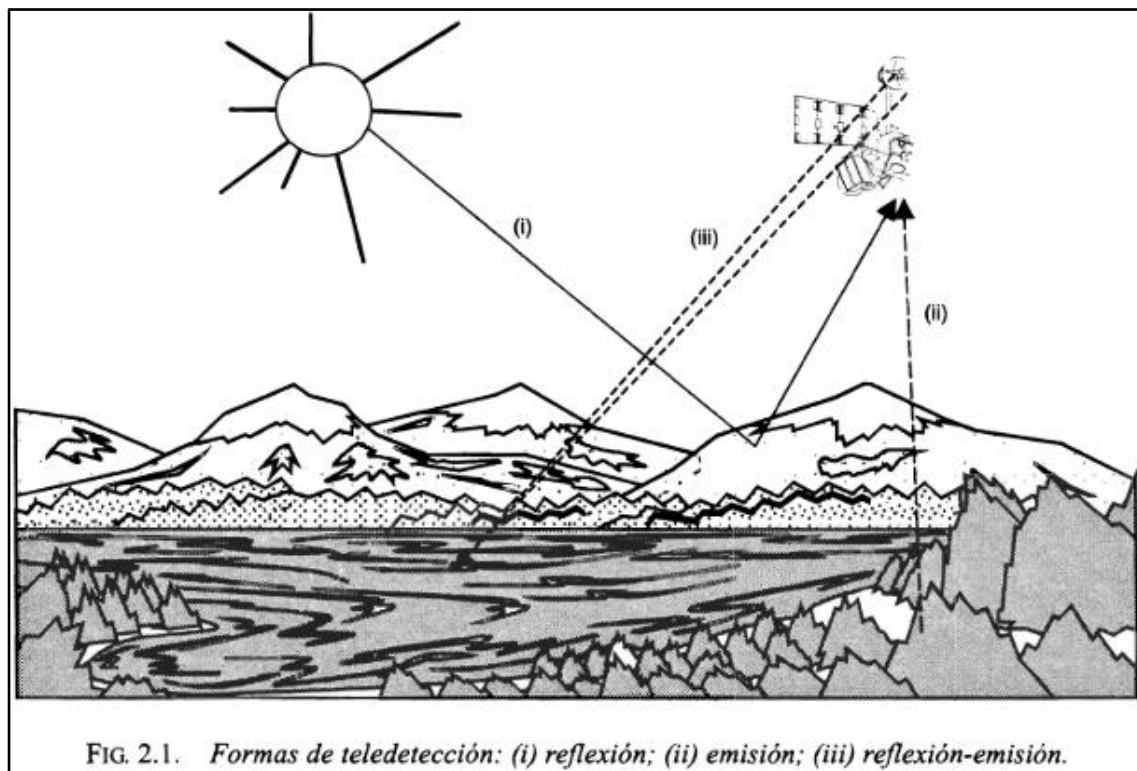
¹³ CHUVIECO SALINERO, Emilio. Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. 3 ed. Barcelona: Ariel, 2008. p. 17.

¹⁴ Ibid., p. 18

¹⁵ Ibid., p. 44

1. Reflexión: se genera cuando el sol ilumina la superficie terrestre y esta se refleja de acuerdo con el tipo de cobertura presente en ella. El sensor toma el flujo emitido y lo transmite a las estaciones receptoras.
2. Emisión - Reflexión: tiene su génesis cuando el sensor emite su propia energía, esta se refleja sobre la superficie terrestre y posteriormente el sensor toma este flujo y lo transmite a las estaciones.
3. Emisión: se obtiene cuando las cubiertas emiten su propia energía, por ejemplo, el calor de la superficie.

Figura 8. Formas de teledetección



Fuente: CHUVIECO SALINERO, Emilio. Formas de teledetección. Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. 3 ed. Barcelona: Ariel, 2008. p. 44.

4.1.2 Espectro electromagnético. El espectro electromagnético es el conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas, las cuales

comprenden desde las longitudes más cortas como los rayos gamma hasta las kilométricas como las microondas¹⁶.

De esta manera, es importante precisar las bandas espectrales más utilizadas por la teledetección; estas son¹⁷:

1. Espectro visible (0,4 a 0,7 μm): es la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos. en esta región se distinguen tres bandas elementales: rojo, verde y azul.
2. Infrarrojo cercano (IRC 0,7 a 1,3 μm): esta banda permite distinguir cubiertas vegetales y concentraciones de humedad.
3. Infrarrojo medio (IRM 1,3 a 14 μm): esta banda espectral se divide en infrarrojo de onda corta (SWIR), el cual es ideal para estimar el contenido de humedad en la superficie, mientras que el segundo, el infrarrojo medio (IRM), es usado para la detección de focos de alta temperatura.
4. Infrarrojo lejano o térmico (IRT: 8 a 14 μm): esta banda detecta el calor proveniente de la superficie terrestre.

4.2 ISLA DE CALOR URBANA

La sustitución de una superficie natural por una superficie urbanizada o artificial tiene diversos impactos, por ejemplo, el paisaje sonoro se transforma, la biodiversidad se reduce o desaparece en el área, se minimiza la permeabilidad del suelo y de igual manera la temperatura se eleva en la superficie urbanizada. En ese sentido, según Landsberg¹⁸, se entiende como isla de calor urbana (ICU) a la presencia de un microclima cálido en un área urbanizada, el cual dista de otros presentes en áreas con similares características, pero conservadas en su estado natural (ver Figura 9), en comparación, EPA define isla de calor urbana como “área urbana de muchas construcciones que son más calientes que las áreas rurales cercanas”¹⁹.

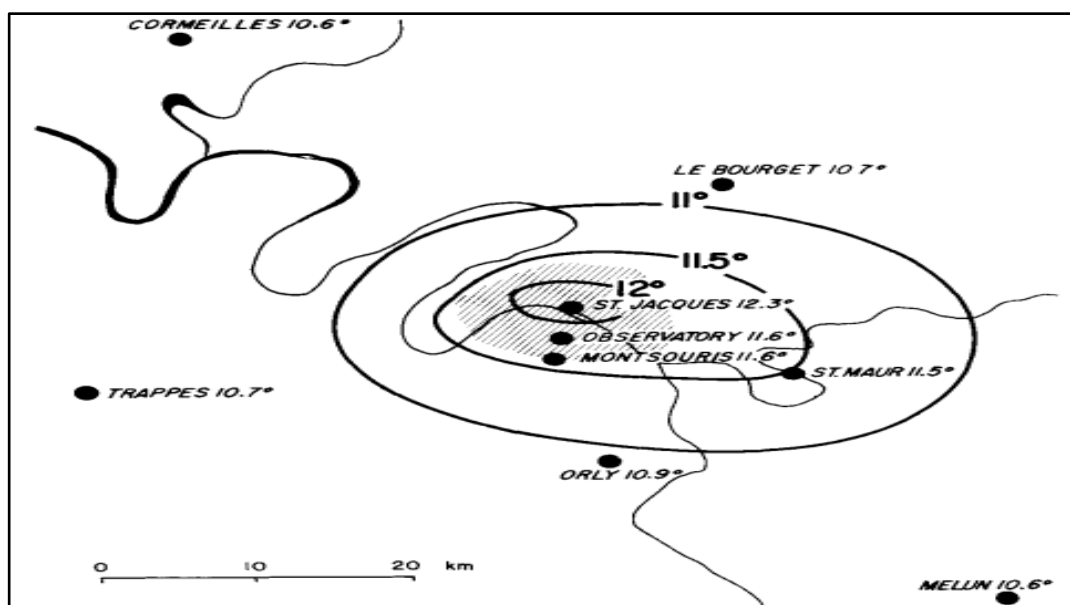
¹⁶ Ibid., p. 45

¹⁷ Ibid., 46

¹⁸ LANDSBERG, Helmut. *The Urban Climate*. Nueva York: Academic Press, 1981. p. 83.

¹⁹ AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS. [sitio web]. Washington D.C.: EPA, Las islas de calor. [Consulta: 24 noviembre 2022]. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/las-islas-de->

Figura 9. Isotermas anuales en París, Francia



Fuente: LANDSBERG, Helmut. *Annual isothermes ("C) in the area of Paris, France*. 1981. *The Urban Climate*. Nueva York: Academic Press, 1981. p. 90.

Asimismo, se considera que la primera documentación sobre una isla de calor urbana la realizó en 1818 el farmacéutico inglés Luke Howard en su publicación titulada *The Climate of London*, donde expone el descubrimiento de un exceso de calor en Londres en comparación con la zona rural.

Existen diversos factores que influyen en la formación de las ICU, por ejemplo, las superficies urbanas se componen en su mayoría de materiales oscuros con propiedades de alta absorción y retención del calor, esto se puede encontrar en los pavimentos y concretos que tienen protagonismo como materiales de construcción de la infraestructura urbana²⁰.

Además, otro factor considerado en esta génesis es la impermeabilidad de los materiales de construcción, propiedad la cual no permite la infiltración del agua producto de las precipitaciones o de cualquier escorrentía, por ende, no existe disipación del calor de la superficie mediante la evaporación o evapotranspiración²¹.

calor#:~:text=Las%20islas%20de%20calor%20pueden,de%20gases%20de%20efecto%20invernader
O.

²⁰ GARTLAND, Lisa. *Heat Islands Understanding And Mitigating Heat In Urban Areas*. Londres: Earthscan, 2008. p. 15.

²¹ Ibid., p. 15.

En ese orden de ideas, también se tienen en cuenta factores que influyen en el calor urbano, por un lado, la incidencia del viento debido a que vientos de bajas velocidades inciden en el almacenamiento de calor en la superficie durante el día y lentifican la disipación de calor en la noche; por otro lado, también al calor resultado de las actividades antropogénicas de diversas fuentes tales como: residenciales, comerciales, industriales, transporte, entre otras²².

Las ICU presentan una serie de características; algunas de ellas son²³:

1. Alta temperatura de la superficie: generada por radiación solar, la cual calienta la superficie urbana; igualmente, la temperatura puede variar según las propiedades de los materiales implementados en la construcción de la superficie.
2. Alta temperatura del aire: se genera cuando durante el día la superficie urbana se calienta y como consecuencia la temperatura del aire urbano también se eleva.
3. Mayor intensidad durante los días despejados y con poco viento: debido a una mayor radiación solar recibida y una lenta disipación del calor por parte del viento.
4. Aumentan con el crecimiento urbano: a medida que aumenta la superficie artificial, la isla de calor tiende a expandirse e intensificarse.

Para la identificación de las ICU es fundamental tener en cuenta las siguientes variables:

4.2.1 Temperatura superficial terrestre. Se define a la temperatura superficial terrestre (LST) como la temperatura radiativa de la superficie terrestre, medida a través de un sensor remoto (ver Figura 10)²⁴. La LST mide la emisión de radiación térmica de la superficie donde la energía solar entrante interactúa y calienta el suelo o el dosel arbóreo en caso de un área con vegetación. En ese sentido, se entiende

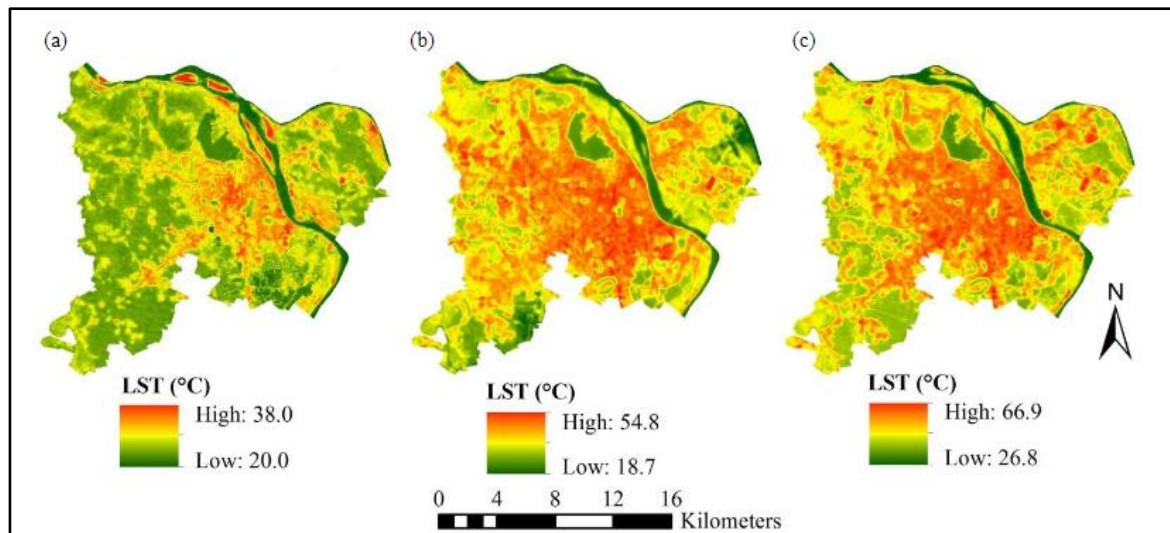
²² Ibid., p. 22.

²³ Ibid., p. 3.

²⁴ COPERNICUS GLOBAL LAND SERVICE. [sitio web]. Bruselas: COPERNICUS, *Land Surface Temperature*. [Consulta: 10 diciembre 2022]. Disponible en: [https://land.copernicus.eu/global/products/lst#:~:text=The%20Land%20Surface%20Temperature%20\(LST,direction%20of%20the%20remote%20sensor](https://land.copernicus.eu/global/products/lst#:~:text=The%20Land%20Surface%20Temperature%20(LST,direction%20of%20the%20remote%20sensor).

como “superficie” desde la vista de un satélite a todo lo que se observa a través de la atmósfera hacia el suelo, ello puede ser el techo de una edificación, una carretera, el dosel forestal, suelo desnudo, un cuerpo de agua o una cobertura de nieve o hielo (elementos bióticos y abióticos)²⁵. Conviene subrayar que la temperatura de la superficie no es igual a la temperatura del aire.

Figura 10. Representación gráfica de la temperatura superficial terrestre en Hanoi, Vietnam 2003 - 2014



Fuente: TIEN NGUYEN, Thanh. *Land surface temperatures in 1996, 2007 and 2016. Landsat Time-series Images-based Urban Heat Island Analysis: The Effects of Changes in Vegetation and Built-up Land on Land Surface Temperature in Summer in the Hanoi Metropolitan Area, Vietnam*. Hanoi: 2020. p. 183. [Consultado: 15 diciembre 2022]. Disponible en: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/ennrj/article/view/239886/163570>

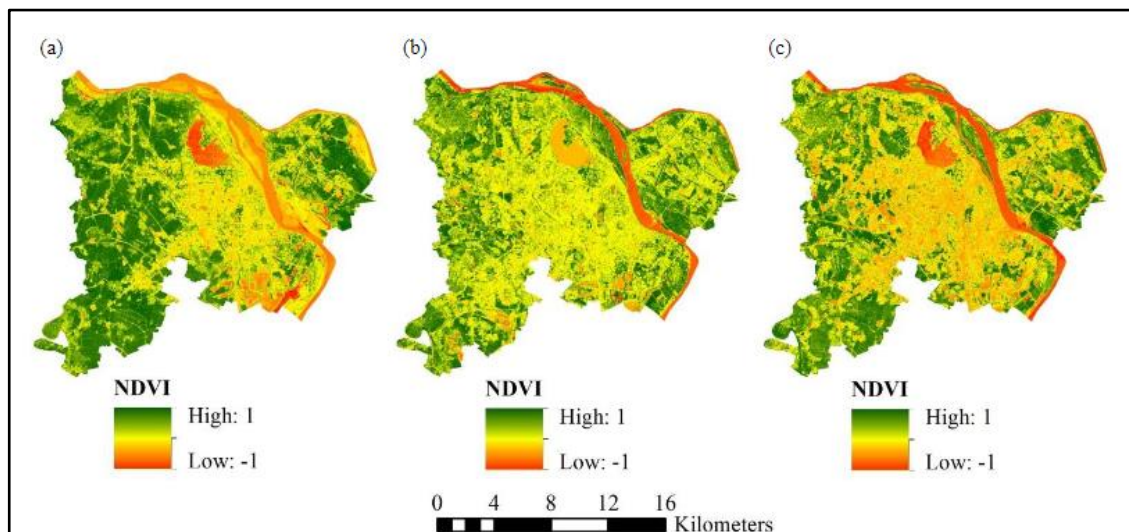
La siguiente variable permite reconocer la cobertura de la superficie del área de estudio:

4.2.2 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o NDVI (por sus siglas en inglés *Normalized Difference Vegetation Index*) permite reconocer la presencia de vegetación en la superficie terrestre (ver Figura 11), así como la caracterización de su distribución espacial. Este índice se calcula usando la reflectancia de las bandas rojo (RED) e infrarrojo cercano (NIR) del espectro y presenta un intervalo de valores que fluctúa entre -1 a +1, de tal manera que los valores positivos se interpretan como zonas con presencia de

²⁵ NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. [sitio web]. Washington D.C.: NASA, *Land Surface Temperature*. [Consulta: 10 diciembre 2022]. Disponible en: https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MOD_LSTD_M

vegetación, en contraste, los valores negativos corresponden a superficies sin vegetación tales como vapor de agua (nubes), suelo desnudo, edificado o cuerpos de agua²⁶.

Figura 11. Representación gráfica del NDVI en Hanoi, Vietnam 2003 - 2014



Fuente: TIEN NGUYEN, Thanh. *Land surface temperatures in 1996, 2007 and 2016. Landsat Time-series Images-based Urban Heat Island Analysis: The Effects of Changes in Vegetation and Built-up Land on Land Surface Temperature in Summer in the Hanoi Metropolitan Area, Vietnam*. Hanoi: 2020. p. 184. [Consultado: 15 diciembre 2022]. Disponible en: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/ennrj/article/view/239886/163570>

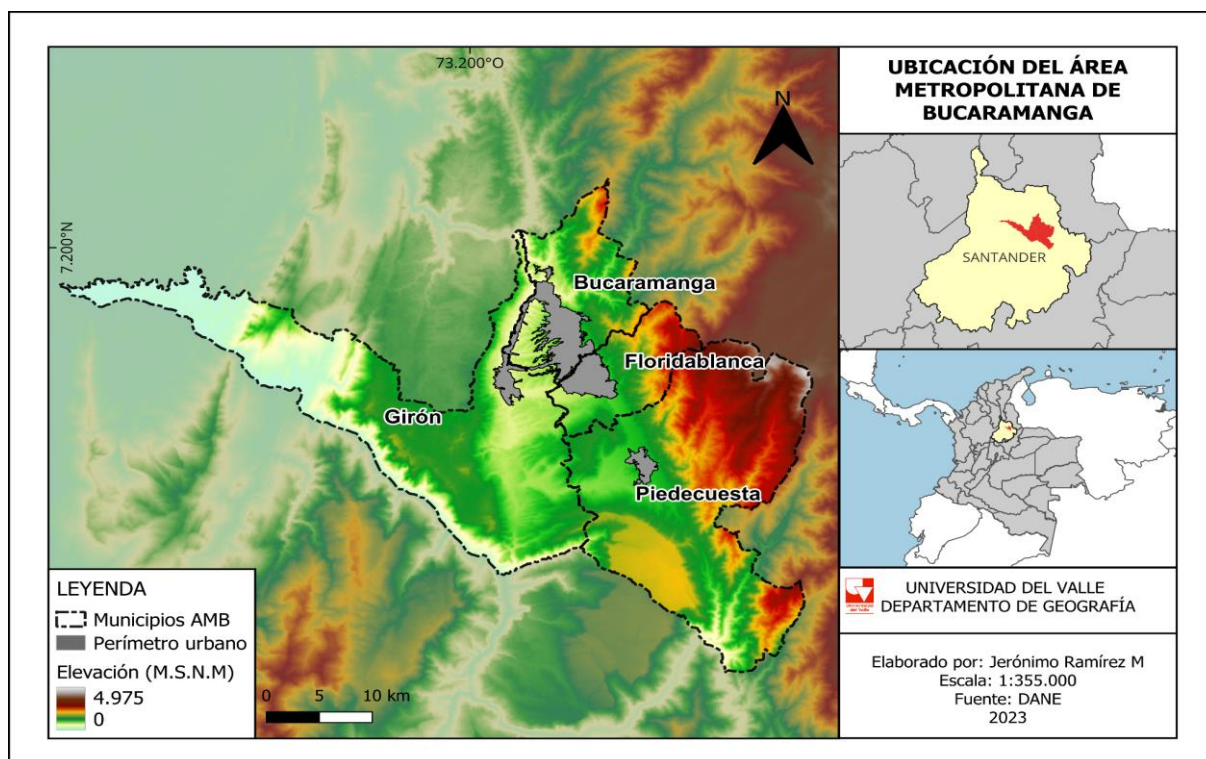
²⁶ PISCOYA PÉREZ, Lesly Rosario. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el distrito de Puquina, Moquegua [en línea]. Trabajo de grado. Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, 2019. 50 p. [Consulta: 12 diciembre 2022]. Disponible en: http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/bitstream/123456789/144/1/Piscoya_Lesly_Trabajo_Suficiencia_2019.pdf

5. ÁREA DE ESTUDIO

El Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) se encuentra localizada al noreste de Colombia y al este del departamento de Santander, sobre los 7°08' latitud norte y 73°08' longitud oeste. Está emplazada sobre el flanco occidental de la Cordillera Oriental, en la cuenca alta del río Lebrija y trazada por el cauce de los ríos de Oro, Suratá, Lebrija, Frío y Hato.

