



Evaluación de Técnicas de Análisis Espacial para la Detección de Islas de Calor  
Urbano: Caso de Estudio en el Centro de Bucaramanga

Modalidad: Proyecto de Investigación

Juan Diego Herrera Martínez  
CC. 1093780839

Oscar Ferney Ramírez Jaimes  
CC. 1102375618

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER**  
**Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería**  
**Ingeniería en Topografía**  
**Bucaramanga – 5 de marzo de 2026**



EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS ESPACIAL PARA LA DETECCIÓN DE  
ISLAS DE CALOR URBANO: CASO DE ESTUDIO EN EL CENTRO DE  
BUCARAMANGA

Modalidad: Proyecto de Investigación

Nombre completo Autor 1. Juan Diego Herrera Martínez  
CC. 1093780839

Nombre completo autor 2. Oscar Ferney Ramírez Jaimes  
CC. 1102375618

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Topógrafo**

**DIRECTOR**

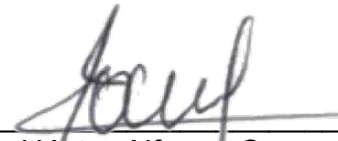
Clara Inés Torres Vásquez

Grupo de investigación – GRIMAT

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER**  
**Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería**  
**Ingeniería en Topografía**  
**Bucaramanga – 5 de marzo de 2026**

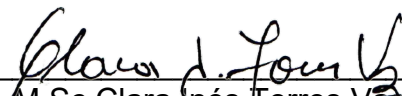
Nota de Aceptación

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por  
Las Unidades Tecnológicas de Santander para optar al título  
de Ingeniero Topógrafo  
Según acta #6 del Comité de Proyectos de Grado  
Del 13 de marzo de 2026  
Docente evaluador: M.Sc. Héctor Alfonso Correa Rangel  
Docente directora: M.Sc Clara Inés Torres Vásquez



---

M.Sc Héctor Alfonso Correa Rangel  
Firma del Evaluador



---

M.Sc Clara Inés Torres Vásquez  
Firma del Director

## DEDICATORIA

A mis padres, por su apoyo incondicional y los sacrificios que hicieron para que pudiera perseguir mis sueños académicos. A nuestra mentora Clara Inés Torres Vásquez, directora de este proyecto de investigación, cuya orientación experta y dedicación fueron esenciales para su realización. Dedico esta obra con profundo agradecimiento.

A mi familia, pilar constante en cada etapa de mi vida académica, y a las Unidades Tecnológicas de Santander, por brindarme un espacio de excelencia para el desarrollo profesional.

## AGRADECIMIENTOS

Nuestros más sinceros agradecimientos son para la MSc. Clara Inés Torres Vásquez, directora del Proyecto de Investigación de las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS), por su asesoría técnica especializada, orientación metodológica constante y liderazgo académico que permitió estructurar y consolidar cada fase de la investigación.

A las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS), por facilitar el acceso a bibliográficos esenciales para la recolección y análisis de datos.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>11</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>13</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>14</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	16
1.3. OBJETIVOS .....	17
1.3.1. OBJETIVO GENERAL .....	17
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
1.4. ESTADO DEL ARTE.....	18
<b>2. MARCO REFERENCIAL .....</b>	<b>25</b>
<b>3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>34</b>
<b>TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.....</b>	<b>35</b>
<b>FASES METODOLÓGICAS .....</b>	<b>37</b>
<b>FASE 1. ADQUISICIÓN Y PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....</b>	<b>37</b>
• DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO EN EL SECTOR CENTRO DE BUCARAMANGA. ....	37
• SELECCIÓN DE DIEZ PUNTOS ESTRATÉGICOS PARA LA TOMA DE DATOS, CONSIDERANDO CRITERIOS DE REPRESENTATIVIDAD URBANA (ZONAS COMERCIALES, VÍAS PRINCIPALES Y SECTORES CON DIFERENTE NIVEL DE EXPOSICIÓN TÉRMICA).....	37
• MEDICIÓN DE TEMPERATURA AMBIENTAL DURANTE DOCE DÍAS CONSECUTIVOS, OBTENIENDO UN TOTAL DE 120 REGISTROS. ....	37
• GEORREFERENCIACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO MEDIANTE GPS NAVEGADOR Y APLICACIONES MÓVILES.....	37
• ORGANIZACIÓN Y DEPURACIÓN DE LA BASE DE DATOS PARA SU POSTERIOR ANÁLISIS EN ENTORNO SIG.....	37
<b>FASE 2. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS GEOESPACIAL.....</b>	<b>37</b>
• INTEGRACIÓN DE LOS DATOS DE TEMPERATURA EN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA UTILIZANDO ARCGIS PRO Y QGIS. ....	37
• GENERACIÓN DE SUPERFICIES CONTINUAS DE TEMPERATURA MEDIANTE INTERPOLACIÓN POR DISTANCIA INVERSA PONDERADA (IDW).....	37
• APLICACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DE DENSIDAD KERNEL PARA IDENTIFICAR CONCENTRACIONES ESPACIALES DE VALORES ELEVADOS DE TEMPERATURA.....	37

- IMPLEMENTACIÓN DEL ANÁLISIS DE PUNTOS CALIENTES (HOT SPOT ANALYSIS – GETIS-ORD GI\*) PARA DETERMINAR LA EXISTENCIA DE AGRUPAMIENTOS ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVOS..... 37
- COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON CADA TÉCNICA PARA EVALUAR SU CAPACIDAD EN LA DETECCIÓN DE PATRONES TÉRMICOS..... 37
- FASE 3. INTERPRETACIÓN, VALIDACIÓN Y PROPUESTAS ..... 38**
- 4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO..... 39**
- 4.1. TÉCNICAS ..... 48**
- 4.1.1. INTERPOLACIÓN POR DISTANCIA INVERSA PONDERADA (IDW) ..... 48
- 4.1.2. ESTIMACIÓN DE DENSIDAD KERNEL (MAPA DE CALOR)..... 49
- 4.1.3. ANÁLISIS DE PUNTOS CALIENTES (HOT SPOT ANALYSIS) ..... 50
- 5. RESULTADOS..... 50**
- 5.1.1. PROCESAMIENTO DE DATOS..... 51
- 5.2. TECNICAS IDW, KERNEL Y HOT SPOT ..... 56**
- 5.2.1. IDW ..... 56
- 5.2.2. KERNEL DENSITY..... 69
- 5.2.3. HOT SPOT ..... 73
- 5.2.4. COMPARACION DE TECNICAS..... 75
- 6. CONCLUSIONES..... 83**
- 7. RECOMENDACIONES ..... 85**
- 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 86**
- 9. APÉNDICES ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 10. ANEXOS..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

## LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1. Fases del Proyecto.....	38
Ilustración 2. Sentinel-1 .....	42
Ilustración 3. Alos Palsar.....	42
Ilustración 4. Esri Land Cover .....	43
Ilustración 5. Esri Land Cover .....	44
Ilustración 6. Puntos Estratégicos de toma de temperatura.....	45
Ilustración 7. Localización zona de estudio .....	48
Ilustración 8. Carga de datos a ArcGIS Pro.....	51
Ilustración 9. Directional Distribution.....	51
Ilustración 10. Gráfico de probabilidad normal. ....	52
Ilustración 11. Vecino más cercano. ....	53
Ilustración 12. Reporte vecino más cercano.....	53
Ilustración 13. Polígono de voronoi. ....	54
Ilustración 14. Trend analysis. Fuente: Autores .....	55
Ilustración 15. Técnica IDW - Temp. Promedio (QGIS). ....	56
Ilustración 16. Técnica IDW - Temp. Promedio (ArcGIS Pro). ....	56
Ilustración 17. Técnica IDW - Dia 1 (QGIS). ....	57
Ilustración 18. Técnica IDW - Dia 1 (ArcGIS Pro). ....	57
Ilustración 19. Técnica IDW - Dia 2 (QGIS). ....	58
Ilustración 20. Técnica IDW - Dia 2 (ArcGIS Pro). ....	58
Ilustración 21. Técnica IDW - Dia 3 (QGIS). ....	59
Ilustración 22. Técnica IDW - Dia 3 (ArcGIS Pro). ....	59
Ilustración 23. Técnica IDW - Dia 4 (QGIS). ....	60
Ilustración 24. Técnica IDW - Dia 4 (ArcGIS Pro). ....	60
Ilustración 25. Técnica IDW - Dia 5 (QGIS). ....	61
Ilustración 26. Técnica IDW - Dia 5 (ArcGIS Pro). ....	61
Ilustración 27. Técnica IDW - Dia 6 (QGIS). ....	62
Ilustración 28. Técnica IDW - Dia 6 (ArcGIS Pro). ....	62
Ilustración 29. Técnica IDW - Dia 7 (QGIS). ....	63
Ilustración 30. Técnica IDW - Dia 7 (ArcGIS Pro). ....	63
Ilustración 31. Técnica IDW - Dia 8 (QGIS). ....	64
Ilustración 32. Técnica IDW - Dia 8 (ArcGIS Pro). ....	64
Ilustración 33. Técnica IDW - Dia 9 (QGIS). ....	65
Ilustración 34. Técnica IDW - Dia 9 (ArcGIS Pro). ....	65
Ilustración 35. Técnica IDW - Dia 10 (QGIS). ....	66
Ilustración 36. Técnica IDW - Dia 10 (ArcGIS Pro). ....	66
Ilustración 37. Técnica IDW - Dia 11 (QGIS). ....	67
Ilustración 38. Técnica IDW - Dia 11 (ArcGIS Pro). ....	67
Ilustración 39. Técnica IDW - Dia 12 (QGIS). ....	68
Ilustración 40. Técnica IDW - Dia 12 (ArcGIS Pro). ....	68
Ilustración 41. Kernel - estimación de núcleos radio 300. Temperatura promedio (QGIS). ....	69

Ilustración 42. Kernel - estimación de núcleos radio 150. Temperatura promedio (QGIS).	69
Ilustración 43. Kernel Temperatura promedio (ArcGIS).	69
Ilustración 44. Kernel - Dia 1 (ArcGIS Pro).	71
Ilustración 45. Kernel - Dia 3 (ArcGIS Pro).	71
Ilustración 46. Kernel – Dia 5 (ArcGIS Pro).	71
Ilustración 47. Kernel - Dia 7 (ArcGIS Pro).	71
Ilustración 48. Kernel - Dia 9 (ArcGIS Pro).	72
Ilustración 49. Kernel - Dia 11 (ArcGIS Pro).	72
Ilustración 50. Hot Spot Promedio Leyenda.	73
Ilustración 51. Hot Spot Promedio.	73
Ilustración 52. Histograma Hot Spot.	74
Ilustración 53, Comparación de técnicas. IDW - Kernel.	75
Ilustración 54. Comparación de técnicas. Temp. Promedio IDW – Hot Spot.	76
Ilustración 55. Comparación de técnicas. Dia 1 IDW – Hot Spot.	77
Ilustración 56. Comparación de técnicas. Dia 3 IDW – Hot Spot.	78
Ilustración 57. Comparación de técnicas. Dia 5 IDW – Hot Spot.	79
Ilustración 58. Comparación de técnicas. Dia 7 IDW – Hot Spot.	80
Ilustración 59. Comparación de técnicas. Dia 9 IDW – Hot Spot.	81
Ilustración 60. Comparación de técnicas. Dia 11 IDW – Hot Spot.	82

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Análisis exploratorio de los datos. .... 50

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de grado tiene como objetivo evaluar la aplicabilidad de diferentes técnicas de análisis espacial para la identificación de islas de calor urbano en el sector centro de Bucaramanga. La investigación se desarrolló a partir de la recolección de datos de temperatura ambiental mediante mediciones en diez puntos estratégicamente distribuidos, durante un periodo de doce días, obteniendo un total de 120 registros.

La metodología adoptada se fundamentó en un enfoque cuantitativo, empleando herramientas de Sistemas de Información Geográfica para el procesamiento y análisis de la información. Se aplicaron técnicas como la interpolación por distancia inversa ponderada (IDW), la estimación de densidad Kernel y el análisis de puntos calientes (Hot Spot Analysis), con el fin de identificar patrones espaciales y determinar la existencia de agrupamientos térmicos significativos.