Está conformada por cuatro municipios: Bucaramanga (capital departamental), Floridablanca, Girón y Piedecuesta (ver Figura 12) y cuya superficie suma un total de 1.471 km²; asimismo, cuenta con una elevación entre los 777 m.s.n.m. y los 1.005 m.s.n.m., con una temperatura media anual de 23 °C y con una precipitación media anual de 1.303 mm distribuida en dos temporadas secas (diciembre-febrero y junio-agosto) y dos lluviosas (marzo-mayo y septiembre-noviembre)²⁷.

Figura 12. Ubicación geográfica del Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB)



Fuente: elaboración propia, con base en DANE, 2023

²⁷ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. [sitio web]. Bogotá: IDEAM, Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos [consulta: 11 octubre 2022]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc#:~:text=El%20promedio%20de%20lluvia%20durante%20el%20a%C3%B1o%20es%20de%201008%20mm.>

En particular, el AMB es una entidad administrativa, regida por la Ley 1625 de 2013, Ley Orgánica de las Áreas Metropolitanas, dotada de personería jurídica de derecho público, autonomía administrativa, patrimonio propio, autoridad y régimen administrativo y fiscal especial, creada el 15 de diciembre de 1981 mediante ordenanza N°. 020²⁸.

Los municipios del AMB, junto con Barrancabermeja y San Gil, son las aglomeraciones urbanas del departamento de Santander que ejercen un efecto de concentración de población debido a la centralización de los sectores de comercio y servicios, así como de entidades públicas²⁹. Como resultado, en esta área metropolitana habitan aproximadamente 1.160.243 habitantes (ver Tabla 3), según la proyección de población establecida para 2019³⁰, lo cual representa aproximadamente el 58 % del total de la población del departamento de Santander establecida en 2.008.841 habitantes para el año 2018³¹ y cuenta con una densidad poblacional de 11.634 habs/km²³². Adicionalmente, el 94,5% del total de habitantes reside en los cascos urbanos en 93,2 km², mientras que el 5,5% se encuentra disperso en zonas rurales en 1.377 km²³³.

²⁸ ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA. [sitio web]. Bucaramanga: AMB, Nuestra Área Metropolitana de Bucaramanga. [consulta: 12 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.amb.gov.co/nuestra-area/>

²⁹ ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA. Plan Integral de Desarrollo Metropolitano 2016 - 2026. [En línea]. Bucaramanga: AMB, 2016, p. 22. [consultado: 21 octubre 2022]. Disponible en: https://www.amb.gov.co/wp-content/uploads/plan_integral_de_desarrollo_metropolitano_2016_2026.pdf

³⁰ ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA. [sitio web]. Bucaramanga: AMB, Observatorio Metropolitano. [consulta: 14 octubre 2022]. Disponible en: <http://www.observatoriometropolitano.com.co:8080/Inicio/Index>

³¹ COLOMBIA. DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. [sitio web]. Bogotá: DANE, Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. [consulta: 21 octubre 2022]. Disponible en: <https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/sociedad/cnpv-2018/?lt=4.456007353293281&lg=-73.2781601239999&z=6>

³² COLOMBIA. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Atlas de la Aglomeración de Bucaramanga. Bogotá: Puntoaparte, 2018. p. 20.

³³ Ibid., p.21.

Tabla 3. Población en el AMB año 2019

Municipio	Habitantes		Área (km²)	Porcentaje (%)
	Urbano	Rural		
Bucaramanga	522.353	6.257	165	45,5
Floridablanca	258.390	9.148	97	23
Girón	180.644	20.089	864	17,3
Piedecuesta	134.608	28.754	345	14,2
Total AMB	1.160.243		1.471	100

Fuente: elaboración propia, con base en Observatorio Metropolitano de Bucaramanga, 2022

6. ESTADO DEL ARTE

Para el desarrollo del presente estudio se compilaron investigaciones llevadas a cabo en los últimos 14 años en lo concerniente a las ICU y relacionadas con estas, principalmente con análisis multitemporales y en comparación con índices ambientales para identificar el desarrollo, transformaciones y metodologías aplicadas. En ese sentido, estas se han categorizado a escala global, nacional y departamental.

A nivel global, en 2012, Sundara Kumar, K, *et al.*³⁴, documentaron en la publicación titulada *Estimation of land surface temperature to study urban heat island effect using Landsat ETM+ image* el estudio de las ICU en la ciudad de Vijayawada, India, al calcular la temperatura superficial terrestre mediante una imagen satelital Landsat 7 ETM+ adquirida el 5 de octubre del 2001. Asimismo, se calculó el NDVI para mostrar la correlación con la temperatura superficial. En consecuencia, se halló que la temperatura superficial en el área urbana de Vijayawada era más alta que la registrada en la zona rural circundante; además de poseer una correlación negativa fuerte con el NDVI.

Por otra parte, en 2017, Ranagalaje, *et al.*³⁵, realizaron un estudio multitemporal en el área metropolitana de Colombo, Sri Lanka, aplicado en el periodo 1997 - 2017; en su metodología emplearon 3 imágenes satelitales Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI/TIRS para realizar el cálculo de la temperatura superficial terrestre y de los indicadores NDVI y el Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI), los cuales se relacionaron con el registro de la temperatura superficial. Finalmente, se concluyó que existe una expansión e intensificación de las ICU en Colombo durante el periodo evaluado, el cual fue el de mayor urbanización en esta ciudad asiática. También, se halló que la correlación entre la temperatura superficial y NDBI fue positiva fuerte.

Además, en América existe una variedad de investigaciones que abordan esta temática. Por ejemplo, en Perú, Soberón y Obregón³⁶ realizaron en 2014 la

³⁴ SUNDARA KUMAR, K, *et al.* *Estimation of Land Surface Temperature to Study Urban Heat Island Effect Using Landsat ETM+ Image*. International Journal of Engineering Science and Technology [en línea]. 2012, febrero, 4 (2). 771 - 778. [Consultado 4 marzo 2024]. ISSN: 0975-5462

³⁵ RANAGALAJE, M, *et al.* *An Urban Heat Island Study of the Colombo Metropolitan Area, Sri Lanka, Based on Landsat Data (1997–2017)*. International Journal of Geo-Information [en línea]. 2017, 6 (7). 189 . [Consultado 4 marzo 2024]. DOI: 10.3390/ijgi6070189

³⁶ SOBERÓN FORSBERG, Vanessa y OBREGÓN PÁRRAGA, Esaúl. Identificación de islas de calor en la ciudad de Lima Metropolitana utilizando imágenes del Satélite Landsat 5TM. Anales Científicos

identificación de las ICU en la ciudad de Lima, a través de imágenes Landsat 5 TM en el periodo 2008 - 2011. Como resultado, se evidenció que la ciudad presentó menor temperatura superficial en las zonas próximas a la línea costera, en comparación con las zonas periféricas más tórridas y con presencia de las ICU.

A nivel nacional, en 2020, Orozco Arquez³⁷, en su investigación titulada “Análisis del fenómeno de islas de calor con sensores remotos y estaciones climáticas en Bogotá, Colombia”, empleó el uso de imágenes satelitales MODIS, así como registros históricos de estaciones climáticas de la ciudad en el periodo 2002 - 2020. Los resultados de la investigación evidenciaron que las temperaturas entre el núcleo urbano, la periferia urbana y el anillo rural más cercano se han hecho más similares entre sí, lo que implica un crecimiento de la isla de calor urbana en el periodo evaluado.

En el departamento del Valle del Cauca, Santana, Escobar y Capote³⁸, realizaron en 2010 la propuesta de un modelo para obtener un índice de calidad ambiental en Santiago de Cali por medio del uso de una imagen satelital Landsat 7 ETM+ de enero de 2003, en donde obtuvieron 5 índices entre los que se encuentra la temperatura de superficie, NDVI, Índice de Humedad en las Hojas (LWCI), Índice de Suelos Normalizado (NSI) y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI). En consecuencia, los resultados demostraron que los barrios que necesitan una mayor intervención para mejorar la calidad ambiental presentaban temperaturas superficiales promedio mayores a 30 °C, con una proporción de suelo desnudo y un uso de suelo comercial - habitacional, industrial y barrios habitacionales con alta densidad de construcciones y con población de escasos recursos económicos.

Por otro lado, en 2015, CVC, CIAT y DAGMA³⁹ realizaron la identificación de las ICU en Santiago de Cali a partir de la temperatura superficial promedio de la ciudad junto

[en línea]. 2015, enero - junio, 77 (1). 34 - 44. [Consultado 4 marzo 2024]. ISSN 2519-7398. DOI: 10.21704/ac.v77i1.475

³⁷ OROZCO ARQUEZ, Luz Angela. Análisis del fenómeno de islas de calor con sensores remotos y estaciones climáticas en Bogotá, Colombia [en línea]. Trabajo de grado. Universidad del Norte, 2020. 52 p. [Consultado 5 marzo 2024]. Disponible en: <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/9469#page=1>

³⁸ SANTANA RODRÍGUEZ, Luis Marino; ESCOBAR JARAMILLO, Luis Alfonso y CAPOTE, Paolo Andrés. Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. Revista de geografía Norte Grande [en línea]. 2010, mayo, 45. 77 - 95. [Consultado 7 marzo 2024]. DOI: 10.4067/S0718-34022010000100006

³⁹ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA; CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL Y DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE. Identificación de Zonas y Formulación de Propuestas para el Tratamiento de Islas de Calor

con los indicadores NDVI, Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) y NDBI, los cuales fueron calculados mediante el uso de una imagen satelital Landsat 8 OLI/TIRS de junio de 2015. Como resultado, se evidenció que las zonas del centro y oriente de la ciudad presentaban las temperaturas superficiales más elevadas, dando lugar a las ICU, en condiciones de baja cantidad de vegetación, baja humedad del suelo y vegetación y alta concentración de área construida.

En la misma área de estudio, en 2011, Aldana y Preciado⁴⁰ utilizaron imágenes satelitales Landsat 4 TM y Landsat 7 ETM+ en el análisis de la relación entre la temperatura superficial terrestre y los indicadores ambientales NDVI, NDWI y NDBI en Santiago de Cali dentro del periodo 1989 - 2001. Esta investigación identificó la presencia de varias ICU en la zona central del área urbana, en donde se emplaza la zona industrial municipal, y se concluyó que los cambios en la cobertura del suelo generan un aumento de la temperatura superficial.

De forma semejante, Fernández y García⁴¹ realizaron en 2013 la caracterización de las islas frescas urbanas (IFU) en Santiago de Cali dentro del periodo 1999 - 2011 a partir de imágenes Landsat 5 TM, en ese sentido, utilizaron como variables la temperatura superficial y los indicadores NDVI, NDWI y NDBI. En consecuencia, se halló que las zonas identificadas como IFU eran áreas con temperaturas inferiores a 26°C, con buena proporción de vegetación, con alto contenido de humedad y con baja densidad de área construida.

Sin embargo, en el departamento de Santander las ICU han sido un tema recién documentado en la investigación, y a mediados de la década de 2010 se generaron las primeras investigaciones sobre ello. En primer lugar, para el año 2014, Barrero y Flórez⁴² publicaron el trabajo de grado titulado “Identificación y caracterización del

Municipio de Santiago de Cali. [En línea]. Santiago de Cali: CVC; CIAT y DAGMA, 2015. [Citado el 7 de marzo de 2024]. Disponible en: http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/biblioteca/IDENTIFICACION_DE_ZONAS_Y_FORMULACION_DE_PROPUUESTAS_PARA_EL_TRATAMIENTO_DE_ISLAS_DE_CALOR-SANTIAGO_DE_CALI.pdf

⁴⁰ ALDANA OLAVE, Armando y PRECIADO VARGAS, Mónica. Análisis de presencia de islas de calor en Santiago de Cali empleando técnicas de teledetección. Ventana Informática [en línea]. 2011, enero - junio, 24. 95 - 114. [Consultado 10 marzo 2024]. ISSN 0123-9678. DOI: 10.30554/ventanainform.24.162.2011

⁴¹ FERNÁNDEZ CÓRDOBA, Jhonattan y GARCÍA MILLÁN, Nathalie. Caracterización de islas frescas urbanas -IFU- en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia. Entorno Geográfico [en línea]. 2013, enero - diciembre, 9. 122 - 144. [Consultado 13 marzo 2024]. ISSN 2382-3518. DOI: 10.25100/eg

⁴² BARRERO RAMÍREZ, María Estefanía y FLOREZ RODRÍGUEZ, Nataly Stefany. Identificación y caracterización del efecto isla de calor en la ciudad de Bucaramanga, Santander, y su incidencia en el confort térmico [en línea]. Trabajo de grado. Universidad de La Salle, 2014. 246 p.[Consultado 10 enero

efecto isla de calor en la ciudad de Bucaramanga, Santander, y su incidencia en el confort térmico” donde se analiza el comportamiento de la temperatura en función del tiempo y el espacio de 7 estaciones climatológicas. Asimismo, las autoras establecieron un índice de confort térmico en relación con la temperatura, humedad relativa, y velocidad del viento. Por consiguiente, después del procesamiento de los datos, se identificó la formación de dos ICU preponderantes en la ciudad, una de ellas en el norte y otra en el oeste de Bucaramanga; de igual modo, es importante aclarar que en esta investigación solo se tuvo en cuenta al municipio de Bucaramanga.

En esa misma línea, los autores Villamil-Almeida, *et al.*⁴³, publicaron en 2020 un artículo científico titulado “Caracterización de la isla de calor urbana en Bucaramanga, Colombia, monitoreando temperatura en tiempo real” donde *grosso modo* utilizan una red de medición de temperatura en tiempo real, compuesta por siete nodos utilizados para obtener valores de temperatura cada minuto durante 89 días en los meses de mayo a agosto de 2018. Como resultado, esta investigación concluye que la ICU en Bucaramanga varía dependiendo de la zona climática local, así como la intensidad uniforme de la ICU durante la noche.

En 2023, Gualdrón Díaz⁴⁴ realizó la identificación de las ICU en el municipio de Bucaramanga a partir de imágenes satelitales Landsat 8 OLI/TIRS de los años 2015 y 2020, con el uso de variables de temperatura superficial y NDVI. En consecuencia, en la investigación se halló que las ICU en la ciudad se presentan en un patrón norte - sur, desde la comuna Norte hasta las comunas Lagos del Cacique, La Pedregosa, Provenza y Sur, con temperaturas superficiales superiores a 28°C.

En conclusión, en la literatura disponible y pertinente a este tema de investigación se encontró que su documentación es destacable; la metodología empleada para su estudio ha sido principalmente mediante el uso y tratamiento de imágenes satelitales MODIS y Landsat TM, ETM+ y OLI/TIRS, así como a través de datos de la temperatura

2023]. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1910&context=ing_ambiental_sanitaria

⁴³ VILLAMIL ALMEIDA, Hildreth, *et al.* *Characterization of the urban heat island at Bucaramanga, Colombia, using real-time temperature monitoring*. Redin: Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia [en línea]. 2020, octubre - diciembre, 97. 10 - 21. [Consultado: 13 enero 2023]. ISSN 0120-6230. DOI:10.17533/udea.redin.20191260.

⁴⁴ GUALDRÓN DÍAZ, Luz Adriana. *Análisis de Islas de Calor Urbanas mediante imágenes satelitales e información georreferenciada en la ciudad de Bucaramanga, su materialidad y recomendaciones* [en línea]. Trabajo de grado. Universidad Santo Tomás, 2023. 163 p. [Consultado 13 marzo 2024]. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/48514>

del aire; las investigaciones realizadas han identificado ICU en distintas ciudades a nivel global, nacional y departamental, cuya variación e intensidad depende de diversos factores, entre los que se encuentran las superficies edificadas o descubiertas, esencialmente. Sin embargo, a escala del departamento de Santander se ha documentado poco al respecto y en la literatura disponible se halló que solo se limita al estudio del municipio de Bucaramanga sin tener en cuenta al resto de municipios que conforman el AMB.

7. METODOLOGÍA

7.1 TIPO DE ESTUDIO

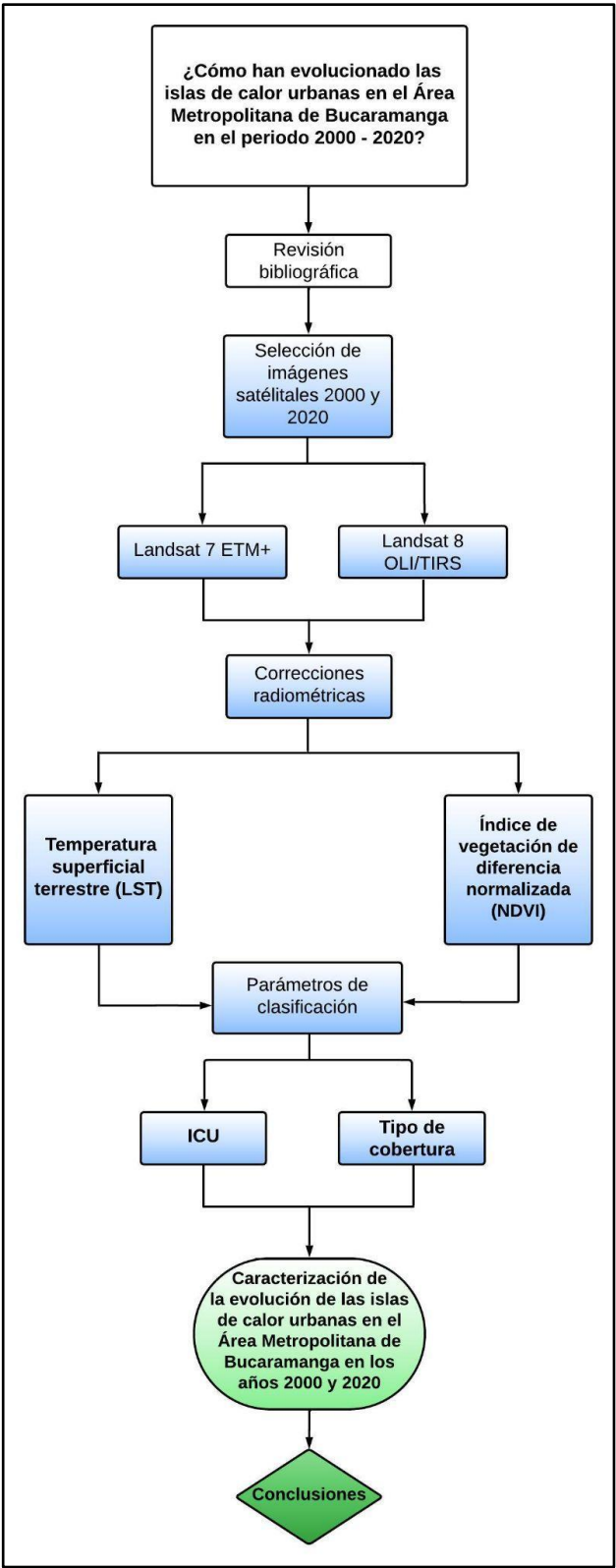
Con base en el objetivo general y en los objetivos específicos formulados, se asevera que el tipo de estudio de esta investigación está enmarcado dentro de un alcance descriptivo. De este modo, se entiende como un estudio descriptivo a todo aquel que busca especificar las principales propiedades de cualquier fenómeno que sea puesto en análisis⁴⁵. “Con los estudios descriptivos se busca especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. Es decir, únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren”⁴⁶.

En ese sentido, para la presente investigación se realizó una adecuada búsqueda bibliográfica, específicamente dentro de fuentes de consulta confiables como libros, revistas científicas, páginas web de instituciones internacionales y bibliotecas digitales. Una vez realizada la consulta bibliográfica, se identificaron cuidadosamente las metodologías utilizadas en el cálculo de las variables. Por consiguiente, se procedió a la selección de dos imágenes satelitales, una imagen Landsat 7 ETM+ del año 2000 y otra imagen Landsat 8 OLI/TIRS del año 2020; una vez seleccionadas, fueron sometidas a las correcciones radiométricas correspondientes para el cálculo de las variables de LST y de NDVI. Finalmente, con base en los parámetros de clasificación, se identificaron y clasificaron las ICU y el tipo de cobertura, lo que permitió realizar la caracterización de la evolución de las islas de calor urbanas en el área de estudio dentro del periodo evaluado. A continuación, se presenta en la Figura 13 la metodología diseñada para esta investigación:

⁴⁵ DANKHE, 1986, citado por HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, Pilar. Metodología de la investigación. 2a. ed. México: McGraw-Hill, 2000. p. 60

⁴⁶ HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, Pilar. Metodología de la investigación. 2a. ed. México: McGraw-Hill, 2000. p. 92

Figura 13. Diseño metodológico



Fuente: elaboración propia

7.2 SELECCIÓN DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 7 ETM+ Y LANDSAT 8 OLI/TIRS

Para la presente investigación, se utilizaron dos imágenes satelitales de los sensores Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI/TIRS concernientes al área de estudio, las cuales fueron obtenidas a través del servidor *Earth Explorer* del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés); asimismo, se tuvo en cuenta que las imágenes presentaran una buena calidad en cuanto a la presencia de nubosidad en el área de estudio.

La imagen correspondiente a Landsat 7 ETM+ (lanzado al espacio el 15 de abril de 1999) fue adquirida el 13 de febrero del 2000 y presenta un total de 8 bandas espectrales con una resolución espacial de 30 m para las bandas multiespectrales (1 a 5 y 7); 15 m para la banda pancromática (8) y 60 m para la banda térmica (6), pero remuestreada a 30 m. Mientras que la imagen obtenida de Landsat 8 OLI/TIRS (lanzado al espacio el 11 de febrero del 2013) fue adquirida el 3 de febrero del 2020 y posee un total de 11 bandas espectrales con una resolución espacial de 30 m para las bandas multiespectrales (1 a 7 y 9); 15 m para la banda pancromática (8) y 100 m para las bandas térmicas (10 y 11) pero remuestreadas a 30 m.

El procesamiento digital de las imágenes satelitales se realizó con el software ArcGIS en su versión 10.5 y se utilizó como cartografía base la propuesta en los Planes de Ordenamiento Territorial, Planes Básicos de Ordenamiento Territorial y alcaldías según cada municipio metropolitano. A continuación, se presentan en la Tabla 4 las principales características de las imágenes satelitales escogidas:

Tabla 4. Características de las imágenes satelitales elegidas

N°de imagen	Satélite	Fecha (DD/MM/AA)	Hora de toma (UTC)	Path	Row	Datum
1	Landsat 7 ETM+	13/02/2000	14:58	007	055	WGS84
2	Landsat 8 OLI/TIRS	03/02/2020	15:11	008	055	

Fuente: Elaboración propia, con base en Earth Explorer, 2022

7.3 TRATAMIENTO DE LAS IMÁGENES LANDSAT 7 ETM + Y LANDSAT 8 OLI / TIRS

Para este paso, en primer lugar, se realizó el recorte de las imágenes sobre el área urbana del AMB. No se aplicaron correcciones geométricas ni atmosféricas, debido a que las imágenes se encontraban georreferenciadas y fueron adquiridas bajo buenas condiciones atmosféricas. Por consiguiente, solo se realizó la conversión de los niveles digitales de las bandas térmicas a valores de radiancia y de las bandas multiespectrales a valores de reflectividad.

Con la ecuación 1⁴⁷ y la ecuación 2⁴⁸ se realizó la conversión a valores de radiancia para las bandas térmicas de Landsat 7 ETM + (banda 6) y de Landsat 8 OLI/TIRS (banda 10) respectivamente.

Ecuación 1

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{QCAL_{max} - QCAL_{min}} \right) * (QCAL - QCAL_{min}) + L_{min\lambda}$$

Donde:

L_{λ} : Radiancia espectral en la apertura del sensor en (Watts/(m² * sr * μm)).

$L_{max\lambda}$: Radiancia espectral escalada a $QCAL_{max}$ en (Vatios/(m² * sr * μm)) (Metadatos de la imagen)

$L_{min\lambda}$: Radiancia espectral escalada a $QCAL_{min}$ en (Vatios/(m² * sr * μm)) (Metadatos de la imagen)

$QCAL_{max}$: Valor máximo de píxel calibrado cuantificado (correspondiente a $L_{max\lambda}$) en ND (Metadatos de la imagen)

$QCAL_{min}$: Valor mínimo de píxel calibrado cuantificado (correspondiente a $L_{min\lambda}$) en ND (Metadatos de la imagen)

$QCAL$: Valor de píxel calibrado cuantificado en ND

⁴⁷ UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. *Landsat 7 (L7) Data Users Handbook*. [En línea]. Versión 2.0. Sioux Falls: USGS, 2019. p. 78. [Consulta: 30 abril 2023]. Disponible en: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-7-data-users-handbook>

⁴⁸ UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*. [En línea]. Versión 3.0. Sioux Falls: USGS, 2019. p. 54. [Consulta: 5 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>

Ecuación 2

$$L\lambda = ML * Qcal + AL$$

Donde:

$L\lambda$: Radiancia espectral ($W/(m^2 * sr * \mu m)$)

ML : Factor de escala multiplicativo de radiancia (Metadatos de la imagen)

$Qcal$: Valor de píxel de nivel 1 en ND

AL : Factor de escala aditivo de radiancia (Metadatos de la imagen)

Con la ecuación 3⁴⁹ y la ecuación 4⁵⁰ se realizó la conversión a valores de reflectividad de las bandas multiespectrales de Landsat 7 ETM+ (bandas 3 y 4) y de Landsat 8 OLI/TIRS (bandas 4 y 5) respectivamente.

Ecuación 3

$$\rho\rho = \frac{\pi * L\lambda * d^2}{ESUN\lambda * \cos\theta_s}$$

Donde:

$\rho\rho$: Reflectancia planetaria

π : Constante matemática con valor aproximado de 3.14159

$L\lambda$: Radiancia espectral en la apertura del sensor

d : Distancia Tierra - Sol en unidades astronómicas

$ESUN$: Irradiancia solar exoatmosférica

θ_s : Ángulo cenital solar en grados

Ecuación 4

$$\rho\lambda' = M\rho * Qcal + A\rho$$

Donde:

$\rho\lambda'$: Reflectancia espacial planetaria

$M\rho$: Factor de escala multiplicativo de reflectancia

$Qcal$: Valor de píxel de nivel 1 en DN

$A\rho$: Factor de escala aditivo de reflectancia

⁴⁹ UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, Landsat 7 (L7) Data Users Handbook, Op., Cit., p. 79.

⁵⁰ UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, Landsat 8 (L8) Data Users Handbook, Op., Cit., p. 54.

7.4 CÁLCULO DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL TERRESTRE (LST)

Para el cálculo de la temperatura superficial terrestre se tuvieron en cuenta las siguientes ecuaciones⁵¹:

En primer lugar, la ecuación 5 permitió calcular la temperatura de brillo superficial.

Ecuación 5

$$T = \frac{K2}{\ln \left(\left(\frac{K1}{L\lambda} \right) + 1 \right)}$$

Donde:

T : Temperatura de brillo superficial

$L\lambda$: Radiancia espectral

$K1$: Constante de calibración 1

$K2$: Constante de calibración 2

Por otra parte, se halló el cálculo de fracción de vegetación mediante la ecuación 6.

Ecuación 6

$$fv = 1 - \left(\frac{NDVImax - NDVI}{NDVImax - NDVImin} \right)^a$$

Donde:

fv : Fracción de vegetación

a : Valor de la orientación de la hoja de la planta; correspondiente a 0,6

$NDVImin$: Valor mínimo de NDVI

$NDVImax$: Valor máximo de NDVI

En relación con lo anterior, se aplicó la ecuación 7 para la determinación de la emisividad de la superficie terrestre.

Ecuación 7

$$\varepsilon = fv * \varepsilon v + (1 - fv) * \varepsilon s$$

Donde:

⁵¹ SANTANA; ESCOBAR y CAPOTE, Op., Cit., p. 81.

ε : Emisividad de la superficie terrestre

ε_v : Emisividad de la vegetación (0,985)

ε_s : Emisividad del suelo (0,978)

f_v : Fracción de vegetación

Finalmente, con base en los cálculos anteriores, se obtuvo la LST en grados centígrados mediante la ecuación 8.

Ecuación 8

$$Ts = \frac{T}{1} + \left(\lambda * \frac{T}{\rho} \right) * \ln \varepsilon - 273$$

Donde:

T_s : temperatura de la superficie

T : Temperatura de brillo del satélite

λ : Longitud de onda de la banda térmica

ρ : $h*c/\sigma$, ($1,438 * 10^{-2}$ mK), donde:

h : Constante de Planck ($6,626 * 10^{-34}$ Js)

c : Velocidad de la luz ($2,998 * 10^8$ m/s)

σ : Constante de Boltzmann ($1,38 * 10^{-23}$ J/K)

ε : Emisividad de la superficie terrestre

7.5 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)

La ecuación 9 permitió obtener el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)⁵²:

Ecuación 9

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

Donde:

NIR: Infrarrojo visible

RED: Rojo visible

⁵² Ibid., p. 82.

7.6 PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN

En este apartado se definieron los parámetros que permitieron identificar y clasificar las ICU a partir de LST y el tipo de cobertura a partir de NDVI.

7.6.1 ICU. En la presente investigación, se realizó la identificación de las ICU a partir de la LST urbana metropolitano promedio calculada para el año 2000, de acuerdo con la metodología propuesta en el estudio titulado “Identificación de Zonas y Formulación de Propuestas para el Tratamiento de Islas de Calor Municipio Santiago de Cali”⁵³, y sus intensidades se clasificaron con base en las categorías sugeridas por Fernández García (1996)⁵⁴ y presentadas en la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de intensidad de ICU

Clasificación	Temperatura (°C)
Débil	Hasta 2
Moderada	2 a 4
Fuerte	4 a 6
Muy fuerte	> 6

Fuente: elaboración propia, con base en Fernández García, 1996

7.6.2 Tipo de cobertura. En este estudio se tomó como base el NDVI calculado para las áreas urbanas de los municipios del AMB para representar el tipo de cobertura. De esta manera, de acuerdo con las clasificaciones por tipo de cobertura establecidas por

⁵³ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA; CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL Y DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE, Op., Cit., p. 7.

⁵⁴ FERNANDEZ, Felipe. Manual de climatología aplicada. clima, medio ambiente y planificación. 1996, citado por CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA; CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL Y DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE. Identificación de Zonas y Formulación de Propuestas para el Tratamiento de Islas de Calor Municipio Santiago de Cali. Santiago de Cali, 2015. p. 6.

Chen, *et al.*⁵⁵, Uddin, *et al.*⁵⁶ y de Andrés⁵⁷, se identificó y clasificó el tipo de cobertura en el área de estudio. Es de importancia subrayar que el indicador NDVI varía en un rango de -1 a 1 y cuyos valores representan los tipos de coberturas en la superficie, como vegetación, agua, área edificada o descubierta, según lo expuesto en la Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación por tipo de cobertura

Descripción	NDVI
Vegetación sana y densa	>0,5
Vegetación media	0,2 - 0,5
Zonas edificadas - descubiertas	0 - 0,2
Agua	<0

Fuente: elaboración propia, con base en Chen, *et al.*, 2006; Uddin *et al.*, 2010 y De Andrés, 2019

⁵⁵ CHEN, Xiao-Ling, *et al.* *Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes*. *Remote Sensing of Environment* [en línea]. 2006, 104 (2). 133 - 146. [Consultado 16 junio 2023]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.016>

⁵⁶ UDDIN, A, *et al.* *A remote sensing classification for land-cover changes and micro-climate in Kuwait*. *International Journal of Sustainable Development and Planning* [en línea]. 2010, 19 (6). 367 - 377. [Consultado 18 junio 2023]. DOI: 10.2495/SDP-V5-N4-367-377

⁵⁷ DE ANDRÉS ANAYA, Paula. *Temperatura superficial terrestre a partir de imágenes satelitales: herramienta para su cálculo* [en línea]. Trabajo de grado. Escuela Politécnica Superior de Ávila, 2019. 185 p. [Consultado 25 junio 2023]. Disponible en: <https://gredos.usal.es/handle/10366/139879>

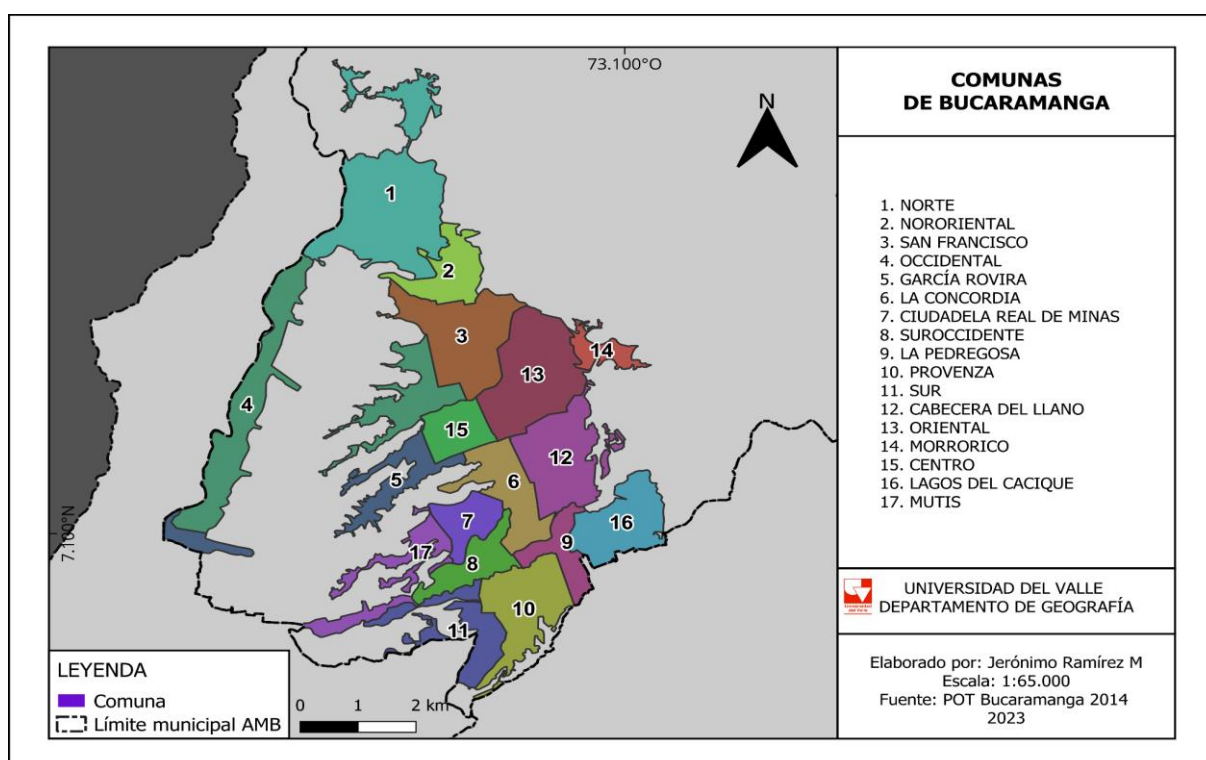
8. RESULTADOS

Enseguida, se presentan los resultados obtenidos para cada municipio del AMB dentro del periodo 2000 - 2020.

8.1 BUCARAMANGA

Los resultados obtenidos para Bucaramanga se presentarán a escala de comuna. Según el POT 2014, la cabecera municipal de Bucaramanga se encuentra dividida en 17 comunas expuestas en la Figura 14.

Figura 14. División política urbana de Bucaramanga



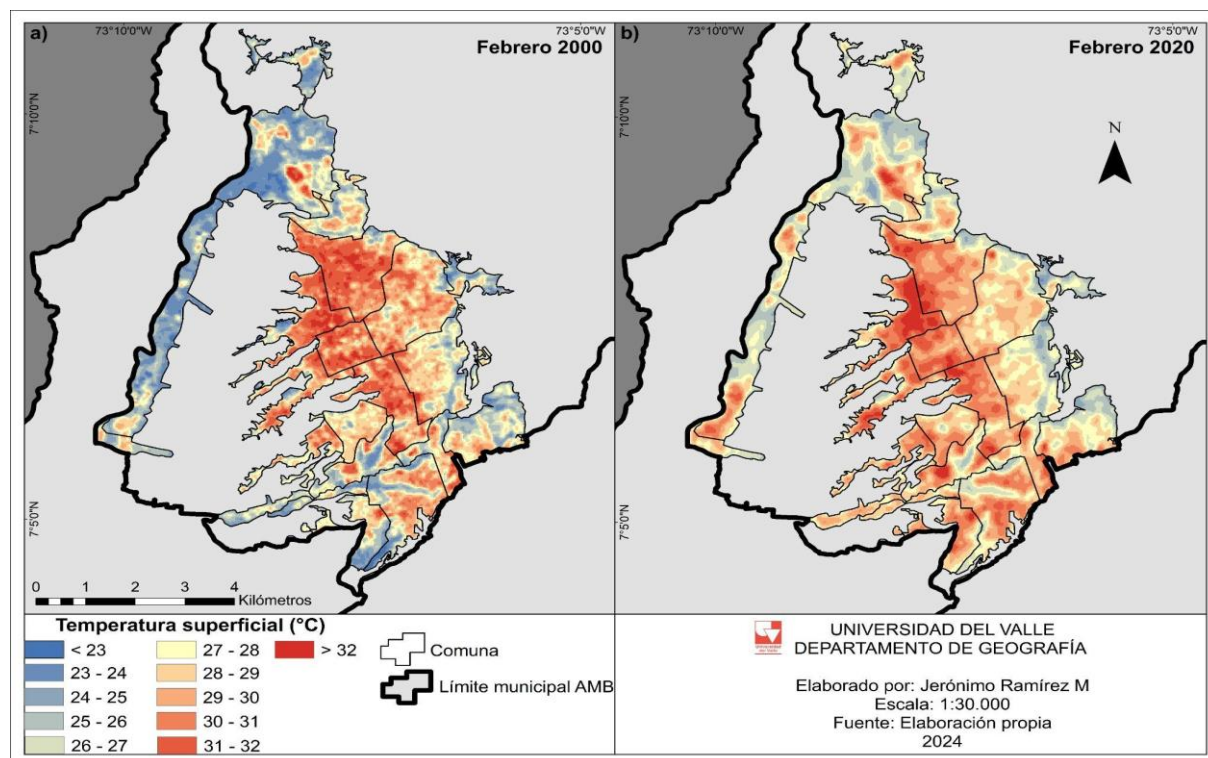
Fuente: elaboración propia, con base en POT Bucaramanga 2014

A continuación, se presenta la descripción de los resultados más relevantes para los indicadores del municipio:

8.1.1 LST. En Bucaramanga, se encontró que para el año 2000 las temperaturas superiores a la media metropolitana (27,1°C) se presentaron principalmente en un patrón espacial general norte-sur, el cual inicia en el sur de la comuna Norte y finaliza entre las comunas La Pedregosa y Provenza. La mayor concentración de estas temperaturas se presentó en las comunas Centro, Ciudadela Real de Minas, García

Rovira, La Concordia, Mutis, Oriental, San Francisco y en gran parte de las comunas Cabecera del Llano, Nororiental, La Pedregosa, Occidental y Provenza (ver Figura 15a).

Figura 15. LST de Bucaramanga en los años 2000 - 2020

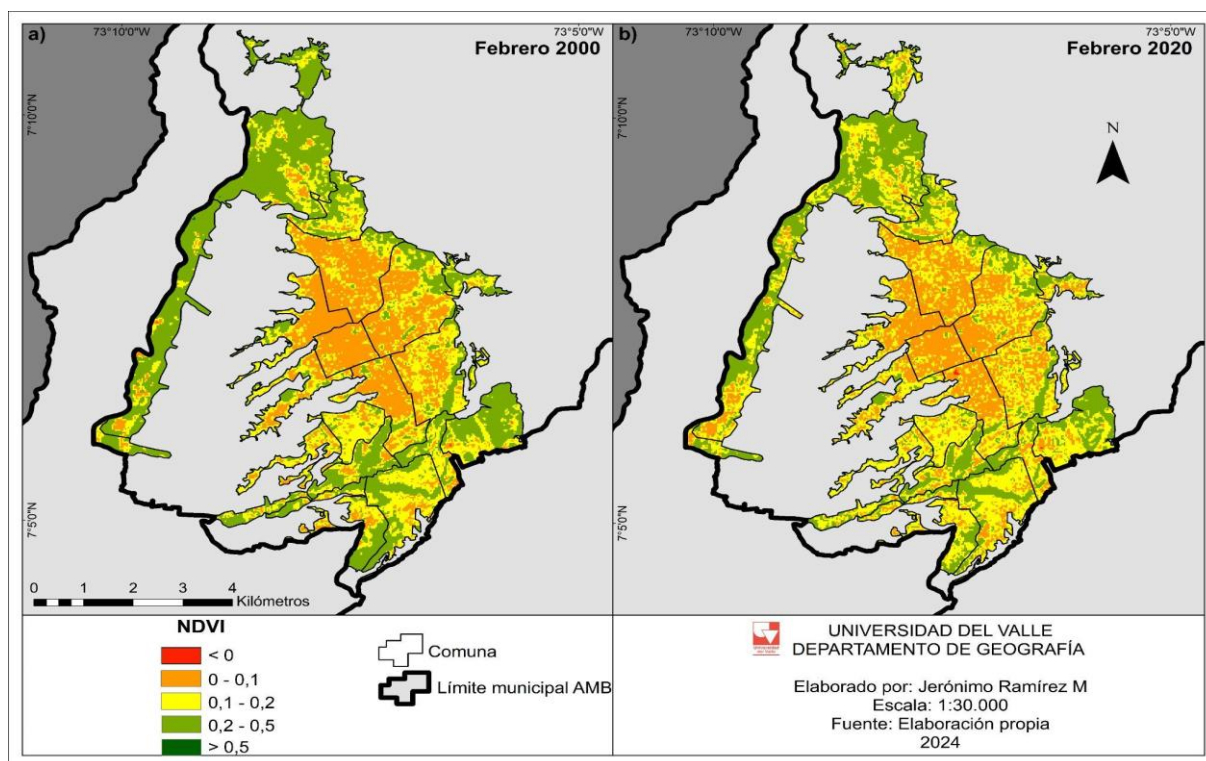


Fuente: elaboración propia

Posteriormente, para el año 2020, el patrón norte-sur perdura con temperaturas superiores a 27,1°C y en las mismas comunas mencionadas para el primer año. Sin embargo, es evidente su extensión sobre las comunas: García Rovira, La Pedregosa, Lagos del Cacique, Mutis, Norte, Occidental, Provenza, Sur y Suroccidente. Asimismo, se aprecia una reducción de las temperaturas inferiores a 23°C (ver Figura 15b). En consecuencia, la temperatura superficial aumentó 0,8°C en el área urbana dentro del periodo evaluado.