Los resultados evidenciaron la presencia de patrones térmicos diferenciados dentro del área de estudio, destacándose zonas con mayor concentración de temperatura que coinciden espacialmente entre los distintos métodos aplicados. Asimismo, se identificó que, aunque la mayoría de los puntos no presentan significancia estadística, existen sectores específicos donde se manifiestan agrupamientos térmicos relevantes.

Se concluye que las técnicas de análisis espacial empleadas permiten identificar de manera efectiva la distribución térmica y la presencia de islas de calor urbano, siendo el análisis de puntos calientes el método que ofrece mayor soporte estadístico para la detección de estos fenómenos. Los resultados obtenidos

constituyen una base para la comprensión del comportamiento térmico urbano y aportan insumos para futuras investigaciones y estrategias de planificación territorial.

**PALABRAS CLAVE:** Islas de calor urbano, Análisis espacial, Temperatura urbana, Sistemas de Información Geográfica, Hot Spot Analysis.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado de Bucaramanga ha transformado profundamente su paisaje urbano, especialmente en el centro de la ciudad, donde la densidad de edificaciones, la escasez de vegetación y el predominio de materiales como el asfalto, concreto y metal han propiciado la aparición de islas de calor urbanas (ICU). Este fenómeno se manifiesta en el aumento de la temperatura del aire y de la superficie respecto a los sectores periféricos, generando efectos adversos en el confort térmico, la salud y el medio ambiente (Stewart & Oke, 2012; Ding, 2023). El centro de Bucaramanga, caracterizado por su intensa actividad económica y su compleja morfología urbana, presenta una configuración que limita la ventilación natural y favorece la acumulación térmica. Sin embargo, no existen estudios locales integrales que correlacionen la geometría urbana, las variables topográficas y la distribución térmica.

Ante ello, la ingeniería en topografía se presenta como una disciplina clave para abordar el problema desde una perspectiva técnica y cuantitativa. Mediante el uso de modelos digitales del terreno (MDT), levantamientos topográficos, teledetección y análisis geoespacial, es posible representar con precisión la morfología urbana, evaluar su influencia sobre el comportamiento térmico y localizar las zonas más vulnerables.

Este trabajo propone un enfoque topográfico para la detección y análisis de islas de calor urbanas en el centro de Bucaramanga, integrando variables morfométricas (pendiente, orientación, altitud) con datos térmicos superficiales. Los resultados permitirán identificar patrones térmicos, priorizar áreas críticas y fundamentar estrategias de mitigación ambiental, como corredores verdes, techos vegetales y pavimentos reflectantes que contribuyan a un desarrollo urbano sostenible y resiliente.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El sector centro de Bucaramanga, reconocido por su alta actividad comercial y administrativa, ha experimentado una transformación urbana caracterizada por el aumento de superficies impermeables, la densificación edificatoria y la reducción de áreas verdes. Estas condiciones han favorecido la aparición de islas de calor urbano, reflejadas en incrementos de la temperatura superficial y ambiental frente a otras zonas de la ciudad, afectando el confort térmico, el consumo energético y la calidad ambiental.

A pesar de esta problemática, en el contexto local no se dispone de estudios que permitan identificar y delimitar espacialmente estas zonas mediante metodologías cuantitativas basadas en datos de campo. La ausencia de este tipo de análisis limita la comprensión del comportamiento térmico del área y dificulta la formulación de estrategias de mitigación efectivas.

En este sentido, se hace necesario aplicar técnicas de análisis espacial que permitan detectar patrones de distribución de la temperatura y reconocer la existencia de agrupamientos térmicos significativos. La adecuada selección de estas metodologías es fundamental para garantizar resultados confiables y comparables dentro del área de estudio.

Por lo tanto, el problema de investigación radica en determinar qué técnicas de análisis de correlación espacial permiten establecer la existencia o no de islas de calor urbano en el centro de Bucaramanga, considerando las condiciones de muestreo y la disponibilidad de datos, con el fin de aportar información útil para la planificación urbana.

**Pregunta problema:**

¿Qué técnicas de análisis de correlación espacial se deben realizar para determinar la existencia o no de islas de calor urbano en una zona de estudio?

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

La presencia de islas de calor urbanas en el centro de Bucaramanga representa un desafío creciente para la sostenibilidad ambiental y la calidad de vida de sus habitantes. Su formación, producto de la alta densidad edificatoria, la escasa cobertura vegetal, el uso de materiales de alta retención térmica y el intenso tráfico vehicular, provoca incrementos significativos de temperatura que afectan la salud pública, elevan el consumo energético y deterioran la calidad del aire. Resolver esta problemática es fundamental porque permite mitigar impactos ambientales, reducir riesgos para la población vulnerable y mejorar las condiciones de habitabilidad en un área estratégica de la ciudad.

La propuesta busca identificar, mediante herramientas de teledetección y análisis geoespacial, las zonas críticas de calor en el centro de Bucaramanga, evaluando sus causas y determinando acciones de intervención sostenibles. Su desarrollo es relevante para las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS), ya que fortalece líneas de investigación relacionadas con la gestión ambiental, la planificación urbana y el uso de tecnologías geoespaciales, aportando al conocimiento aplicado y a la formación de profesionales con capacidad de proponer soluciones innovadoras.

Desde el punto de vista social, la implementación de medidas derivadas de este estudio podría mejorar el confort térmico urbano, fomentar espacios verdes y promover una movilidad más sostenible. En el ámbito tecnológico, la integración de datos satelitales, sistemas de información geográfica (SIG) y análisis térmico aporta metodologías replicables en otros contextos urbanos. Económicamente, la reducción del consumo energético y la prevención de problemas de salud asociados al calor extremo representan beneficios tangibles para la comunidad y las administraciones locales. En consecuencia, este trabajo no solo tiene valor académico y científico, sino que contribuye directamente a la construcción de ciudades más resilientes y habitables.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Determinar la aplicabilidad de técnicas de análisis espacial para la identificación de patrones térmicos asociados a islas de calor urbano, mediante el análisis geoestadístico de datos de temperatura en el sector centro de Bucaramanga.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Delimitar el área de estudio mediante información geoespacial y definir un esquema eficiente de recolección de datos de temperatura.
- Aplicar técnicas de análisis espacial, para identificar patrones de distribución de la temperatura.
- Comparar los resultados obtenidos mediante las diferentes técnicas de análisis espacial, evaluando sus alcances y limitaciones en la detección de patrones térmicos.
- Determinar la existencia de posibles islas de calor urbano en el área de estudio a partir de los patrones espaciales identificados.