8.1.2 NDVI. Para el año 2000, y de acuerdo con lo planteado en los parámetros, se encontró que las superficies edificadas - descubiertas (0 - 0,2) se hallaban presentes en un patrón espacial general norte-sur, el cual inicia al sur de la comuna Norte y termina en las comunas La Pedregosa y Provenza. De esta manera, las comunas con mayor proporción de este tipo de cobertura fueron: Cabecera del Llano, Centro, Ciudadela Real de Minas, La Concordia, Mutis, Oriental, San Francisco y, en parte, las comunas La Pedregosa, Nororiental, Provenza y Occidental (ver Figura 16a).

Figura 16. NDVI de Bucaramanga en los años 2000 - 2020



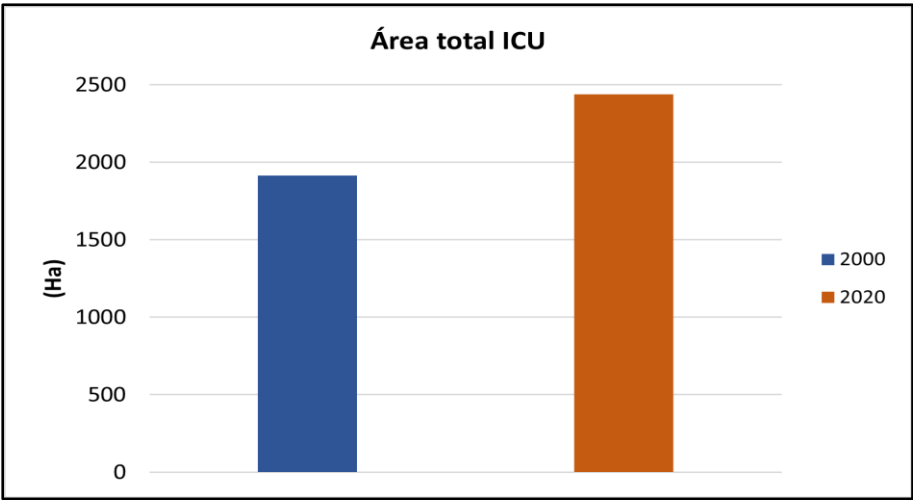
Fuente: elaboración propia

Después, en el año 2020, el patrón norte-sur permanece sobre las mismas comunas mencionadas para el año 2000, aunque se halla un avance aproximado de 17,2% de coberturas edificadas - descubiertas principalmente en las comunas: García Rovira, La Pedregosa, Lagos del Cacique, Mutis, Norte, Occidental, Provenza, Sur y Suroccidente (ver Figura 16b).

8.1.3 Caracterización multitemporal ICU. Como producto de la clasificación de los indicadores expuestos, se realiza a continuación la caracterización de las ICU de Bucaramanga en el periodo evaluado.

De acuerdo con lo anterior, en el año 2000 se halló un área total ICU aproximada de 1.913,7 ha (ver Gráfico 1). El fenómeno se presentó principalmente en un patrón espacial general norte-sur, el cual inicia al sur de la comuna Norte y finaliza en las comunas La Pedregosa y Provenza. Las ICU se presentaron en las comunas Centro, Ciudadela Real de Minas, García Rovira, La Concordia, Mutis, Oriental, San Francisco y en gran parte de las comunas Cabecera del Llano, Nororiental, La Pedregosa, Occidental y Provenza (ver Figura 17a). Asimismo, este fenómeno se presentó sobre un tipo de cobertura edificada - descubierta (ver Figura 18a).

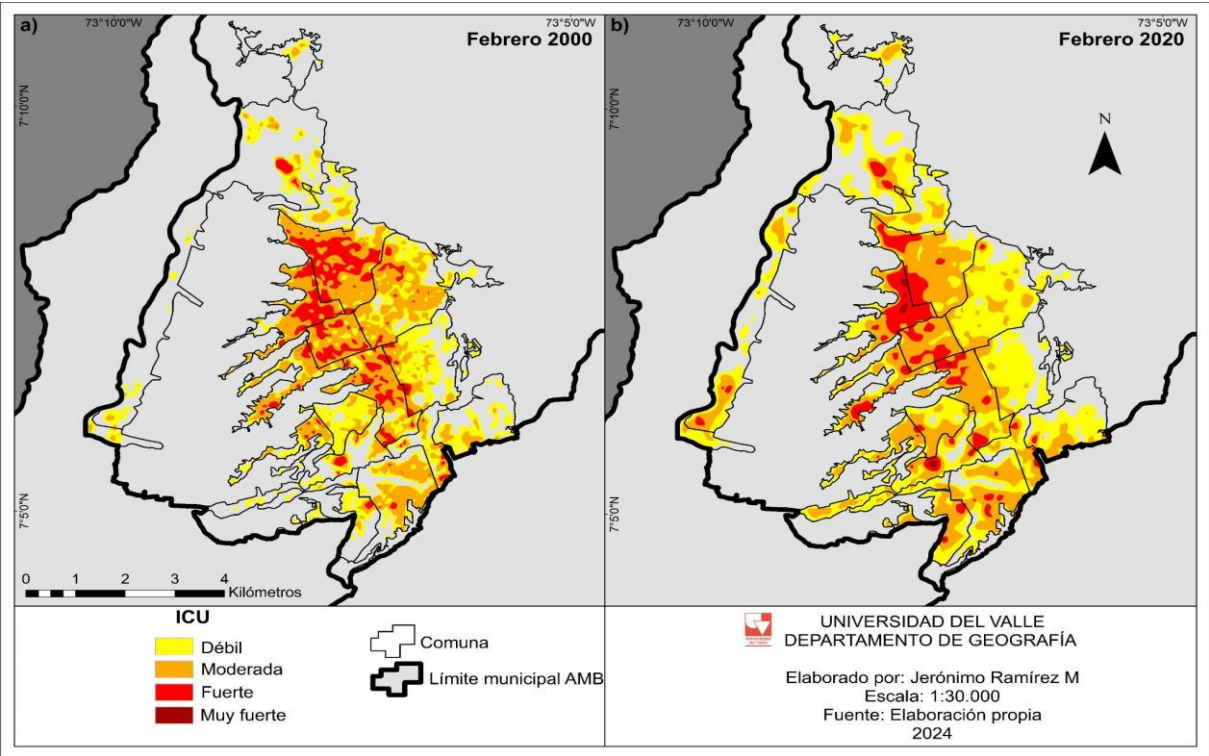
Gráfico 1. Área total ICU de Bucaramanga en los años 2000 - 2020



Fuente: elaboración propia

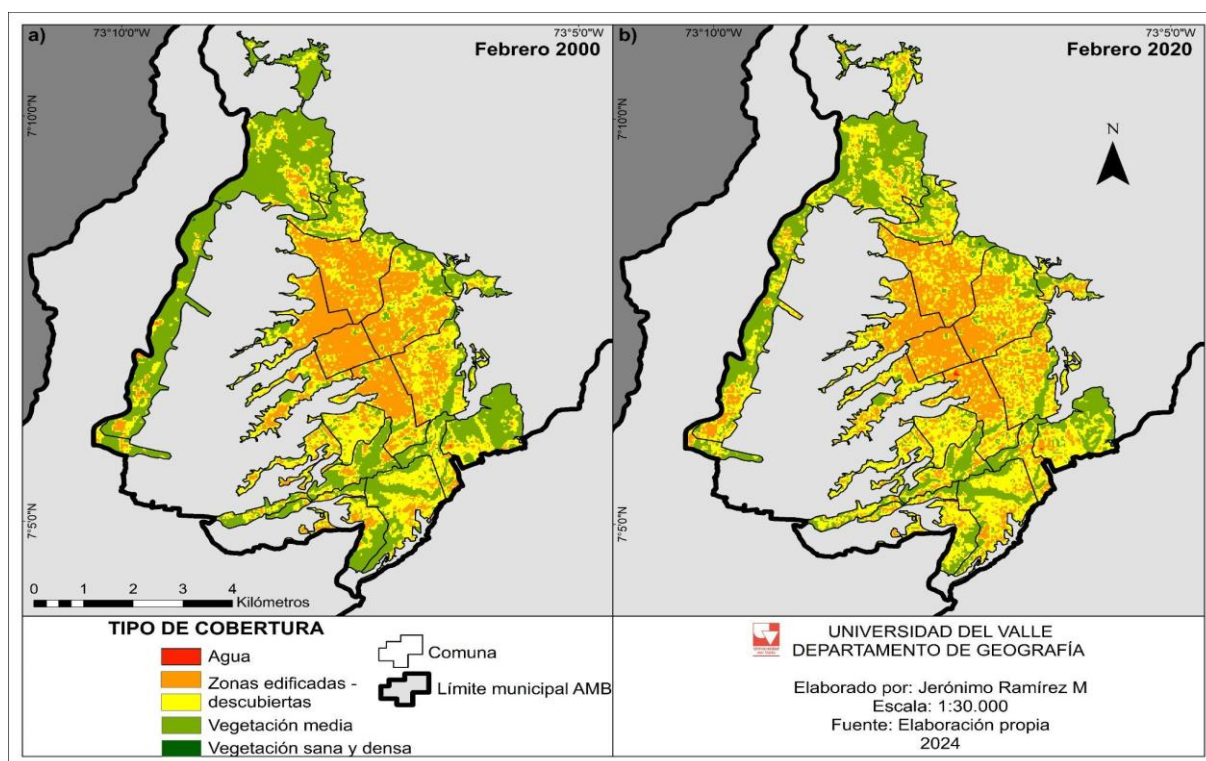
Además, en esta fecha las ICU se clasificaron en cuatro categorías de acuerdo con su nivel de intensidad, estas fueron: débil ($27,1^{\circ}\text{C}$ a $29,1^{\circ}\text{C}$) con 769 ha; moderada ($29,1^{\circ}\text{C}$ a $31,1^{\circ}\text{C}$) con 840 ha; fuerte ($31,1^{\circ}\text{C}$ a $33,1^{\circ}\text{C}$) con 303 ha; finalmente, muy fuerte ($> 33,1^{\circ}\text{C}$) con 1,7 ha (ver Gráfico 2 y Figura 17a).

Figura 17. ICU de Bucaramanga en los años 2000 - 2020



Fuente: elaboración propia

Figura 18. Tipo de cobertura de Bucaramanga en los años 2000 - 2020

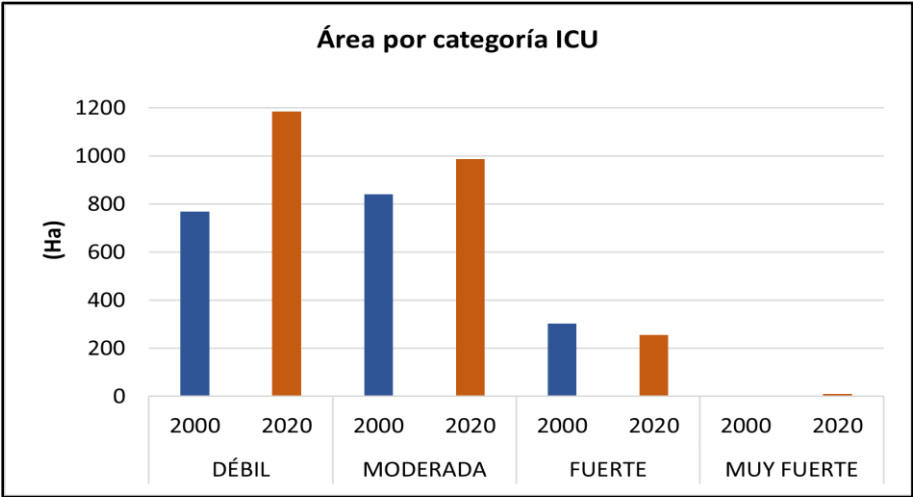


Fuente: elaboración propia

Luego, para el año 2020, el área total ICU ascendió a un valor de 2.436,7 ha (ver Gráfico 1), lo cual representa un crecimiento aproximado del 27,3 % dentro del periodo evaluado. El fenómeno ICU continuó presente en un patrón norte-sur y en las mismas comunas expuestas para el primer año, pero se extiende en las comunas García Rovira, La Pedregosa, Lagos del Cacique, Mutis, Norte, Occidental, Provenza, Sur y Suroccidente (ver Figura 17b) y sobre un tipo de cobertura edificada - descubierta (ver Figura 18b).

Por otra parte, las ICU se clasificaron en las mismas categorías de intensidad presentadas para el año 2000; estas fueron: débil ($27,1^{\circ}\text{C}$ a $29,1^{\circ}\text{C}$) con 1.184 ha obtuvo un crecimiento aproximado del 54%; moderada ($29,1^{\circ}\text{C}$ a $31,1^{\circ}\text{C}$) con 987 ha aumentó un 17,5%; fuerte ($31,1^{\circ}\text{C}$ a $33,1^{\circ}\text{C}$) con 255 ha decreció un 16% y, por último, la categoría muy fuerte ($> 33,1^{\circ}\text{C}$) con 10,7 ha presentó un alza del 529,4% (ver Gráfico 2 y Figura 17b).

Gráfico 2. Área por categoría ICU de Bucaramanga en los años 2000 - 2020

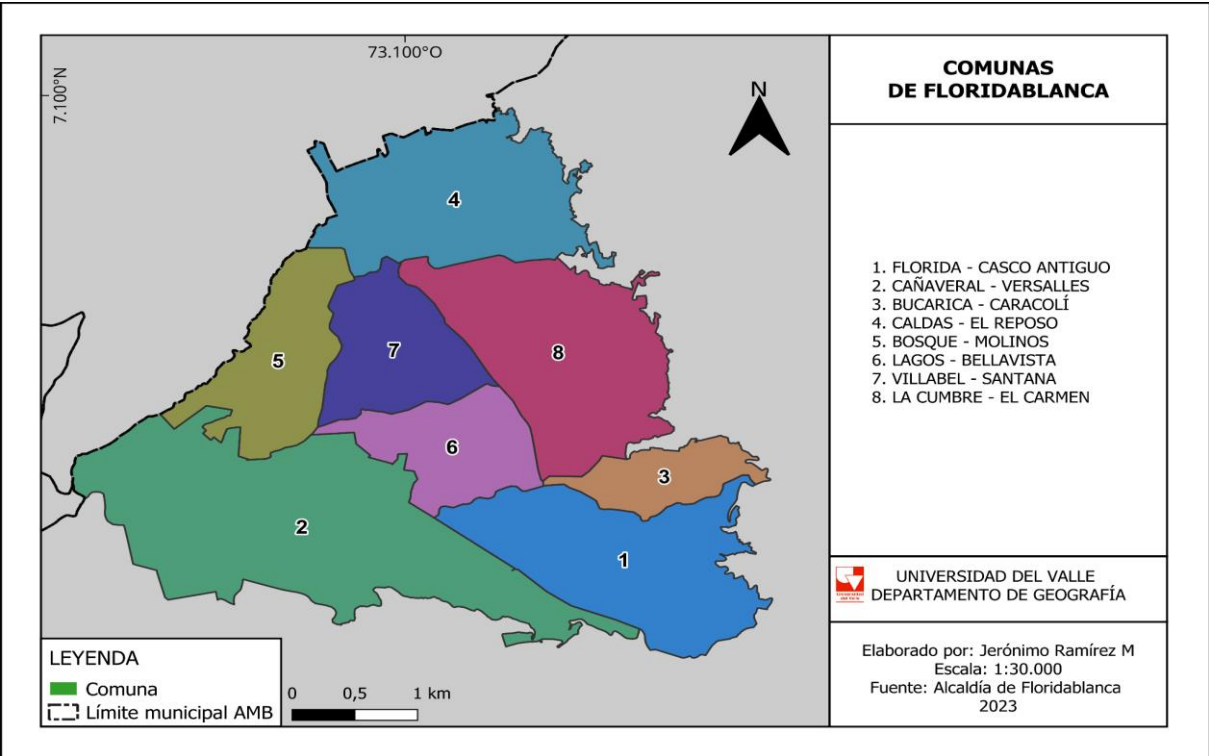


Fuente: elaboración propia

8.2 FLORIDABLANCA

En consonancia con las descripciones realizadas para Bucaramanga, los resultados obtenidos para Floridablanca se presentarán a escala de comuna. De acuerdo con la Alcaldía Municipal, la cabecera municipal de Floridablanca se divide en 8 comunas, expuestas en la Figura 19.

Figura 19. División política urbana de Floridablanca

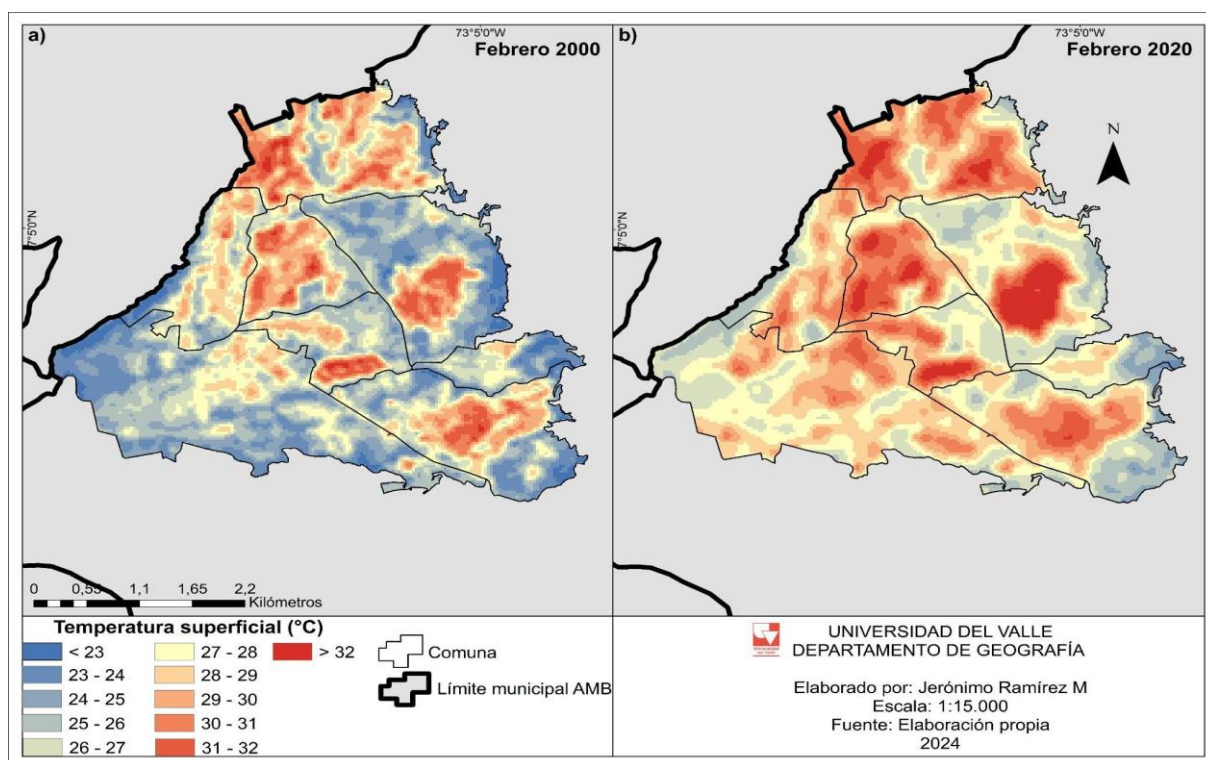


Fuente: elaboración propia, con base en Alcaldía de Floridablanca, 2023

A continuación, se presenta la descripción de los resultados más relevantes para los indicadores del municipio:

8.2.1 LST. En Floridablanca, para el año 2000, se evidenció que las temperaturas por encima del promedio metropolitano ($27,1^{\circ}\text{C}$) se registraron principalmente en un patrón espacial general norte-sur, el cual inicia en la comuna Caldas - Reposo y concluye en la comuna Florida - Casco Antiguo. De ese modo, la mayor proporción de estas temperaturas se presentaron en las comunas Bosque - Molinos, Caldas - Reposo, Florida - Casco Antiguo, Lagos - Bellavista, Valencia - Santana y en parte de las comunas Bucarica, Cañaveral y La Cumbre - El Carmen (ver Figura 20a).

Figura 20. LST de Floridablanca en los años 2000 - 2020

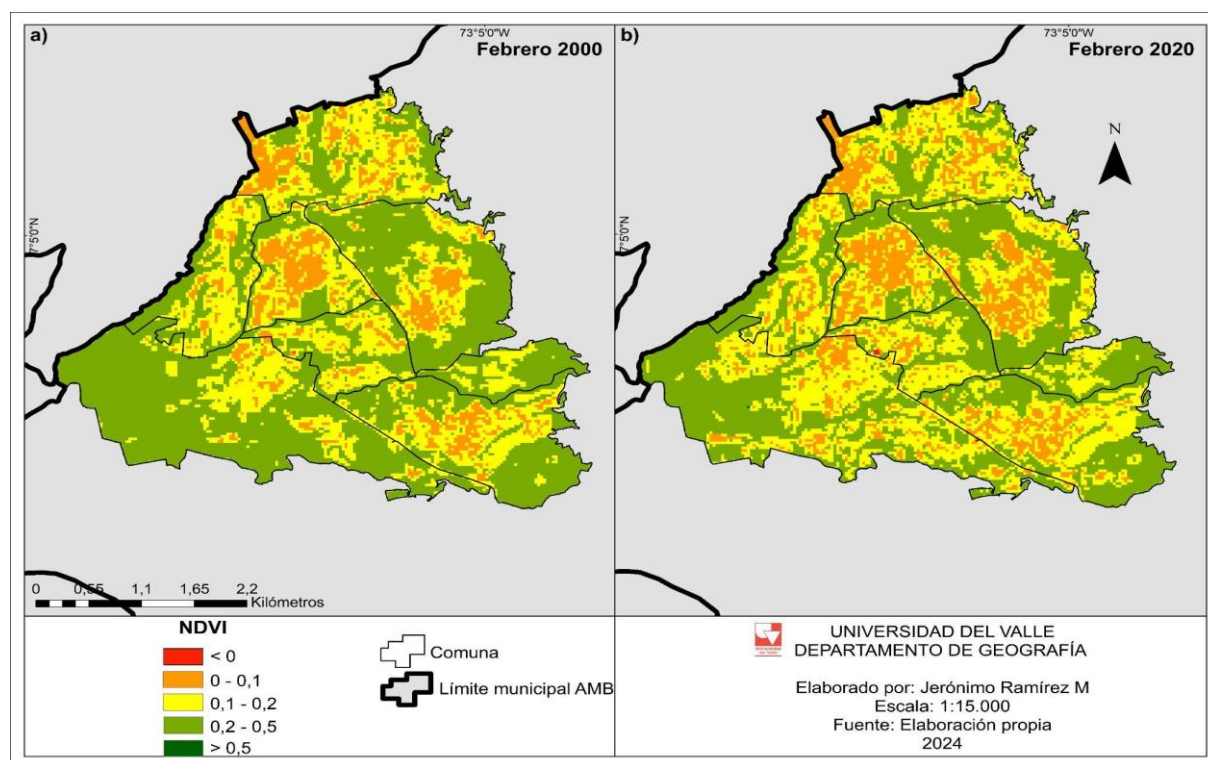


Fuente: elaboración propia

Luego, para el 2020, el patrón norte-sur se mantiene con valores superiores a $27,1^{\circ}\text{C}$ y en las mismas comunas expuestas para el año 2000, sin embargo, es clara su extensión sobre la mayor parte del área urbana, principalmente sobre las comunas Cañaveral, Florida - Casco Antiguo, La Cumbre - El Carmen y Lagos - Bellavista. Además, es notoria la disminución de las temperaturas inferiores a 23°C (ver Figura 20b). Por ende, la temperatura superficial aumentó $1,9^{\circ}\text{C}$ en Floridablanca dentro del periodo evaluado.

8.2.2 NDVI. Para el año 2000, se aprecia en Floridablanca que las zonas con áreas edificadas - descubiertas (0 - 0,2) se encontraban presentes en un patrón espacial general norte-sur, que inicia en la comuna Caldas - Reposo y finaliza en la comuna Florida - Casco Antiguo. Así, las comunas con una mayor proporción de este tipo de cobertura fueron Bosque - Molinos, Caldas - Reposo, Florida - Casco Antiguo, Lagos - Bellavista, Valencia - Santana y, en porciones de las comunas Bucarica, Cañaveral y La Cumbre - El Carmen (ver Figura 21a).

Figura 21. NDVI de Floridablanca en los años 2000 - 2020



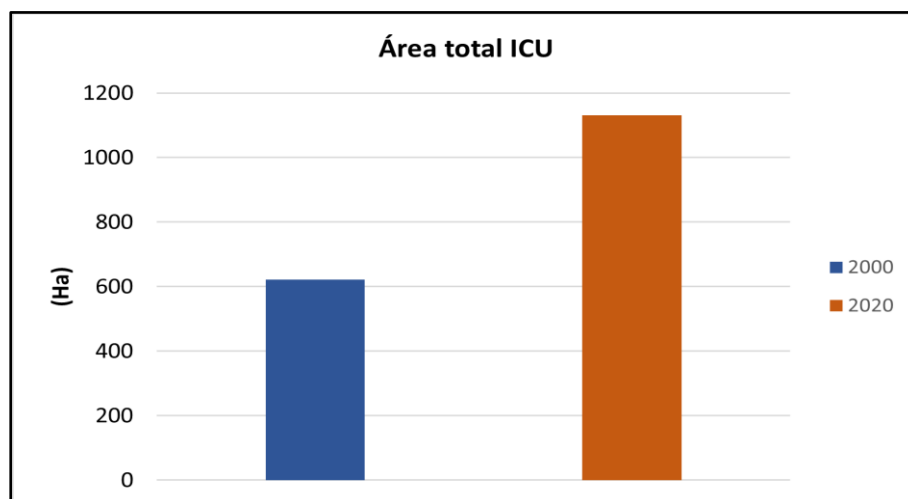
Fuente: elaboración propia

Después, para 2020, se observa que el patrón norte-sur persiste en las mismas comunas expuestas para el año 2000; sin embargo, se aprecia un crecimiento aproximado del 24,5 % de coberturas edificadas - descubiertas principalmente en las comunas Cañaveral, Caldas - Reposo, Florida - Casco Antiguo, La Cumbre - El Carmen y Lagos - Bellavista (ver Figura 21b).

8.2.3 Caracterización multitemporal ICU. Como resultado de la clasificación de los indicadores expuestos anteriormente, a continuación, se realiza la caracterización de las ICU de Floridablanca durante el periodo evaluado.

En el año 2000, se encontró un área total ICU aproximada de 621 ha (ver Gráfico 3). El fenómeno se emplazaba en un patrón espacial general norte-sur que comienza en la comuna Caldas - Reposo y finaliza en la comuna Florida - Casco Antiguo. El fenómeno se presentó principalmente en las comunas Bosque - Molinos, Caldas - Reposo, Florida - Casco Antiguo, Lagos - Bellavista, Valencia - Santana y en parte de las comunas Bucarica, Cañaveral y La Cumbre - El Carmen (ver Figura 22a). Igualmente, este fenómeno se presentó sobre un tipo de cobertura edificada - desnuda (ver Figura 23a).

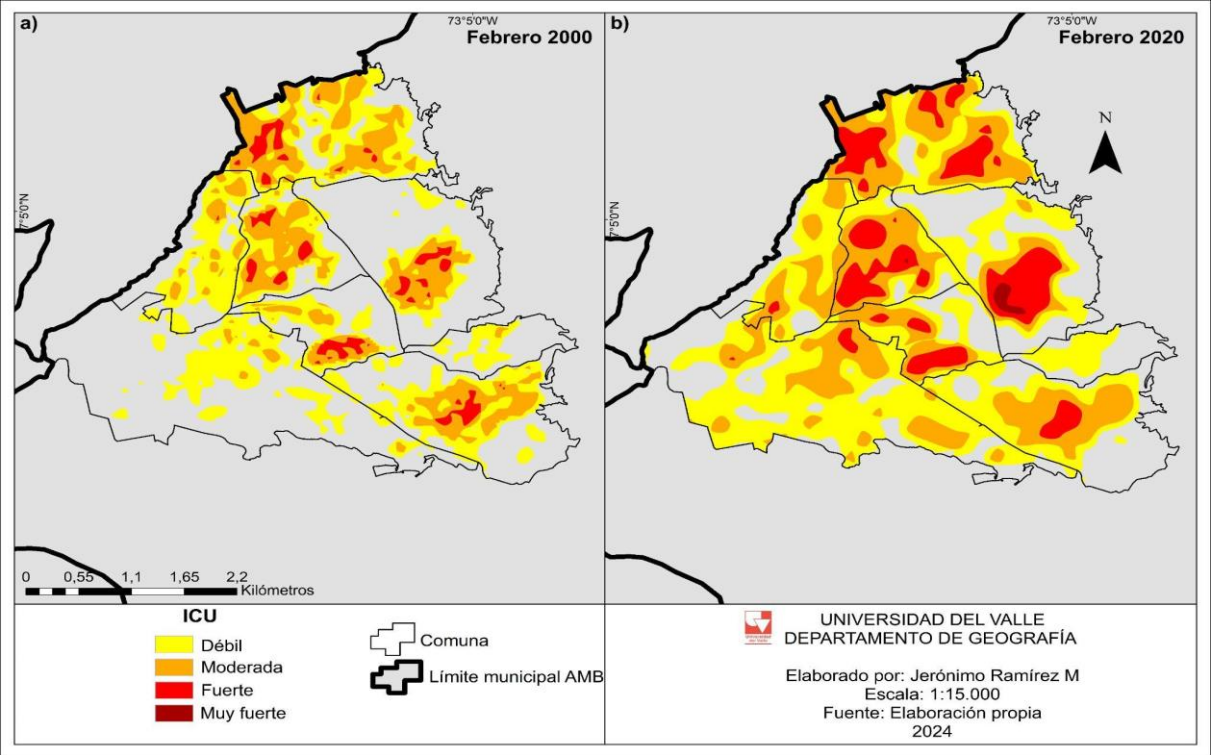
Gráfico 3. Área total ICU de Floridablanca en los años 2000 - 2020



Fuente: elaboración propia

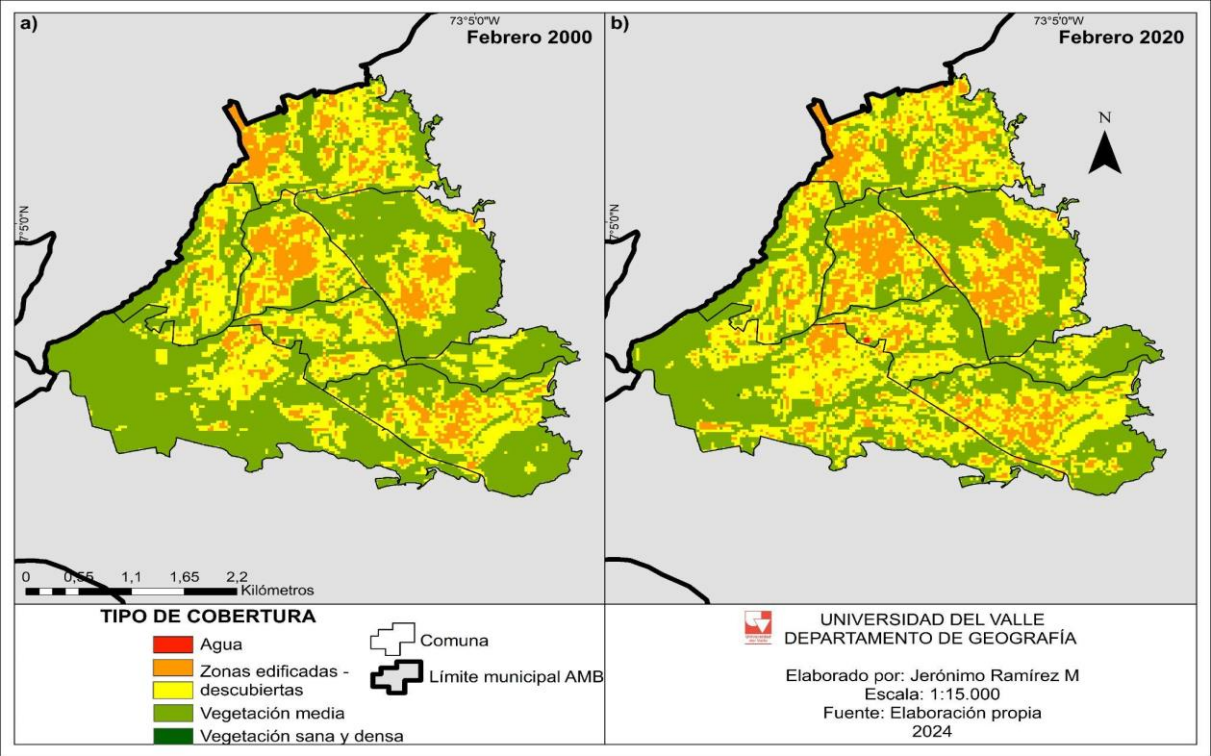
También, el fenómeno ICU se clasificó en tres categorías de acuerdo con su nivel de intensidad; estas fueron: débil ($27,1^{\circ}\text{C}$ a $29,1^{\circ}\text{C}$) con 317 ha; moderada ($29,1^{\circ}\text{C}$ a $31,1^{\circ}\text{C}$) con 253 ha; y, por último, fuerte ($31,1^{\circ}\text{C}$ a $33,1^{\circ}\text{C}$) con 50,6 ha (ver Gráfico 4 y Figura 22a).

Figura 22. ICU de Floridablanca en los años 2000 - 2020



Fuente: elaboración propia

Figura 23. Tipo de cobertura de Floridablanca en los años 2000 - 2020



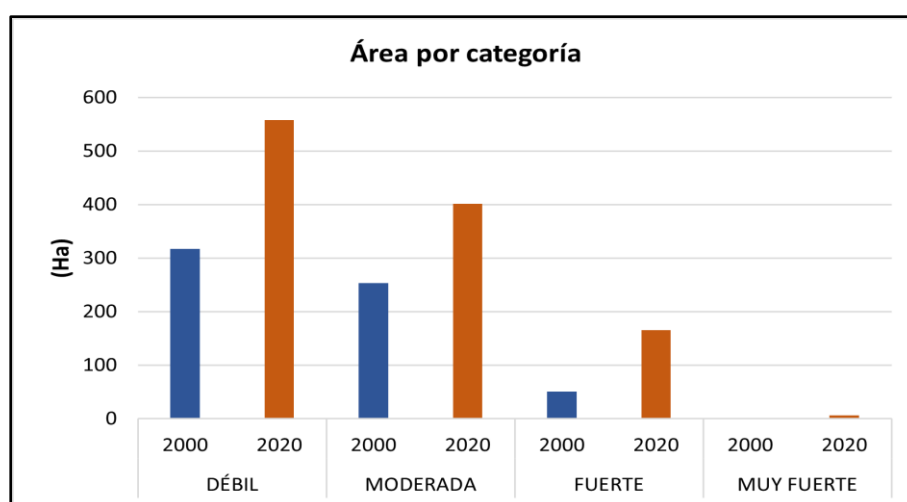
Fuente: elaboración propia

Posteriormente, para el año 2020, la extensión total ICU aumentó a 1.131,1 ha (ver Gráfico 3), lo que demuestra un crecimiento general del 82,1% aproximadamente. En

esta fecha, el fenómeno continuó presente en un patrón norte-sur y en las mismas comunas mencionadas para el año 2000. Sin embargo, se extendió notablemente en las comunas Cañaveral, Florida - Casco Antiguo, La Cumbre - El Carmen y Lagos - Bellavista (ver Figura 22b). Esta extensión ocurrió principalmente sobre un tipo de cobertura edificada - desnuda (ver Figura 23b).

Asimismo, las ICU se encontraron clasificadas en cuatro categorías de intensidad, las cuales fueron: débil ($27,1^{\circ}\text{C}$ - $29,1^{\circ}\text{C}$) con 557,6 ha la cual aumentó un 76%; moderada ($29,1^{\circ}\text{C}$ - $31,1^{\circ}\text{C}$) con 401,6 ha presentó un incremento del 58,7%; fuerte ($31,1^{\circ}\text{C}$ - $33,1^{\circ}\text{C}$) con 165,6 ha tuvo un alza del 227,2 % y, por último, muy fuerte ($> 33,1^{\circ}\text{C}$) con 6,3 ha (ver Gráfico 4 y Figura 22b).

Gráfico 4. Área por categoría ICU de Floridablanca en los años 2000 - 2020

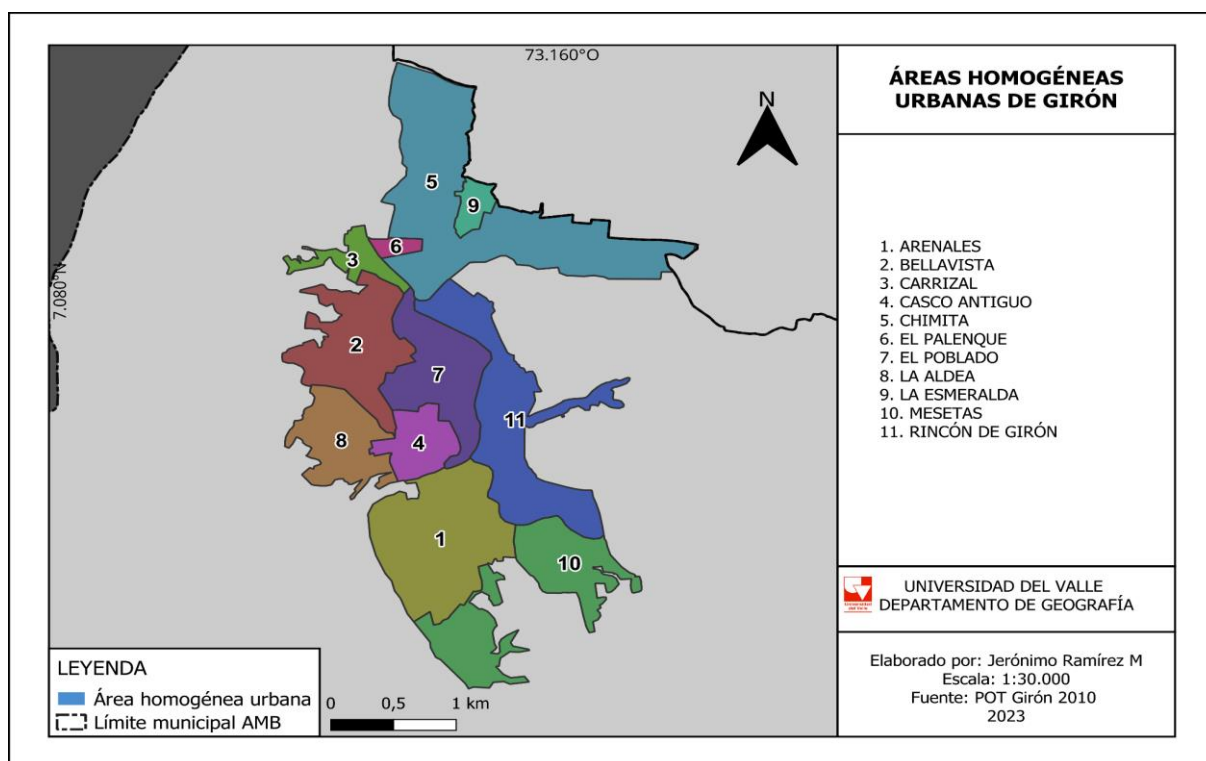


Fuente: elaboración propia

8.3 GIRÓN

En correspondencia con las descripciones realizadas para Bucaramanga y Floridablanca, los resultados obtenidos para Girón se presentarán a escala de área homogénea urbana. En conformidad con el POT Girón 2010, la cabecera municipal de Girón está dividida en 16 áreas homogéneas urbanas, pero en esta investigación se tuvieron en cuenta solo 11 de ellas, las cuales están emplazadas sobre el casco urbano principal, como se observa en la Figura 24.

Figura 24. División política urbana de Girón

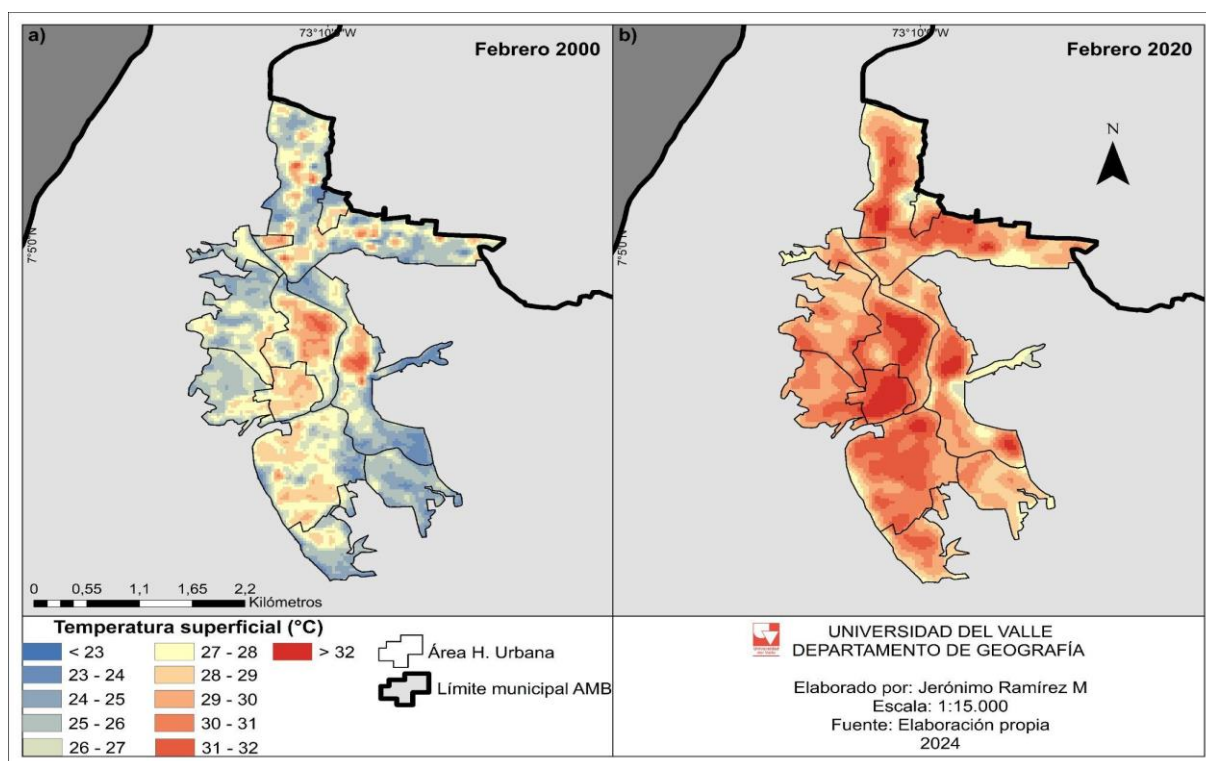


Fuente: elaboración propia, con base POT Girón 2010

A continuación, se presenta la descripción de los resultados más relevantes para los indicadores del municipio:

8.3.1 LST. En el municipio de Girón, se aprecia que para el año 2000 las áreas con temperaturas por encima del promedio metropolitano ($27,1^{\circ}\text{C}$) se localizaron en un patrón general norte-sur que comienza en el área homogénea urbana Chimitá y finaliza en el área homogénea urbana Mesetas. De este modo, la mayor concentración de temperaturas superiores a la media metropolitana se presentó en las áreas homogéneas urbanas Arenales, Casco Antiguo, El Palenque, El Poblado y en parte de los territorios de Carrizal, Chimitá, La Esmeralda y Rincón de Girón (ver Figura 25a).