## 1.4. ESTADO DEL ARTE

### ESPAÑA

En su trabajo, Alarcón Ruiz (2020) analiza el efecto “isla de calor” en grandes ciudades, enfocándose en la ciudad de Valencia mediante el estudio de la temperatura superficial de diferentes tipologías de cubiertas. El estudio propone la sustitución de cubiertas convencionales por cubiertas vegetales como posible solución para mitigar el cambio climático y promover una arquitectura sostenible. Además, evalúa la representación gráfica de termografías y su aplicación en la arquitectura sostenible, utilizando datos del satélite Landsat y mediciones con cámara termográfica Flir Vue Pro.

Este trabajo analiza la isla de calor urbana de Madrid durante julio de 2015. Los registros históricos de temperatura confirman que siguió el patrón de anteriores eventos: número elevado de días muy cálidos, pero sin alcanzar récords absolutos, y noches muy cálidas. El fenómeno de la isla de calor atmosférica estuvo presente casi todas las noches con una notable magnitud (entre 2 y 4 °C); por el contrario, durante las horas diurnas se registró una isla de frescor relativamente suave (< 1 °C). Las imágenes de satélite revelan que el campo térmico superficial experimentó idéntico ciclo diario, estrechamente ligado a los usos del terreno, con la formación de una isla de calor nocturna de una magnitud similar a la atmosférica, y una isla de frescor diurna igual de potente. La correlación entre la evolución temporal de ambas manifestaciones, al igual que el contraste espacial durante la noche más cálida, revela un comportamiento similar durante las horas nocturnas, lo cual ofrece perspectivas interesantes para la integración de ambas variables en estudios aplicados (Rasilla, Allende Álvarez, & Fernández García, 2016).

Este trabajo se enmarca en el contexto de los problemas de clima urbano existentes en las ciudades cálidas en verano, específicamente en la alta intensidad de isla de

calor de Madrid, y en la necesidad de proponer alternativas en los materiales de acabado de las ciudades, muy influyentes en este fenómeno. El objeto de estudio del trabajo es un proyecto de Refugio Climático en el entorno de un colegio de Madrid, cuyo propósito es crear un espacio urbano sostenible y seguro para los alumnos, y cuyos arquitectos han solicitado consejo para la selección de los materiales más apropiados en su diseño a las investigadoras del proyecto (Sánchez Sánchez, 2023).

## ECUADOR

El presente trabajo trata sobre los riesgos que presentan las islas de calor urbano (ICU) en el cantón Durán. Este término es poco escuchado, por lo que resulta conveniente tomar medidas de prevención para combatirlo. El estudio busca comprobar las causas y efectos de una ICU, para lo cual se utilizaron los manuales 42 y 58 de la CEPAL, aplicando las metodologías del marco lógico y de la evaluación multicriterio, con el fin de identificar alternativas de mitigación bajo la evaluación de criterios ante una futura implementación de las mismas (Campuzano Sotomayor, Vélez Reina, & Vera Reyes, 2019).

## ARGENTINA

Se presentan resultados de un estudio realizado en la ciudad de San Juan para la determinación de la Isla de Calor Urbana (ICU) en invierno y verano, continuando trabajos anteriores que demostraron la viabilidad de utilizar imágenes satelitales Landsat 5 TM+ para estimar la temperatura del aire. La información térmica se referenció con datos de una estación meteorológica y se extrapoló para ajustar la hora de registro, hallando una intensidad máxima de 5,0 °C en verano y 4,5 °C en invierno, con un patrón morfológico similar al límite urbano (Cúnsulo, Kurbán, Papparelli, & Montilla, 2013).

Este trabajo presenta estudios sobre las variaciones de clima y microclima a escala urbana y micro urbana. Para evaluar los resultados de los estudios se determina una definición del clima urbano “ideal”. Habiéndose realizado varias campañas de mediciones en la Ciudad de Buenos Aires, se presentan resultados que muestran diferencias de temperatura de 2–3 °C. Adicionalmente, se realizó un estudio de la isla de calor en Río Gallegos, ciudad de menor tamaño y población donde, a pesar de las condiciones climáticas y urbanas desfavorables, la intensidad de la isla de calor registró una diferencia de 4 °C. El trabajo presenta el estudio de microclima de un sector central de Buenos Aires analizando sus características, variaciones físicas, habitabilidad y condiciones de confort. Este ejemplo es indicativo de la utilidad del estudio en el campo proyectual y planificación urbana (De Schiller, Evans, & Katzschner, 2001).

El presente trabajo se desarrolla en el marco del curso “Islas de Calor Urbano” dictado por la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) de la Universidad Nacional de Rosario, junto al Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) y la Municipalidad de Rosario. Se plantea como objetivo explorar la viabilidad y los requerimientos para la implementación de “Centros de Refrescamiento” en la ciudad de Rosario, una medida de adaptación al cambio climático conocida como cooling centre y spray park, implementada en otras ciudades del mundo. Como se trata de una primera aproximación, la metodología de análisis FODA resulta conveniente para los fines perseguidos (Heredia, 2022).

## CHILE

En los últimos años, el cambio climático se ha manifestado con mayor intensidad, siendo una de las variables más notables el aumento de olas de calor y temperatura en las ciudades, lo que genera malestares y discomfort térmico tanto en las viviendas como en el espacio público. Este fenómeno, conocido como isla de calor urbano,

está estrechamente relacionado con el calentamiento global y el desarrollo urbano, así como con las actividades antropogénicas que emiten grandes cantidades de gases contaminantes y provocan un efecto invernadero que altera los climas locales (Huang Lin, 2021).

## MEXICO

En la ciudad de Hermosillo, Sonora, en las últimas décadas se han transformado el uso de suelo, la superficie urbana, la densidad poblacional, el tránsito vehicular y las actividades de la población, generando cambios en la climatología urbana que han hecho presente el fenómeno llamado isla de calor urbana (Mercado Maldonado, 2022), el cual deteriora las condiciones ambientales y de habitabilidad, principalmente en comunidades vulnerables de clima cálido seco (Ruiz, Correa & Cantón, 2012).

## COSTA RICA

Las islas de calor o islas térmicas se refieren al patrón térmico que se encuentra en sitios altamente urbanizados en el centro o en la periferia de las ciudades. Son generadas por la pérdida de cobertura vegetal, la cual es sustituida por superficies impermeables como las carreteras de asfalto, edificios de concreto, ladrillo y otros materiales de construcción, dando como resultado el cambio en el balance hídrico y radiativo superficial, generando, por lo tanto, aumentos en la temperatura de las áreas urbanizadas. La identificación de estas islas térmicas permite desarrollar medidas de adaptación en sitios puntuales de la ciudad.

Con el objetivo de conocer el comportamiento de las islas de calor en el Cantón de Curridabat, la Municipalidad de Curridabat (2019) realizó un análisis de las temperaturas de los últimos cuatro años obtenidas de imágenes satelitales LandSat 8. Los resultados reflejan un patrón de calentamiento diferenciado dependiendo del nivel de urbanización y la presencia de vegetación. Asimismo, se señala la relación

de estas islas de calor con diferentes grupos vulnerables de la población y la necesidad de tomar medidas considerando la situación actual y futura con los cambios probables del clima. Análisis relacionados con la vegetación remanente en el cantón muestran la importancia de tomar acciones sobre parches de bosques en propiedades privadas y prestar atención al espacio verde público por habitante, el cual muestra desigualdad según el distrito en el que se ubique.

## COLOMBIA

Los estudios sobre el fenómeno de isla de calor en Santiago de Cali son escasos; uno de ellos, desarrollado por Santana, Escobar y Capote en 2011, se enfocó únicamente en medir la isla de calor superficial mediante imágenes satelitales. En contraste, este trabajo describe la presencia y evolución de la isla de calor atmosférica a partir de la interpretación de series históricas de temperatura de estaciones de las redes meteorológicas nacional y regional, analizando sus tendencias con técnicas de estadística descriptiva (Cárdenas Triana & Muñoz Carrasco, 2020).

El proyecto titulado Estudio del crecimiento urbano con respecto al efecto isla de calor para establecer lineamientos de gestión energético ambiental en Bogotá pretende usar herramientas como los Sistemas de Información Geográfico (SIG), teledetección y geoestadística para realizar un análisis geográfico a nivel ambiental, socioeconómico y de infraestructura urbana, que permita establecer las causas de la contaminación térmica generada por el efecto llamado isla de calor urbano. En este sentido, se abordarán los siguientes temas: evaluación de la relación entre energía y medio ambiente, enfocada al análisis socioeconómico de las variables uso del suelo y actividad económica, teniendo como base el procesamiento geoestadístico de imágenes multiespectrales, bases de datos geográficos y visitas a campo. También se formularán planes de acción que mitiguen el efecto isla de

calor en las zonas con mayor acumulación de calor en la ciudad, con el objetivo de buscar la disminución de la temperatura urbana mediante lineamientos de gestión energética y ambiental (Gómez Forero & Castañeda Rodríguez, 2013).

En este trabajo se realizó una revisión y caracterización del fenómeno de las islas de calor urbano (ICU), considerando las técnicas utilizadas para su cálculo, predicción, simulación y representación. Asimismo, se analizaron las herramientas empleadas a nivel mundial para prevenir o mitigar esta problemática y se evaluó su comportamiento en relación con los Instrumentos de Planeación y Gestión del Suelo (IPGS) de forma local, aplicando una de las técnicas identificadas para calcular y representar la ICU en Bogotá y Medellín (Montoya Morales & Castellanos Jiménez, 2020).

La isla de calor urbana (ICU) es un fenómeno presente en todas las ciudades del mundo, asociado con el aumento de superficies duras y la pérdida de cobertura vegetal, lo que genera incrementos de temperatura, mayor demanda energética y reducción en la calidad de vida. En un estudio realizado para el Valle de Aburrá, se utilizaron datos existentes sobre la ICU para identificar variables relevantes y segmentar el área en tres tipologías según urgencia, con base en la temperatura superficial promedio y la cobertura vegetal. A partir de buenas prácticas implementadas en otras ciudades, se propusieron medidas replicables en el territorio y se estimaron sus beneficios tanto teóricamente como mediante datos de campo, apoyados por el semillero y proyectos de investigación del SITE. Finalmente, se seleccionaron barrios piloto para ejemplificar la implementación de dichas medidas (Palacio Chaverra, 2019).

El cambio en el uso del suelo y el crecimiento urbano han activado el fenómeno de islas de calor urbano, que consiste en la acumulación de calor debido a las propiedades térmicas de los materiales de construcción, causando un aumento de

la temperatura urbana. Este estudio tuvo como objetivo caracterizar dicho fenómeno y detectar su relación con la pérdida de vegetación en una ciudad colombiana utilizando imágenes Landsat. Mediante técnicas de discriminación de coberturas y un algoritmo monocanal para la corrección de la temperatura de brillo, se encontró una correlación negativa entre temperatura y vegetación (Soto-Soto, Garzón-Barrero, & Jiménez-Cleves, 2020).

## 2. MARCO REFERENCIAL

Los marcos referenciales constituyen la base conceptual y contextual que orienta el desarrollo de una investigación. En ellos se integran los antecedentes, teorías y enfoques científicos que sustentan el análisis del problema de estudio. En el caso de esta investigación que está centrada en la detección de islas de calor urbanas mediante técnicas de ingeniería en topografía, los marcos referenciales permiten vincular la teoría del clima urbano, la geomorfología, la ecología urbana y la geoinformación, con la realidad territorial y social del centro de Bucaramanga.

Estos marcos no solo contextualizan el fenómeno desde el punto de vista físico y ambiental, sino que también aportan una visión interdisciplinaria, en la que la topografía se integra con el análisis térmico, la planificación urbana y la gestión sostenible del territorio.