Figura 25. LST de Girón en los años 2000 - 2020



Fuente: elaboración propia

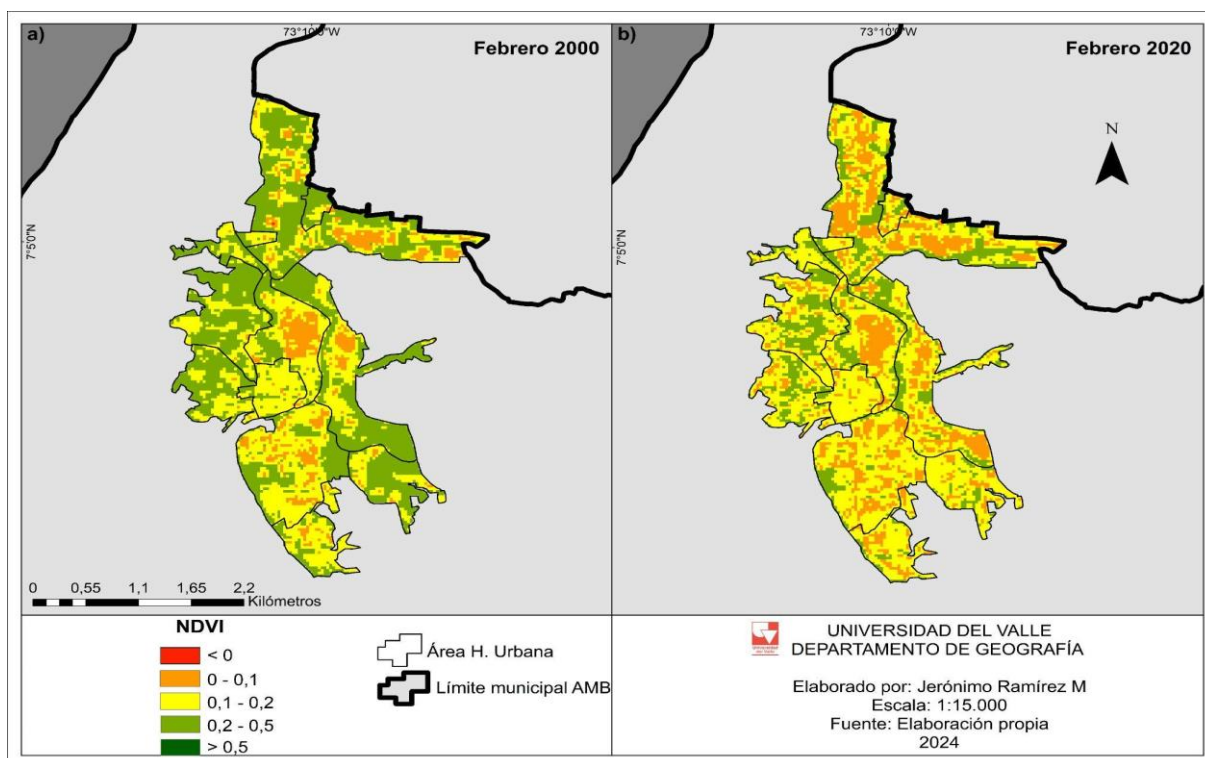
Más tarde, para el año 2020, el patrón norte-sur perdura con temperaturas superiores a 27,1°C y en las mismas áreas homogéneas urbanas expuestas para el año 2000, pero es clara una acentuada propagación sobre todo el perímetro urbano de Girón, a excepción de algunos enclaves con temperaturas inferiores a 27°C en las áreas homogéneas urbanas Chimitá y Rincón de Girón (ver Figura 25b). Por tanto, la temperatura superficial sufrió un aumento de 3,4°C dentro del periodo examinado.

8.3.2 NDVI. Para el año 2000, se aprecia que las áreas con cobertura edificada - descubierta (0 - 0,2) se presentaban en un patrón espacial general norte-sur, el cual inicia en el área homogénea urbana Chimitá y concluye en el área homogénea urbana Mesetas. Por consiguiente, las áreas homogéneas urbanas con una significativa proporción de este tipo de cobertura fueron Arenales, Casco Antiguo, El Palenque, El Poblado, así como en gran parte de Carrizal, Chimitá, La Esmeralda, Mesetas y Rincón de Girón (ver Figura 26a).

Luego, para 2020, se observa que el patrón norte-sur perdura en las mismas áreas homogéneas urbanas expuestas para el primer año; sin embargo, se observa una importante expansión del 52,1 % aproximadamente de coberturas edificadas -

descubiertas de manera general sobre el perímetro urbano de este municipio (ver Figura 26b).

Figura 26. NDVI de Girón en los años 2000 - 2020

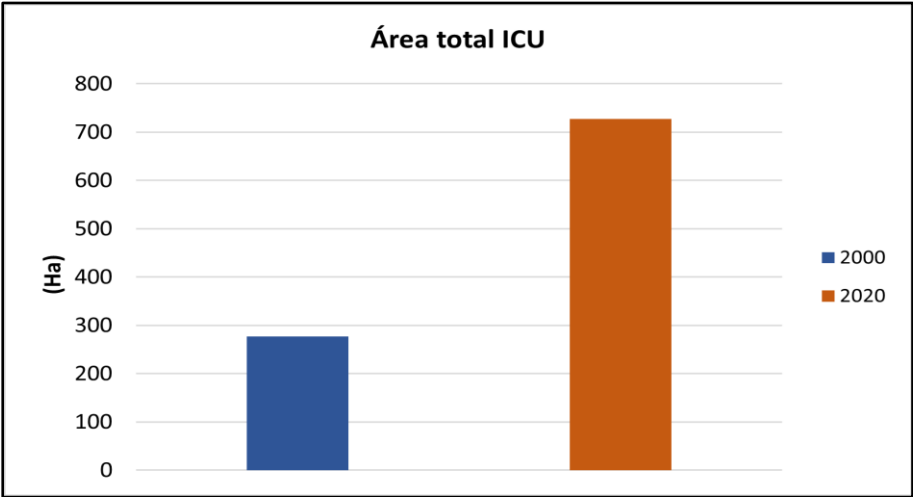


Fuente: elaboración propia

8.3.3 Caracterización multitemporal ICU. Como fruto de la clasificación de los indicadores expuestos anteriormente, a continuación, se realiza la caracterización de las ICU de Girón en el periodo evaluado.

Conforme a lo anterior, para el año 2000 se encontró un área total ICU de 276 ha (ver Gráfico 5). Las ICU se encontraban principalmente en un patrón espacial general norte-sur que inicia en el área homogénea urbana Chimita y finaliza en el área homogénea urbana Mesetas. En ese sentido, el fenómeno se presentó en las áreas homogéneas urbanas Arenales, Casco Antiguo, El Palenque, El Poblado y en parte importante de los territorios de Carrizal, Chimitá, La Esmeralda y Rincón de Girón (ver Figura 27a). También, se evidencia que el fenómeno se presentó sobre un tipo de cobertura edificada - descubierta (ver Figura 28a).

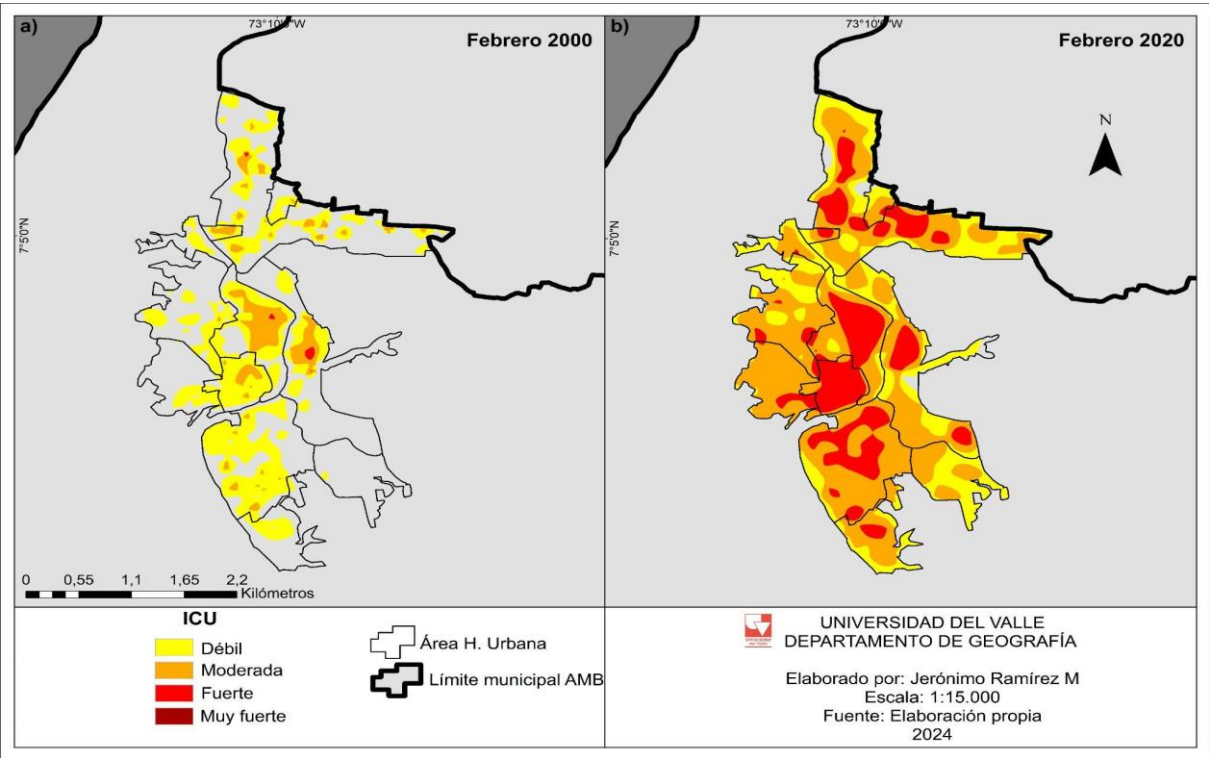
Gráfico 5. Área total ICU de Girón en los años 2000 - 2020



Fuente: elaboración propia

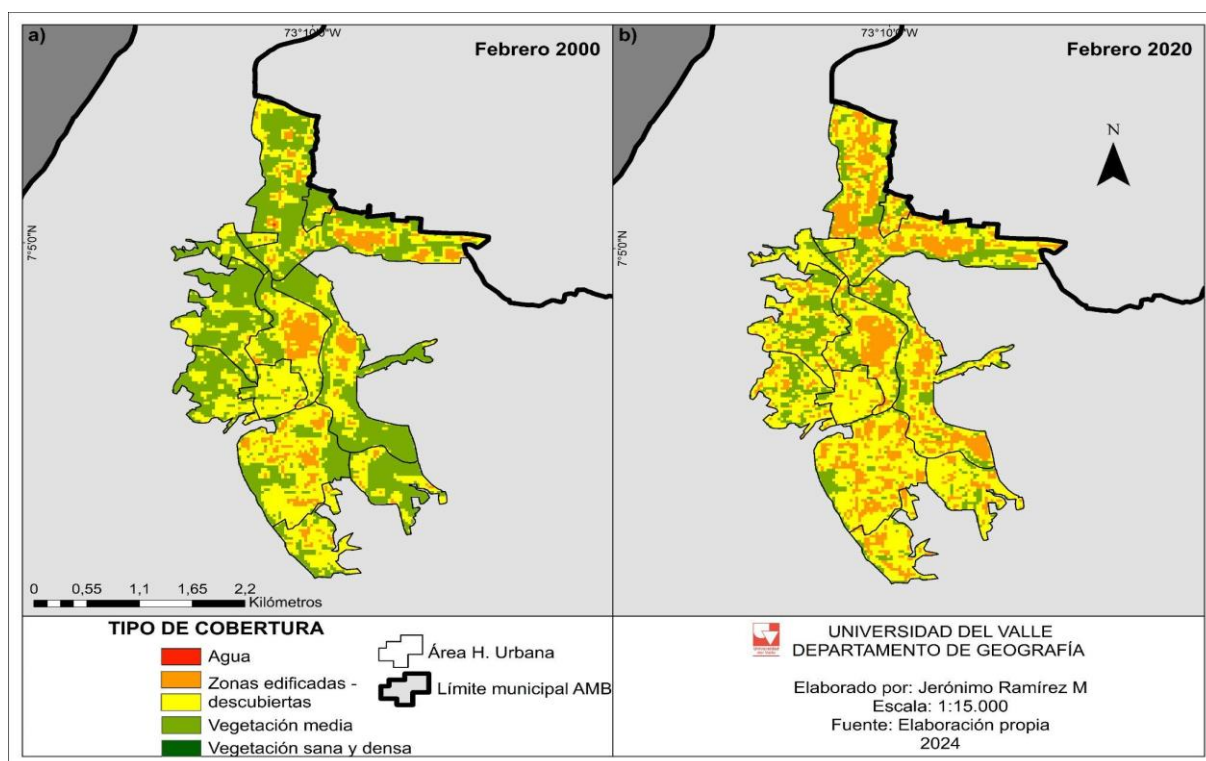
Además, para esta fecha el fenómeno se hallaba clasificado en 3 categorías de acuerdo con su nivel de intensidad; estas fueron: débil ($27,1^{\circ}\text{C}$ a $29,1^{\circ}\text{C}$) con 221,6 ha; moderada ($29,1^{\circ}\text{C}$ - $31,1^{\circ}\text{C}$) con 53,5 ha y fuerte ($31,1^{\circ}\text{C}$ - $33,1^{\circ}\text{C}$) con 1,8 ha (ver Gráfico 5 y Figura 27a).

Figura 27. ICU de Girón en los años 2000 - 2020



Fuente: elaboración propia

Figura 28. Tipo de cobertura de Girón en los años 2000 - 2020

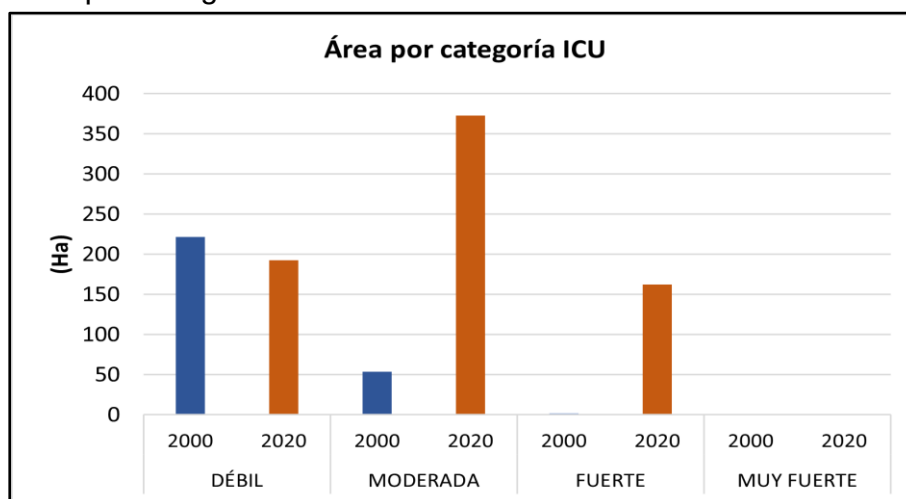


Fuente: elaboración propia

Posteriormente, para el año 2020 se evidenció una extensión total ICU de 727 ha (ver Gráfico 5), lo que representa un incremento del 163,4% del fenómeno. Las ICU continuaban presentes en un patrón general norte-sur y en las mismas áreas homogéneas urbanas expuestas para el primer año, pero es evidente su extensión sobre todo el perímetro urbano (ver Figura 27b). Esta extensión tuvo lugar sobre un tipo de cobertura edificada – descubierta generalmente (ver Figura 28b).

Por otro lado, para la fecha señalada, las ICU se clasificaban en tres categorías de intensidad; estas fueron: débil ($27,1^{\circ}\text{C}$ a $29,1^{\circ}\text{C}$) con 192,3 ha presentó una disminución del 13,2%; moderada ($29,1^{\circ}\text{C}$ a $31,1^{\circ}\text{C}$) con 372,9 ha aumentó un 597%; y, por último, fuerte ($31,1^{\circ}\text{C}$ a $33,1^{\circ}\text{C}$) con 162,3 ha presentó un crecimiento del 8.916,6% (ver Gráfico 6 y Figura 27b).

Gráfico 6. Área por categoría ICU de Girón en los años 2000 - 2020

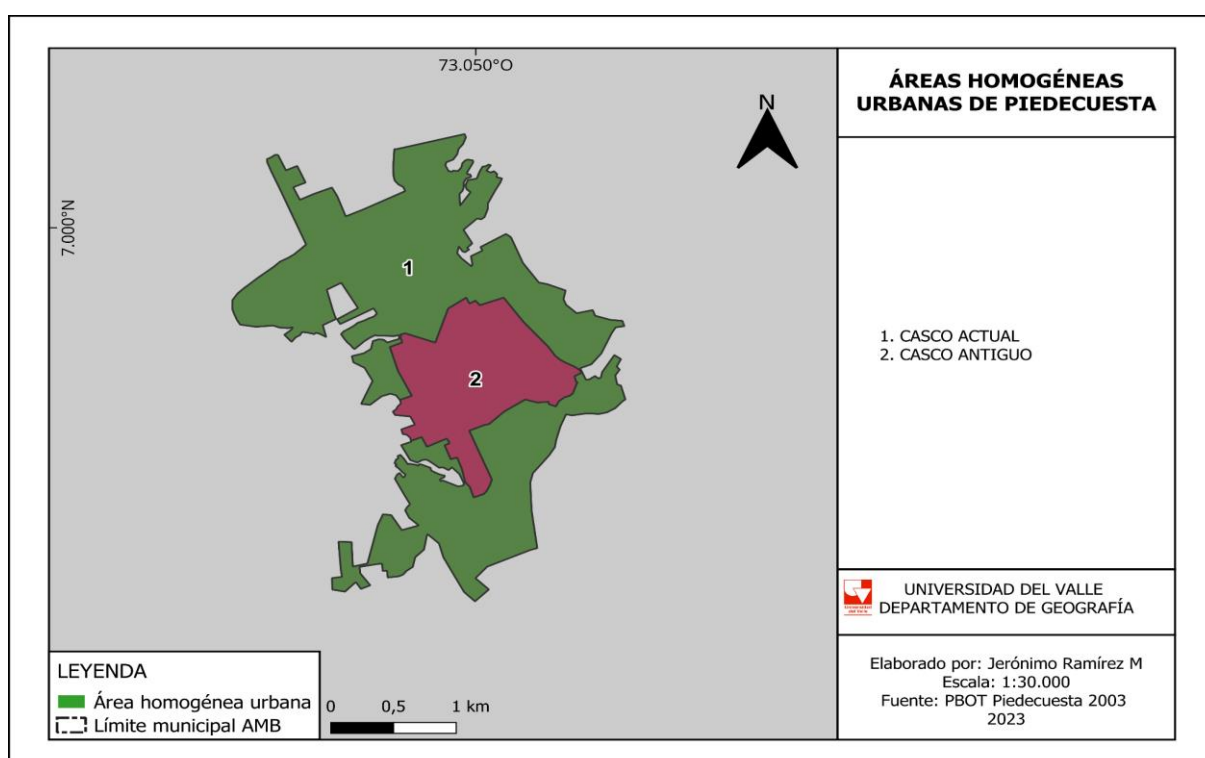


Fuente: elaboración propia

8.4 PIEDECUESTA

En afinidad con las descripciones realizadas para Bucaramanga, Floridablanca y Girón, los resultados obtenidos para Piedecuesta se presentarán a escala de área homogénea urbana. De acuerdo con el PBOT Piedecuesta 2003, la cabecera municipal de Piedecuesta está dividida fundamentalmente en 2 áreas homogéneas urbanas presentadas en la Figura 29.