### MARCO TEORICO

La isla de calor urbana (ICU) es un fenómeno climático en el cual las zonas urbanizadas registran temperaturas del aire y de la superficie superiores a las de sus áreas circundantes menos urbanizadas o con mayor cobertura vegetal. Este aumento térmico está asociado a la sustitución de suelos naturales por superficies artificiales como asfalto, concreto y cubiertas metálicas, materiales que absorben radiación solar durante el día y la liberan gradualmente en horas posteriores, reduciendo el enfriamiento nocturno en la ciudad (Oke, 1982; Oke et al., 2017). Como resultado, se generan diferencias térmicas significativas entre sectores urbanos densamente construidos y zonas periféricas.

El efecto de isla de calor urbana se explica a partir del balance energético urbano y de la interacción entre la morfología de las edificaciones y los flujos de radiación. Variables como las propiedades térmicas de los materiales, la impermeabilización

del suelo, la densidad edificatoria y la geometría urbana influyen en la retención de calor. En particular, la configuración de calles estrechas y edificaciones altas genera el denominado “efecto cañón urbano”, que limita la ventilación y favorece la acumulación térmica. A esto se suman fuentes antropogénicas de calor, como el tráfico vehicular y los sistemas de climatización (Oke et al., 2017; Su, 2021).

En América Latina, diversos estudios han evidenciado la presencia de islas de calor tanto en grandes ciudades como en centros urbanos intermedios, donde la reducción de áreas verdes y el aumento de superficies impermeables generan núcleos térmicos críticos que afectan la habitabilidad urbana (Carranza del Águila et al., 2024). En Colombia, la investigación sobre este fenómeno ha incorporado mediciones directas de temperatura, análisis de temperatura superficial mediante sensores satelitales y el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). En el caso de Bucaramanga, estudios previos han identificado variaciones térmicas intraurbanas y la existencia de sectores con mayor acumulación de calor, especialmente en zonas céntricas con alta densidad edificatoria (Villamil-Almeida et al., 2020).

Para el análisis espacial de este fenómeno, es fundamental el uso de técnicas que permitan modelar, interpolar y evaluar la distribución de la temperatura en el territorio. Entre estas, las técnicas de interpolación espacial permiten estimar valores en ubicaciones no muestreadas a partir de datos puntuales. Métodos determinísticos como la interpolación por distancia inversa ponderada (IDW) se basan en la proximidad entre puntos, asignando mayor peso a los valores cercanos.

Por su parte, los métodos geoestadísticos, como el Kriging, incorporan la estructura de autocorrelación espacial de los datos a través del análisis del semivariograma, el cual describe cómo varía la similitud entre valores en función de la distancia. El

Kriging permite obtener estimaciones óptimas y no sesgadas, minimizando el error de predicción y considerando la dependencia espacial, lo que lo convierte en una de las técnicas más robustas para la interpolación de variables ambientales cuando se dispone de suficientes datos espaciales.

Adicionalmente, la estimación de densidad Kernel es una técnica no paramétrica que permite identificar concentraciones espaciales de valores elevados, facilitando la visualización de zonas con mayor intensidad térmica. Esta herramienta es ampliamente utilizada en análisis exploratorios para detectar patrones espaciales preliminares.

Asimismo, los métodos de autocorrelación espacial permiten evaluar si la distribución de una variable en el espacio es aleatoria o presenta patrones de agrupamiento. El índice de Moran global es una medida que determina la existencia de autocorrelación espacial, mientras que los indicadores locales de asociación espacial permiten identificar clusters específicos. En este contexto, el análisis de puntos calientes (Hot Spot Analysis), basado en el estadístico Getis-Ord  $G_i^*$ , identifica agrupamientos estadísticamente significativos de valores altos o bajos, siendo una herramienta clave en la delimitación de islas de calor urbano.

En este contexto, la integración de técnicas de análisis espacial mediante SIG permite no solo representar la distribución de la temperatura, sino también identificar patrones, tendencias y zonas críticas dentro del área de estudio. Estas herramientas constituyen un soporte fundamental para la toma de decisiones en planificación urbana y mitigación de los efectos asociados a las islas de calor, especialmente en sectores altamente urbanizados como el centro de Bucaramanga.

## MARCO LEGAL

El desarrollo de este trabajo se enmarca en la normatividad colombiana vigente en materia ambiental, ordenamiento territorial y acción climática, y en la regulación local del uso del suelo en Bucaramanga. Este marco jurídico define obligaciones concretas para las entidades territoriales frente a la mitigación de condiciones microclimáticas urbanas como las islas de calor.

### **Constitución Política de Colombia (1991).**

El artículo 79 reconoce el derecho colectivo a gozar de un ambiente sano y ordena al Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente. Este mandato convierte la calidad ambiental urbana y el confort térmico ciudadano en una responsabilidad pública, especialmente en sectores densamente poblados donde el estrés térmico puede comprometer la salud y la habitabilidad (Constitución Política de Colombia, 1991).

### **Ley 99 de 1993.**

Crea el Ministerio del Medio Ambiente y organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). La ley afirma que la gestión ambiental es una función pública prioritaria y exige la prevención, mitigación y corrección de impactos que afecten la calidad del aire y las condiciones de bienestar de la población urbana (República de Colombia, 1993). En zonas con sobrecalentamiento urbano, como las islas de calor, esta obligación implica adoptar medidas locales que disminuyan la exposición de la ciudadanía a temperaturas elevadas sostenidas.

### **Ley 388 de 1997.**

Regula el ordenamiento del territorio municipal mediante los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) e impone la incorporación de determinantes ambientales, infraestructura verde y espacio público en la planificación urbana

(República de Colombia, 1997). A partir de esta ley, la protección y ampliación de la estructura ecológica urbana, la arborización y el espacio público verde pasan a ser instrumentos obligatorios de mejoramiento de la calidad ambiental y habitabilidad urbana.

#### **Acuerdo Municipal 011 de 2014.**

El Concejo Municipal de Bucaramanga adoptó el Plan de Ordenamiento Territorial 2014–2027, definiendo el modelo territorial de la ciudad, la clasificación de usos del suelo urbano y la importancia estratégica de la estructura ecológica urbana y del arbolado urbano para la habitabilidad y el confort térmico (Concejo Municipal de Bucaramanga, 2014). El POT reconoce la necesidad de consolidar conectividad ecológica, fortalecer el espacio público verde y proteger la cobertura vegetal urbana como herramientas de mitigación ambiental y climática en los sectores más densos de la ciudad.

#### **Ley 1931 de 2018.**

Establece el marco de la gestión del cambio climático en Colombia, articulando Nación, departamentos y municipios para la adaptación y la mitigación. La norma exige reducir la vulnerabilidad de la población frente a los efectos del cambio climático y obliga a integrar el riesgo climático —incluido el sobrecalentamiento urbano y el estrés térmico— en la planeación territorial (República de Colombia, 2018). Entre sus instrumentos se encuentran los Planes Integrales de Gestión del Cambio Climático Territorial (PIGCCT), que deben identificar amenazas climáticas locales y definir medidas de adaptación diferenciales según la vulnerabilidad social.

#### **Ley 2169 de 2021.**

Define la acción climática como una política de Estado para la carbono neutralidad y la resiliencia climática, y reconoce la necesidad de intervención a escala urbana

mediante infraestructura verde, eficiencia energética y soluciones basadas en la naturaleza (República de Colombia, 2021). Esta ley convierte la adaptación climática urbana y la protección de la población frente a altas temperaturas en una obligación permanente de las entidades territoriales.

### **MARCO AMBIENTAL**

La metodología propuesta para la detección de islas de calor en el centro de Bucaramanga se basa en técnicas de teledetección térmica, análisis geoespacial mediante SIG, generación de Modelos Digitales de Superficie y verificación puntual de campo. Estas actividades no implican remoción de cobertura vegetal, tala de arbolado urbano, excavaciones, vertimientos, ocupación de rondas hídricas ni modificación física del suelo. Tampoco generan descargas sobre cuerpos de agua ni introducen sustancias contaminantes en ecosistemas. Por tanto, el impacto ambiental directo sobre agua, suelo y biodiversidad se considera nulo o mínimo (Villamil-Almeida et al., 2020).

Respecto al aire, las mediciones en el sitio requieren desplazamientos puntuales del equipo humano y uso de instrumentación portátil, lo cual puede generar emisiones marginales asociadas al transporte. Sin embargo, estas emisiones no constituyen una fuente significativa ni sostenida de contaminación atmosférica en el área de estudio. No se prevé afectación relevante a la calidad del aire urbano atribuible a la ejecución del proyecto.

El principal efecto ambiental del trabajo es indirecto y positivo. Al identificar espacialmente las islas de calor en el centro de Bucaramanga, la investigación genera información técnica que puede orientar decisiones municipales de adaptación climática tales como: aumentar y conectar áreas verdes urbanas; diseñar corredores verdes y techos verdes; priorizar zonas de sombra y refugio

térmico en el espacio público; y promover materiales de cubierta y pavimento con mayor reflectancia y menor inercia térmica (Concejo Municipal de Bucaramanga, 2014; República de Colombia, 2018, 2021; Su, 2021). Estas medidas coinciden con las estrategias de infraestructura verde y resiliencia climática reconocidas por la legislación colombiana reciente y por la literatura científica sobre mitigación de la isla de calor urbana (Oke et al., 2017; Carranza del Águila et al., 2024).

## MARCO CONCEPTUAL

Para efectos de este trabajo de grado se adoptan definiciones operativas de los conceptos fundamentales que estructuran la metodología de análisis de islas de calor urbana. Estas definiciones no se presentan como glosario aislado, sino como categorías funcionales dentro del proceso de medición, interpretación espacial y propuesta de mitigación.

### **Isla de calor urbana (ICU).**

Se entenderá como el sector urbano en el que la temperatura del aire o de la superficie es significativamente más alta que en áreas rurales o periurbanas de referencia. Esta diferencia térmica se asocia con la sustitución de coberturas naturales por superficies artificiales de alta absorción térmica, la emisión de calor antropogénico y la baja presencia de infraestructura verde (Oke, 1982; Oke et al., 2017). En términos operativos para este proyecto, una ICU se identifica como un 'punto caliente' urbano persistente que coincide espacialmente con alta densidad edificatoria y bajo sombreado vegetal (Villamil-Almeida et al., 2020).

### **Temperatura superficial terrestre.**

Corresponde a la temperatura estimada en la superficie expuesta (cubiertas de techos, pavimentos, suelos desnudos, copas de árboles), calculada a partir de bandas térmicas de sensores remotos satelitales. En este trabajo, la LST será usada

para mapear espacialmente la distribución de calor superficial en el centro de Bucaramanga y para comparar la intensidad térmica entre diferentes subzonas urbanas (Villamil-Almeida et al., 2020).

### **Teledetección térmica.**

Conjunto de técnicas que permiten obtener información física de la superficie terrestre sin contacto directo, mediante sensores remotos aéreos o satelitales. Su propósito en este proyecto es identificar patrones espaciales de sobrecalentamiento, establecer gradientes térmicos intraurbanos y reconocer áreas críticas que requieren intervención ambiental (Oke et al., 2017).

### **Sistema de Información Geográfica (SIG).**

Software GIS para capturar, almacenar, integrar, analizar y representar información georreferenciada. En el presente trabajo, el SIG se utilizará para superponer las capas de temperatura superficial, uso y cobertura del suelo, densidad edificatoria, altura de las construcciones y presencia de zonas verdes, con el fin de explicar por qué se forman las islas de calor en sectores específicos del centro de la ciudad (Villamil-Almeida et al., 2020).

### **Modelo Digital de Elevación.**

Representación tridimensional continua de las elevaciones de todos los objetos visibles sobre el terreno (edificaciones, copas arbóreas, mobiliario urbano, etc.). El MDS permite analizar el encajonamiento urbano, las zonas de sombra y la posible ventilación entre edificaciones, factores directamente asociados con la acumulación térmica en cañones urbanos (Oke, 1982; Oke et al., 2017).