Figura 29. División política urbana de Piedecuesta

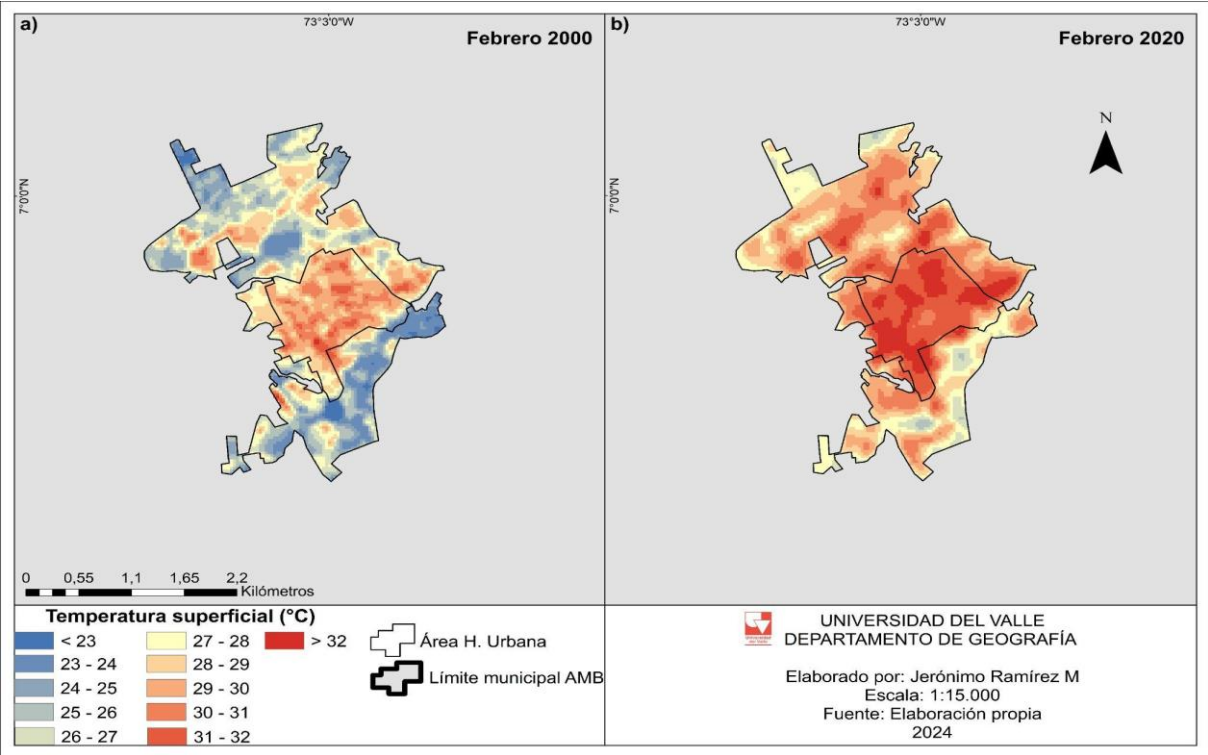


Fuente: elaboración propia con base en PBOT Piedecuesta 2003

Enseguida se presenta la descripción de los resultados más relevantes para los indicadores del municipio:

8.4.1 LST. En Piedecuesta, se observa que para el año 2000 las temperaturas superiores a la media metropolitana ($27,1^{\circ}\text{C}$) se registraron en un patrón espacial general céntrico emplazado mayormente en el área homogénea urbana Casco Antiguo. De esta manera, la mayor concentración de estas temperaturas se localizó en el área homogénea urbana Casco Antiguo y en algunas zonas del área homogénea urbana Casco Actual (ver Figura 30a).

Figura 30. LST de Piedecuesta en los años 2000 - 2020



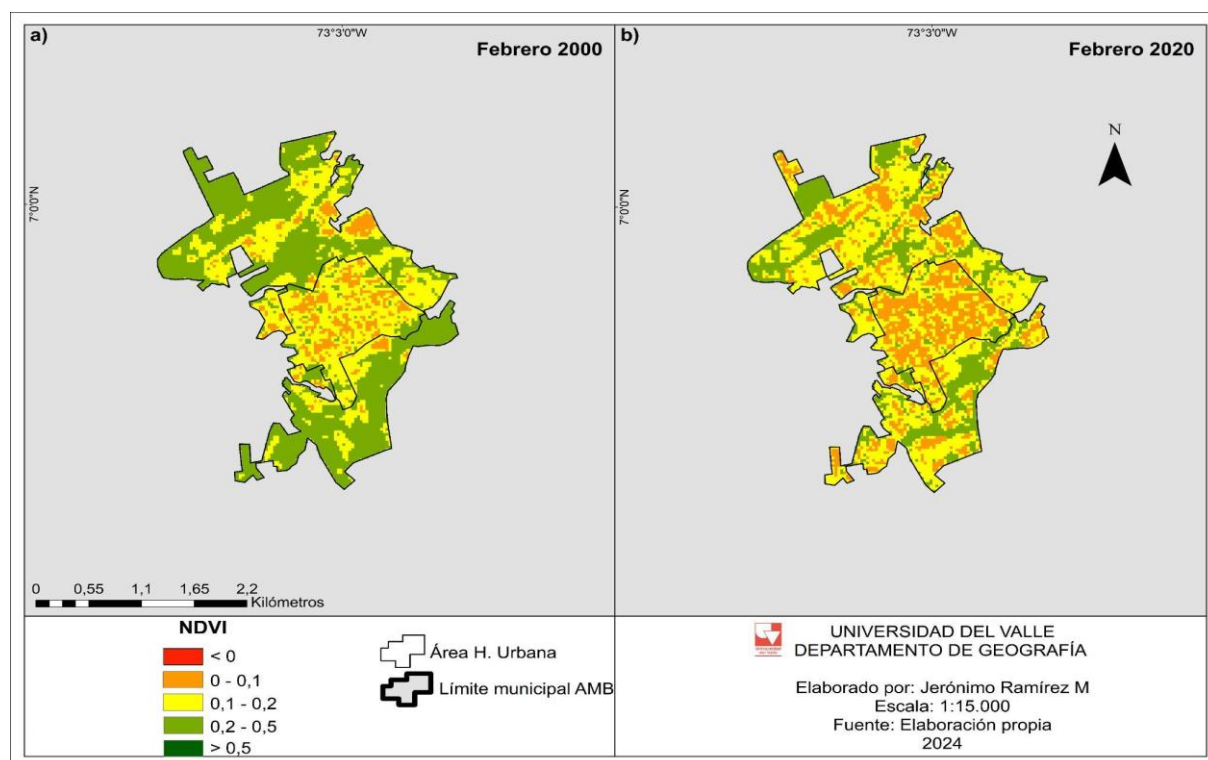
Fuente: elaboración propia

Posteriormente, en 2020, las temperaturas por encima de $27,1^{\circ}\text{C}$ se presentaron en un patrón norte-sur y sobre las mismas áreas homogéneas urbanas señaladas para el año 2000, aunque es evidente su extensión de forma general sobre el perímetro urbano, exceptuando algunos enclaves con temperaturas inferiores a 27°C en el área homogénea urbana Casco Actual (ver Figura 30b). Como resultado, la temperatura superficial aumentó $2,7^{\circ}\text{C}$ dentro del periodo evaluado en esta área urbana.

8.4.2 NDVI. Para el año 2000, se evidencia que las coberturas edificadas - descubiertas (0 - 0,2) se localizaban principalmente en un patrón espacial general céntrico ubicado en su mayoría en el área homogénea urbana Casco Antiguo. En ese

sentido, la mayor proporción de este tipo de cobertura se localizó en el área homogénea urbana Casco Antiguo y en parte del área homogénea urbana Casco Actual (ver Figura 31a).

Figura 31. NDVI de Piedecuesta en los años 2000 - 2020



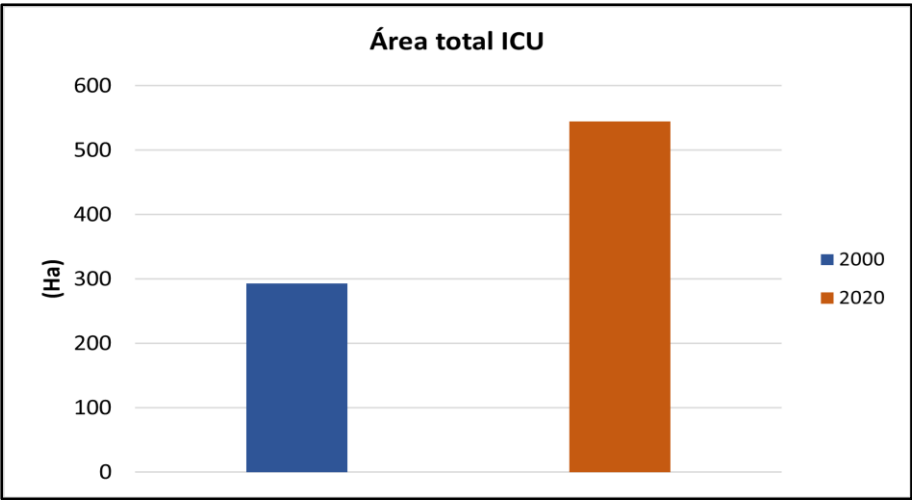
Fuente: elaboración propia

Después, en el año 2020, las coberturas edificadas - descubiertas se hallaban distribuidas en un patrón norte-sur sobre las áreas homogéneas urbanas expuestas para el año 2000; sin embargo, se aprecia una expansión aproximada del 55,1 % de este tipo de cobertura, principalmente en el área homogénea urbana Casco Actual (ver Figura 31b).

8.4.3 Caracterización multitemporal ICU. Como resultado de la clasificación de los indicadores presentados anteriormente, se realiza a continuación la caracterización de las ICU de Piedecuesta en el periodo evaluado.

En ese sentido, en el año 2000 se obtuvo un área total ICU de 293 ha (ver Gráfico 7). Las ICU en Piedecuesta se hallaban presentes en un patrón espacial general céntrico ubicado ampliamente en el área homogénea urbana Casco Antiguo. Así, el fenómeno se localizó en el área homogénea urbana Casco Antiguo y en zonas del área homogénea urbana Casco Actual (ver Figura 32a). Además, el fenómeno se localizaba sobre un tipo de cobertura edificada - desnuda. (ver Figura 33a).

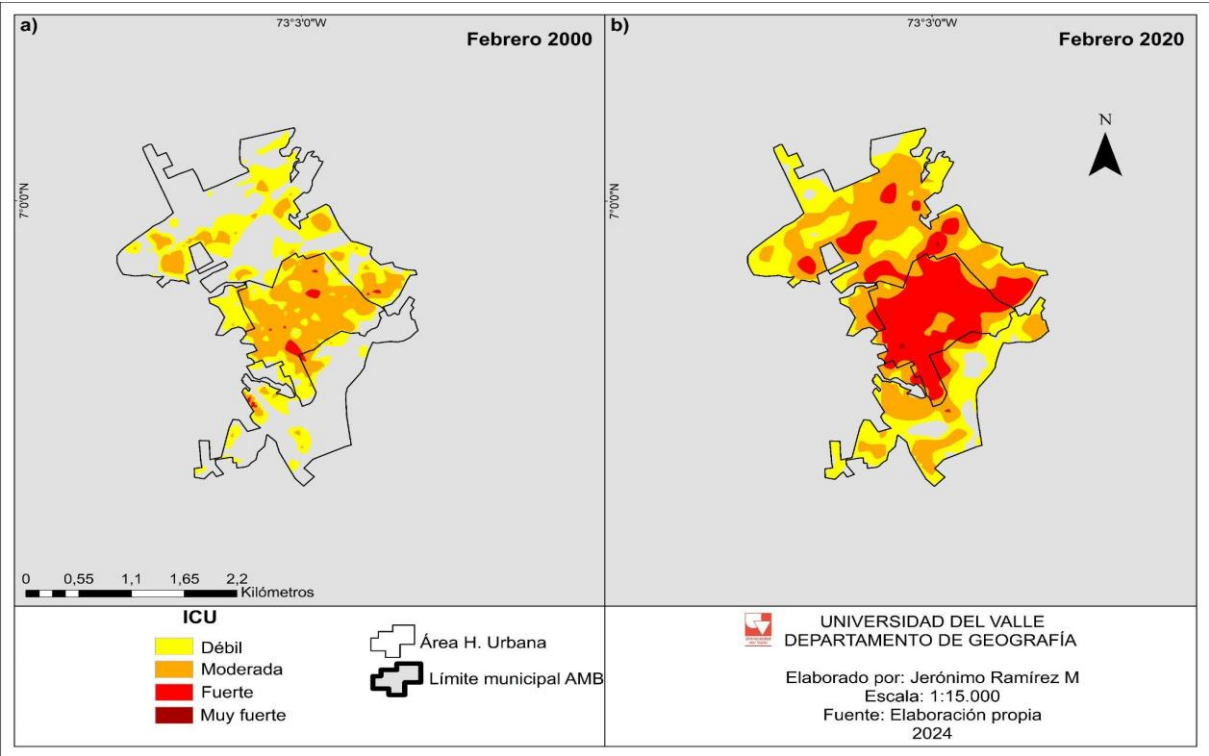
Gráfico 7. Área total ICU de Piedecuesta en los años 2000 - 2020



Fuente: elaboración propia

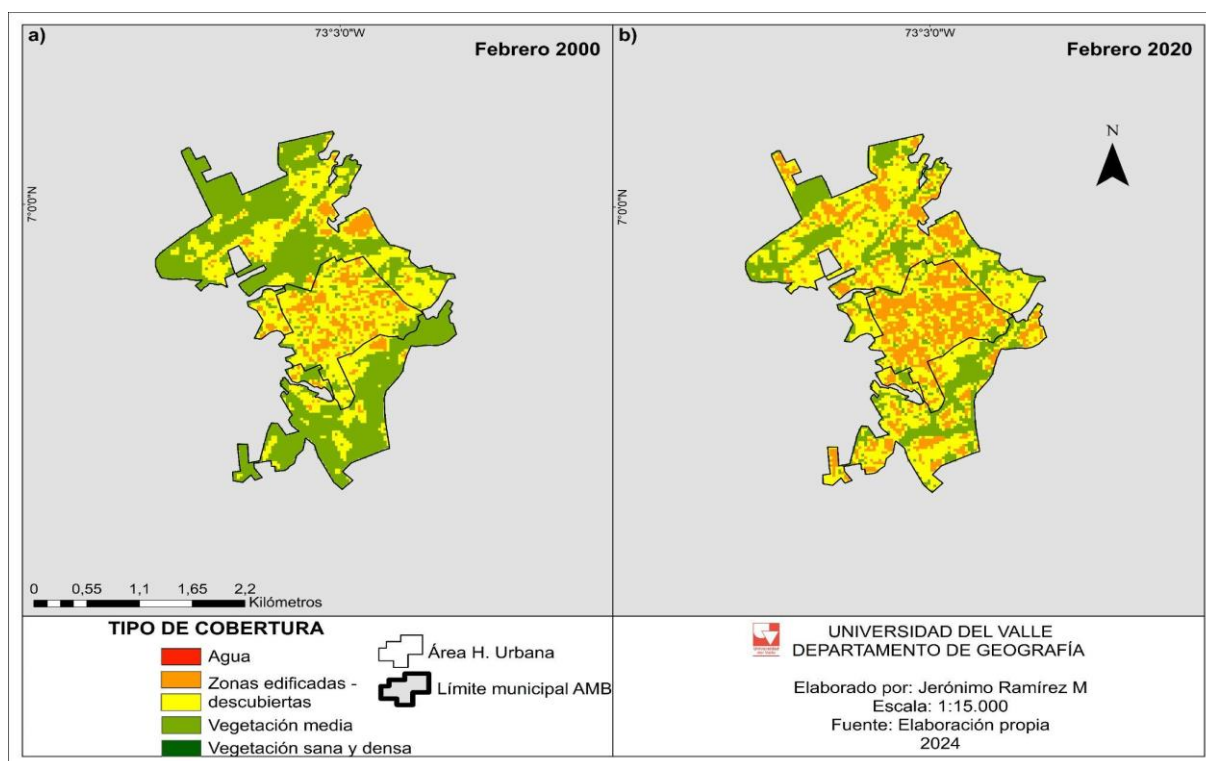
A su vez, las ICU se clasificaron en tres categorías de acuerdo con su nivel de intensidad, tales como: débil ($27,1^{\circ}\text{C}$ a $29,1^{\circ}\text{C}$) con 158 ha; moderada ($29,1^{\circ}\text{C}$ a $31,1^{\circ}\text{C}$) con 129,5 ha y fuerte ($31,1^{\circ}\text{C}$ a $33,1^{\circ}\text{C}$) con 5,4 ha (ver Gráfico 8 y Figura 32a).

Figura 32. ICU de Piedecuesta en los años 2000 - 2020



Fuente: elaboración propia

Figura 33. Tipo de cobertura de Piedecuesta en los años 2000 - 2020

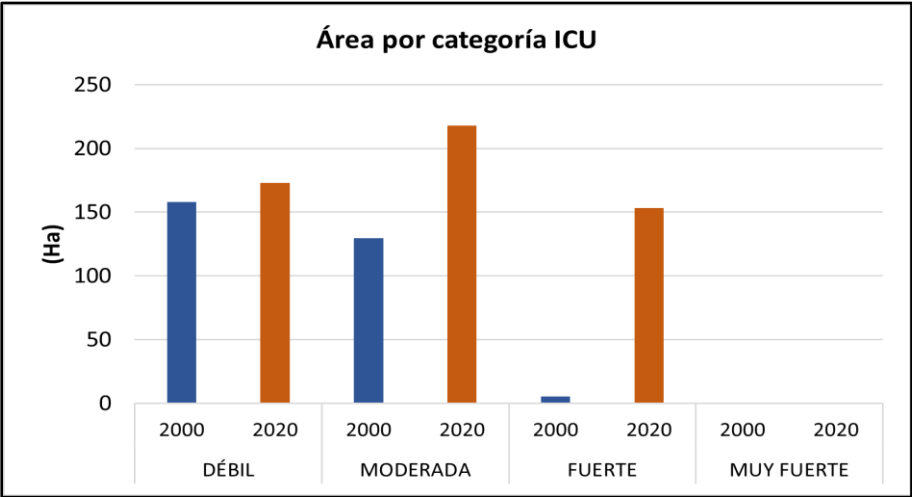


Fuente: elaboración propia

Luego, en 2020, el área total ICU ascendió a un total de 544,5 ha (ver Gráfico 7) lo que representa un aumento general del 85,8%. Para esta fecha, el fenómeno se presentó en un patrón norte-sur y sobre las mismas áreas homogéneas urbanas señaladas para el año 2000. Aunque, se evidencia la expansión del fenómeno ICU sobre el área homogénea urbana Casco Actual (ver Figura 32b). La expansión se llevó a cabo principalmente sobre un tipo de cobertura edificada - desnuda (ver Figura 33b).

También, las ICU se hallaron clasificadas en cuatro categorías de acuerdo con su nivel de intensidad, las cuales fueron: débil ($27,1^{\circ}\text{C}$ a $29,1^{\circ}\text{C}$) con 173 ha ostentó un crecimiento del 9,4%; moderada ($29,1^{\circ}\text{C}$ a $31,1^{\circ}\text{C}$) con 218 ha aumentó aproximadamente un 68,3%; fuerte ($31,1^{\circ}\text{C}$ a $33,1^{\circ}\text{C}$) con 153 ha tuvo un incremento del 2.733,3% y, por último, muy fuerte ($> 33,1^{\circ}\text{C}$) con 0,5 ha (ver Gráfico 8 y Figura 32b).

Gráfico 8. Área por categoría ICU de Piedecuesta en los años 2000 - 2020



Fuente: elaboración propia

9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de esta investigación son precursores en divulgar el desarrollo de las ICU en el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) en el periodo 2000 - 2020.

Al respecto, en Bucaramanga las ICU se extendieron un 27,3 %, principalmente en las comunas García Rovira, La Pedregosa, Lagos del Cacique, Mutis, Norte, Occidental, Provenza, Sur y Suroccidente; sobre un tipo de cobertura edificada - descubierta. Asimismo, las categorías de intensidad débil, moderada y muy fuerte presentaron incrementos de 54 %, 17,5 % y 529,4 % respectivamente; en contraste, la categoría fuerte disminuyó un 16%. En consecuencia, la temperatura superficial tuvo un incremento de 0,8°C.

Por otra parte, en Floridablanca el fenómeno ICU presentó una expansión del 82,1 %, notablemente en las comunas Cañaveral, Florida - Casco Antiguo, La Cumbre - El Carmen y Lagos - Bellavista; y de manera general sobre un tipo de cobertura edificada - descubierta. También, las categorías de intensidad débil, moderada y fuerte sufrieron incrementos de 76 %, 58,4 % y 227,2 % respectivamente; mientras que la categoría muy fuerte apareció con 6,3 ha. Como resultado, la temperatura superficial aumentó 1,9°C.

Mientras tanto, en Girón, el fenómeno ICU se expandió aproximadamente un 163,4% sobre casi la totalidad del perímetro urbano y generalmente sobre un tipo de cobertura edificada - descubierta. De igual modo, las categorías de intensidad moderada y fuerte ostentaron incrementos de 597 % y 8.916,6 %; en cambio, la categoría débil presentó una disminución de 13,2 %. Por ende, el área urbana presentó un incremento de 3,4°C en la temperatura superficial.

Finalmente, en cuanto a Piedecuesta, el fenómeno ICU se extendió un 85,8% sobre el área homogénea urbana Casco Actual y principalmente sobre un tipo de cobertura edificada - descubierta. A su vez, las categorías de intensidad débil, moderada y fuerte presentaron un incremento de 9,4 %, 68,3 % y 2.733,3 % respectivamente; mientras que la categoría muy fuerte aparece con 0,5 ha. En consecuencia, la temperatura superficial sufrió un incremento de 2,7°C.

En ese sentido, y de acuerdo con Wypych y Bowka⁵⁸, el número de habitantes es clave en la aparición del fenómeno ICU; por ejemplo, en urbes con población de 500.000 a 1.000.000 habitantes, la temperatura del aire suele aumentar de 1,1 a 1,2 °C con respecto a las áreas rurales circundantes. Para urbes con más de 1.000.000 de habitantes, la temperatura del aire aumenta de 1,2 a 1,5 °C. Por lo anterior, se puede prever que a medida que la población en el AMB aumente, el fenómeno ICU se expanda e intensifique en sus áreas urbanas.

Los resultados de esta investigación coinciden de manera notable con los obtenidos por Gualdrón Díaz⁵⁹ para el municipio de Bucaramanga en el año 2020, quien mediante la obtención y tratamiento de imágenes satelitales Landsat 8 OLI/TIRS encontró que las ICU en Bucaramanga se presentaban en un patrón espacial general norte-sur, que inicia desde la comuna Norte, hasta las comunas Lagos del Cacique, La Pedregosa, Provenza y Sur y con temperaturas superiores a 28°C. Sin embargo, los resultados de este estudio difieren ampliamente de los obtenidos por Barrero y Flórez⁶⁰ en 2014, también para Bucaramanga, en donde mediante el uso de estaciones climatológicas solo obtienen dos ICU preponderantes en las comunas Norte y Ciudadela Real de Minas.

⁵⁸ WYPYCH, Sebastian y BOKWA, Anita. El clima en las ciudades. En : ENVIRONMENTAL SCIENCE. [sitio web]. Cracovia: Jagiellonian University. [Consulta 25 mayo 2024]. Disponible en: http://www.atmosphere.mpg.de/enid/2__Clima_Urbano/-_Efecto_isla_de_calor_3x6.html

⁵⁹ GUALDRÓN, Op., Cit., p.63.

⁶⁰ BARRERO y FLÓREZ, Op., Cit., p.92.

10. CONCLUSIONES

Esta investigación tuvo como objetivo caracterizar la evolución de las islas de calor urbanas en Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) en el periodo 2000 - 2020 y sus hallazgos principales fueron:

- Las islas de calor urbanas se han expandido en todos los municipios del AMB. En Bucaramanga, la expansión del fenómeno fue del 27,3 %; en Floridablanca de 82,1 %; en Girón de 163,4 % y en Piedecuesta de 85,8 %.
- Se evidencia una intensificación general del fenómeno ICU. En Bucaramanga, las categorías moderada y muy fuerte presentaron incrementos de 17,5 % y 529,4% respectivamente; en Floridablanca las categorías moderada y fuerte tuvieron alzas de 58,4% y 227,2% respectivamente y la categoría muy fuerte surgió con 6,3 ha; en Girón las categorías moderada y fuerte crecieron un 597% y 8.916,6% respectivamente y en Piedecuesta las categorías moderada y fuerte aumentaron 68,3% y 2.733,3% en el orden dado; además, la categoría muy fuerte se manifestó con 0,5 ha.
- Todos los municipios del AMB presentaron un incremento de la temperatura superficial. En Bucaramanga aumentó 0,8°C; en Floridablanca ascendió 1,9°C; en Girón se acrecentó 3,4°C y en Piedecuesta el incremento fue de 2,7°C.
- Se aprecia que la expansión de las ICU se ha manifestado fundamentalmente sobre un tipo de cobertura edificada - desnuda en todos los municipios del AMB.

BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS. [sitio web]. Washington D.C.: EPA, Las islas de calor. [Consulta: 24 noviembre 2022]. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/las-islas-de-calor#:~:text=Las%20islas%20de%20calor%20pueden,de%20gases%20de%20efecto%20invernadero.>

ALCALDÍA DE BUCARAMANGA. Manual de silvicultura de Bucaramanga. Bucaramanga: Gómez Anaya, W.F , 2023. p. 9.

ALDANA OLAVE, Armando y PRECIADO VARGAS, Mónica. Análisis de presencia de islas de calor en Santiago de Cali empleando técnicas de teledetección. Ventana Informática [en línea]. 2011, enero - junio, 24. 95 - 114. [Consultado 10 marzo 2024]. ISSN 0123-9678. DOI: 10.30554/ventanainform.24.162.2011

ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA. [sitio web]. Bucaramanga: AMB, Nuestra Área Metropolitana de Bucaramanga. [consulta: 12 octubre 2022]. Disponible en: <https://www.amb.gov.co/nuestra-area/>

ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA. [sitio web]. Bucaramanga: AMB, Observatorio Metropolitano. [consulta: 14 octubre 2022]. Disponible en: <http://www.observatoriometropolitano.com.co:8080/Inicio/Index>

ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA. Acuerdo Metropolitano 0061 (1994). Por el cual se adopta el Plan Integral de Desarrollo Metropolitano [en línea]. Bucaramanga, 1994. 85 p. [Consultado 3 noviembre 2022]. Disponible en: http://amb.gov.co/jdownloads/Documentos/Juridica/Acuerdos/acuerdo_metropolitano_no_0061_de_1994.pdf

ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA. Plan Integral de Desarrollo Metropolitano 2016 - 2026. [En línea]. Bucaramanga: AMB, 2016, p. 22. [consultado: 21 octubre 2022]. Disponible en: https://www.amb.gov.co/wp-content/uploads/plan_integral_de_desarrollo_metropolitano_2016_2026.pdf

BARRERO RAMÍREZ, María Estefanía y FLOREZ RODRÍGUEZ, Nataly Stefany. Identificación y caracterización del efecto isla de calor en la ciudad de Bucaramanga,

Santander, y su incidencia en el confort térmico [en línea]. Trabajo de grado. Universidad de La Salle, 2014. 246 p.[Consultado 10 enero 2023]. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1910&context=ing_ambiental_sanitaria

CHEN, Xiao-Ling, *et al.* *Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes*. Remote Sensing of Environment [en línea]. 2006, 104 (2). 133 - 146. [Consultado 16 junio 2023]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.016>

CHUVIECO SALINERO, Emilio. Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. 3 ed. Barcelona: Ariel, 2008. p. 17.

COLOMBIA. DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. [sitio web]. Bogotá: DANE, Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. [consulta: 21 octubre 2022]. Disponible en: <https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/sociedad/cnpv2018/?lt=4.456007353293281&lg=-73.2781601239999&z=6>

COLOMBIA. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Atlas de la Aglomeración de Bucaramanga. Bogotá: Puntoaparte, 2018. p. 20.

COLOMBIA. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. [sitio web]. Bogotá: IDEAM, Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos [consulta: 11 octubre 2022]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a23591baee8c73fc#:~:text=El%20promedio%20de%20lluvia%20durante%20el%20a%C3%B1o%20es%20de%201008%20mm>.

COPERNICUS GLOBAL LAND SERVICE. [sitio web]. Bruselas: COPERNICUS, *Land Surface Temperature*. [Consulta: 10 diciembre 2022]. Disponible en: [https://land.copernicus.eu/global/products/lst#:~:text=The%20Land%20Surface%20Temperature%20\(LST,direction%20of%20the%20remote%20sensor](https://land.copernicus.eu/global/products/lst#:~:text=The%20Land%20Surface%20Temperature%20(LST,direction%20of%20the%20remote%20sensor).

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA; CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL Y DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE. Identificación de Zonas y Formulación de Propuestas para el Tratamiento de Islas de Calor Municipio de Santiago de Cali. [En línea]. Santiago de Cali: CVC; CIAT y DAGMA, 2015 . [Citado el 7 de marzo de 2024]. Disponible en: http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/biblioteca/IDENTIFICACION_DE_ZONAS_Y_FORMULACION_DE_PROPUUESTAS_PARA_EL_TRATAMIENTO_DE_ISLAS_DE_CALOR-SANTIAGO_DE_CALI.pdf

DANKHE, 1986, citado por HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, Pilar. Metodología de la investigación. 2a. ed. México: McGraw-Hill, 2000. p. 60

DE ANDRÉS ANAYA, Paula. Temperatura superficial terrestre a partir de imágenes satelitales: herramienta para su cálculo [en línea]. Trabajo de grado. Escuela Politécnica Superior de Ávila, 2019. 185 p. [Consultado 25 junio 2023]. Disponible en: <https://gredos.usal.es/handle/10366/139879>

DIRECCIÓN DE TRÁNSITO DE BUCARAMANGA. Parque automotor del Área Metropolitana de Bucaramanga [diapositivas]. Bucaramanga: Dirección de Tránsito de Bucaramanga, 2022. 5 diapositivas. [Consultado 16 marzo 2024]. Disponible en: <https://transitobucaramanga.gov.co/dtb/wp-content/uploads/2023/01/PARQUE-AUTOMOTOR-AREA-METROPOLITANA-CORTE-31-DIC-2022.pdf>

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, citado por SOTO, José; GARZÓN, Julián y JIMÉNEZ, Gonzalo. Análisis de islas de calor urbano usando imágenes Landsat: caso de estudio Armenia- Colombia 1996-2018. Revista Espacios. 2020. p. 2.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Urban Heat Island Basics. [En línea]. Washington D.C.: Environmental Protection Agency, 2008. p. 13. [Citado el 15 de junio de 2024]. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-05/documents/reducing_urban_heat_islands_ch_1.pdf

FERNÁNDEZ CÓRDOBA, Jhonattan y GARCÍA MILLÁN, Nathalie. Caracterización de islas frescas urbanas -IFU- en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia. Entorno Geográfico [en línea]. 2013, enero - diciembre, 9. 122 - 144. [Consultado 13 marzo 2024]. ISSN 2382-3518. DOI: 10.25100/eg

FERNANDEZ, Felipe. Manual de climatología aplicada. clima, medio ambiente y planificación. 1996, citado por CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA; CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL Y DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE. Identificación de Zonas y Formulación de Propuestas para el Tratamiento de Islas de Calor Municipio Santiago de Cali. Santiago de Cali, 2015. p. 6.

GARTLAND, Lisa. *Heat Islands Understanding And Mitigating Heat In Urban Areas*. Londres: Earthscan, 2008. p. 15.

GIRALDO, Ana et al. Análisis de los Islotes de Calor Intra Urbanos en Bogotá, Colombia. ResearchGate [en línea]. 2022. p. 2. [Consultado 15 noviembre 2022]. DOI:10.13140/RG.2.2.27865.19044.

GUALDRÓN DÍAZ, Luz Adriana. Análisis de Islas de Calor Urbanas mediante imágenes satelitales e información georreferenciada en la ciudad de Bucaramanga, su materialidad y recomendaciones [en línea]. Trabajo de grado. Universidad Santo Tomás, 2023. 163 p. [Consultado 13 marzo 2024]. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/48514>

HEREHER, Mohamed. *Effect of land use/cover change on land surface temperatures - The Nile Delta, Egypt*. Journal of African Earth Sciences [en línea]. 2017, 126. 75 - 83. [Consultado 20 mayo 2024]. ISSN 1464-343. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2016.11.027.

HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, Pilar. Metodología de la investigación. 2a. ed. México: McGraw-Hill, 2000. p. 92

LANDSBERG, Helmut. *The Urban Climate*. Nueva York: Academic Press, 1981. p. 83.

NACIONES UNIDAS. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. [En línea]. Nueva York: Naciones Unidas, 2019. p. 21. [Citado el 18 de mayo de 2024]. Disponible en : <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. [sitio web]. Washington D.C.: NASA, *Land Surface Temperature*. [Consulta: 10 diciembre 2022]. Disponible en: https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MOD_LSTD_M

OROZCO ARQUEZ, Luz Angela. Análisis del fenómeno de islas de calor con sensores remotos y estaciones climáticas en Bogotá, Colombia [en línea]. Trabajo de grado. Universidad del Norte, 2020. 52 p. [Consultado 5 marzo 2024]. Disponible en: <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/9469#page=1>

PISCOYA PÉREZ, Lesly Rosario. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el distrito de Puquina, Moquegua [en línea]. Trabajo de grado. Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, 2019. 50 p. [Consulta: 12 diciembre 2022]. Disponible en: http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/bitstream/123456789/144/1/Piscoya_Lesly_Trabajo_Suficiencia_2019.pdf

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS. Estado Global de las Metrópolis 2020 - Folleto de Datos Poblacionales. Nairobi: ONU Habitat, 2020. p.4.

RANAGALAJE, M, *et al.* *An Urban Heat Island Study of the Colombo Metropolitan Area, Sri Lanka, Based on Landsat Data (1997–2017)*. International Journal of Geo-Information [en línea]. 2017, 6 (7). 189 . [Consultado 4 marzo 2024]. DOI: 10.3390/ijgi6070189

RODRÍGUEZ NAVAS, Jaime. Caracterización del poblamiento y la metropolización del territorio del área metropolitana de Bucaramanga. En: Revista IUSTITIA. Enero - diciembre 2012, nro. 10, pp. 38 - 40. ISSN 1692-9403.

SANTANA RODRÍGUEZ, Luis Marino; ESCOBAR JARAMILLO, Luis Alfonso y CAPOTE, Paolo Andrés. Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. Revista de geografía Norte Grande [en línea]. 2010, mayo, 45. 77 - 95. [Consultado 7 marzo 2024]. DOI: 10.4067/S0718-34022010000100006

SOBERÓN FORSBERG, Vanessa y OBREGÓN PÁRRAGA, Esaúl. Identificación de islas de calor en la ciudad de Lima Metropolitana utilizando imágenes del Satélite Landsat 5TM. *Anales Científicos* [en línea]. 2015, enero - junio, 77 (1). 34 - 44. [Consultado 4 marzo 2024]. ISSN 2519-7398. DOI: 10.21704/ac.v77i1.475

SUNDARA KUMAR, K, *et al.* *Estimation of Land Surface Temperature to Study Urban Heat Island Effect Using Landsat ETM+ Image*. *International Journal of Engineering Science and Technology* [en línea]. 2012, febrero, 4 (2). 771 - 778. [Consultado 4 marzo 2024]. ISSN: 0975-5462

UDDIN, A, *et al.* *A remote sensing classification for land-cover changes and micro-climate in Kuwait*. *International Journal of Sustainable Development and Planning* [en línea]. 2010, 19 (6). 367 - 377. [Consultado 18 junio 2023]. DOI: 10.2495/SDP-V5-N4-367-377

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. *Landsat 7 (L7) Data Users Handbook*. [En línea]. Versión 2.0. Sioux Falls: USGS, 2019. p. 78. [Consulta: 30 abril 2023]. Disponible en: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-7-data-users-handbook>

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*. [En línea]. Versión 3.0. Sioux Falls: USGS, 2019. p. 54. [Consulta: 5 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>

VILLAMIL ALMEIDA, Hildreth, *et al.* *Characterization of the urban heat island at Bucaramanga, Colombia, using real-time temperature monitoring*. *Redin: Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* [en línea]. 2020, octubre - diciembre, 97. 10 - 21. [Consultado: 13 enero 2023]. ISSN 0120-6230. DOI:10.17533/udea.redin.20191260.

WYPYCH, Sebastian y BOKWA, Anita. El clima en las ciudades. En : ENVIRONMENTAL SCIENCE. [sitio web]. Cracovia: Jagiellonian University. [Consulta 25 mayo 2024]. Disponible en: http://www.atmosphere.mpg.de/enid/2__Clima_Urbano/_Efecto_isla_de_calor_3x6.html

ANEXOS

Anexo A. Bases de datos de imágenes satelitales

Imágenes satelitales Landsat 7 ETM + y Landsat 8 OLI/TIRS usadas para la extracción de LST.

Satélite	Fecha (DD/MM/AA)	Nombre de archivo
Landsat 7 ETM +	13/02/2000	LE07_L1TP_007055_20000213_20200918_02_T1_B6
Landsat 8 OLI/TIRS	03/02/2020	LC08_L1TP_008055_20200203_20200823_02_T1_B10

Fuente: elaboración propia

Imágenes satelitales Landsat 7 ETM + y Landsat 8 OLI/TIRS usadas para la extracción de NDVI.

Satélite	Fecha (DD/MM/AA)	Nombre de archivo
Landsat 7 ETM +	13/02/2000	LE07_L1TP_007055_20000213_20200918_02_T1_B3
		LE07_L1TP_007055_20000213_20200918_02_T1_B4
Landsat 8 OLI / TIRS	03/02/2020	LC08_L1TP_008055_20200203_20200823_02_T1_B4
		LC08_L1TP_008055_20200203_20200823_02_T1_B5

Fuente: elaboración propia

Anexo B. Datos de temperatura superficial terrestre por división urbana.

Promedios de LST por comuna y área homogénea urbana en los municipios del AMB en los años 2000 – 2020.

BUCARAMANGA		
Comuna	Temperatura promedio (°C)	
	2000	2020
Cabecera del Llano	27,79	27,4
Centro	30,62	30,53
Ciudadela Real de Minas	28,22	29,07
García Rovira	28,12	28,96
La Concordia	30,07	30,11
La Pedregosa	28,03	28,82
Lagos del Cacique	26,68	27,63
Morrórico	25,55	25,95
Mutis	27,23	28,85
Nororiental	27,14	27,79
Norte	25,48	27,24
Occidental	26,61	28,54
Oriental	29,02	28,25
Provenza	27,60	28,76
San Francisco	30,41	29,73
Sur	26,31	28,91
Suroccidente	27,05	28,92

Fuente: elaboración propia

FLORIDABLANCA		
Comuna	Temperatura promedio (°C)	
	2000	2020
Bosque - Molinos	26,79	28,31
Bucarica	25,34	26,56
Cañaveral	25,35	28,03
Caldas - Reposo	28,21	29,66
Florida - Casco Antiguo	26,74	27,94
La Cumbre - El Carmen	25,93	28,18
Lagos - Bellavista	27,1	28,80
Valencia - Santana	28,33	30,03

Fuente: elaboración propia

GIRÓN		
Área homogénea urbana	Temperatura promedio (°C)	
	2000	2020
Arenales	27,1	30,57
Bellavista	26,21	29,67
Carrizal	26,09	28,97
Casco Antiguo	28,06	31,86
Chimita	26,35	29,7
El Palenque	28,1	30,22
El Poblado	27,98	30,84
La Aldea	26,21	30,21

La Esmeralda	26,42	29,2
Mesetas	25,45	29,29
Rincón de Girón	25,97	29,45

Fuente: elaboración propia

PIEDECUESTA		
Área homogénea urbana	Temperatura promedio (°C)	
	2000	2020
Casco Actual	26,3	29,24
Casco Antiguo	29,3	31,54

Fuente: elaboración propia

Anexo C. Datos de NDVI por división urbana.

BUCARAMANGA		
Comuna	NDVI promedio	
	2000	2020
Cabecera del Llano	0,14	0,14
Centro	0,06	0,06
Ciudadela Real de Minas	0,14	0,13
García Rovira	0,17	0,16
La Concordia	0,1	0,1
La Pedregosa	0,2	0,19
Lagos del Cacique	0,24	0,2
Morrórico	0,22	0,17
Mutis	0,17	0,17
Nororiental	0,2	0,18
Norte	0,28	0,22
Occidental	0,23	0,17
Oriental	0,12	0,12
Provenza	0,2	0,17
San Francisco	0,1	0,1
Sur	0,21	0,17
Suroccidente	0,24	0,22

Fuente: elaboración propia

FLORIDABLANCA		
Comuna	NDVI promedio	
	2000	2020
Bosque - Molinos	0,21	0,2
Bucarica	0,28	0,27
Cañaveral	0,28	0,22
Caldas - Reposo	0,17	0,16
Florida - Casco Antiguo	0,23	0,2
La Cumbre - El Carmen	0,24	0,2
Lagos - Bellavista	0,19	0,19
Valencia - Santana	0,15	0,15

Fuente: elaboración propia

GIRÓN		
Área homogénea urbana	NDVI promedio	
	2000	2020
Arenales	0,17	0,13
Bellavista	0,25	0,18
Carrizal	0,23	0,17
Casco Antiguo	0,16	0,13
Chimita	0,21	0,14
El Palenque	0,19	0,16

El Poblado	0,15	0,14
La Aldea	0,23	0,16
La Esmeralda	0,29	0,16
Mesetas	0,21	0,14
Rincón de Girón	0,24	0,15

Fuente: elaboración propia

PIEDRECUESTA		
Área homogénea urbana	NDVI promedio	
	2000	2020
Casco Actual	0,24	0,17
Casco Antiguo	0,13	0,11

Fuente: elaboración propia

Anexo D. ICU en terreno.

ICU en la diagonal 15 con carrera 16. Bucaramanga. Comuna La Concordia.



Fuente: elaboración propia

ICU en la calle 21 con carrera 15. Bucaramanga. Comuna San Francisco.



Fuente: elaboración propia

ICU en la calle 61a con carrera 18. Floridablanca. Comuna Caldas - Reposo.



Fuente: elaboración propia

ICU en la calle 30 con carrera 3E. Floridablanca. Comuna La Cumbre - El Carmen



Fuente: elaboración propia

ICU en la calle 30 con carrera 24. Girón. Área homogénea urbana Casco Antiguo.



Fuente: elaboración propia

ICU en el Estadio Villaconcha. Piedecuesta. Área homogénea urbana Casco Actual



Fuente: elaboración propia