### **Corredor verde.**

Conjunto planificado de elementos vegetales, arbolado vial, franjas arborizadas, parques de bolsillo, techos verdes, jardines verticales insertados en la malla urbana para reducir la temperatura superficial, mejorar el confort térmico y aumentar la resiliencia climática local. En la gestión urbana contemporánea, esta infraestructura se reconoce como medida prioritaria de adaptación al cambio climático y mitigación de islas de calor urbanas, especialmente en sectores densos con déficit de sombra y permeabilidad del suelo (Carranza del Águila et al., 2024; Ley 1931 de 2018; Ley 2169 de 2021).

### 3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño de la investigación establece el marco metodológico mediante el cual se aborda el análisis de las islas de calor urbano en el sector centro de Bucaramanga. En este sentido, se estructura una estrategia que integra la recolección de datos en campo con el uso de herramientas de análisis espacial, permitiendo evaluar la distribución térmica del área de estudio y la aplicabilidad de diferentes técnicas para su representación. Este enfoque busca garantizar coherencia entre los objetivos planteados, la disponibilidad de datos y los métodos seleccionados para su análisis.

- **Tipo de investigación: Exploratoria-aplicada.**

Se orienta a comprender la distribución espacial y temporal de las islas de calor en un contexto urbano específico, aplicando técnicas topográficas y geoespaciales con fines prácticos de mitigación ambiental.

- **Enfoque: Mixto (cuantitativo y cualitativo).**

El enfoque cuantitativo permite medir, modelar y correlacionar variables térmicas, topográficas y urbanas. El cualitativo incorpora elementos de percepción ambiental y contexto social-territorial.

- **Método: Analítico-computacional,**

combinando levantamientos topográficos, teledetección y análisis SIG para caracterizar el fenómeno térmico urbano.

El diseño metodológico adoptado responde a las condiciones reales de disponibilidad de datos y a las características del área de estudio. Si bien existen técnicas geoestadísticas avanzadas para el análisis espacial, la selección de los

métodos empleados se fundamentó en la densidad y distribución de los puntos de muestreo, así como en la necesidad de obtener resultados comparables y representativos. En este sentido, la investigación prioriza la coherencia entre los datos recolectados y las técnicas aplicadas, garantizando la validez de los resultados obtenidos.

### Técnicas e instrumentos

- Técnicas de recolección de datos:
  - Medición de temperatura ambiental: Se realizó la toma de datos de temperatura en diez puntos estratégicamente distribuidos dentro del área de estudio durante doce días, obteniendo un total de 120 registros. Estas mediciones permitieron construir una base de datos representativa del comportamiento térmico del sector.
  - Georreferenciación de puntos: La ubicación de los puntos de muestreo se realizó mediante GPS navegador y aplicaciones móviles, garantizando su correcta localización espacial para el análisis posterior.
  
- Técnicas de análisis espacial:

Para el procesamiento y análisis de los datos se emplearon técnicas de análisis espacial implementadas en ArcGIS Pro y QGIS, entre las cuales se destacan:

  - Interpolación por Distancia Inversa Ponderada (IDW): Utilizada para generar superficies continuas de temperatura a partir de los datos puntuales, asignando mayor influencia a los valores cercanos.
  - Estimación de Densidad Kernel: Empleada para identificar concentraciones espaciales de valores elevados de temperatura, facilitando la detección de zonas con mayor intensidad térmica.

- **Análisis de Puntos Calientes (Hot Spot Analysis – Getis-Ord Gi):** Aplicado para determinar la existencia de agrupamientos estadísticamente significativos de altas y bajas temperaturas dentro del área de estudio.
- **Teledetección: Imágenes satelitales (Landsat, Sentinel-2)** para derivar la temperatura superficial (LST) y análisis multitemporal.
- **SIG y análisis geoespacial:** Integración de datos topográficos, térmicos y de cobertura del suelo en software como ArcGIS Pro o QGIS.
- **Técnicas no implementadas:**

Dentro del análisis espacial, se consideró el uso de métodos geoestadísticos como el Kriging, el cual permite generar interpolaciones más robustas al incorporar la autocorrelación espacial mediante el análisis del semivariograma. Sin embargo, este método requiere una mayor densidad de puntos de muestreo (generalmente superior a 40–50 puntos distribuidos espacialmente) para garantizar resultados confiables.

En el presente estudio, al contar con diez puntos de medición, la aplicación de Kriging podría generar estimaciones poco representativas. Por esta razón, se optó por utilizar métodos más adecuados a la escala y cantidad de datos disponibles, como IDW y técnicas de análisis de patrones espaciales.

## Fases metodológicas

### Fase 1. Adquisición y preparación de la información

- Delimitación del área de estudio en el sector centro de Bucaramanga.
- Selección de diez puntos estratégicos para la toma de datos, considerando criterios de representatividad urbana (zonas comerciales, vías principales y sectores con diferente nivel de exposición térmica).
- Medición de temperatura ambiental durante doce días consecutivos, obteniendo un total de 120 registros.
- Georreferenciación de los puntos de muestreo mediante GPS navegador y aplicaciones móviles.
- Organización y depuración de la base de datos para su posterior análisis en entorno SIG.

### Fase 2. Procesamiento y análisis geoespacial

- Integración de los datos de temperatura en un Sistema de Información Geográfica utilizando ArcGIS Pro y QGIS.
- Generación de superficies continuas de temperatura mediante interpolación por distancia inversa ponderada (IDW).
- Aplicación de la estimación de densidad Kernel para identificar concentraciones espaciales de valores elevados de temperatura.
- Implementación del análisis de puntos calientes (Hot Spot Analysis – Getis-Ord  $G_i^*$ ) para determinar la existencia de agrupamientos estadísticamente significativos.
- Comparación de los resultados obtenidos con cada técnica para evaluar su capacidad en la detección de patrones térmicos.

### Fase 3. Interpretación, validación y propuestas

- Análisis de los patrones espaciales identificados y delimitación de zonas con mayor intensidad térmica.
- Interpretación de los resultados en función de las características urbanas del área de estudio.
- Evaluación de la efectividad de las técnicas aplicadas en la identificación de islas de calor urbano.
- Formulación de conclusiones orientadas a la selección de métodos adecuados para estudios similares.

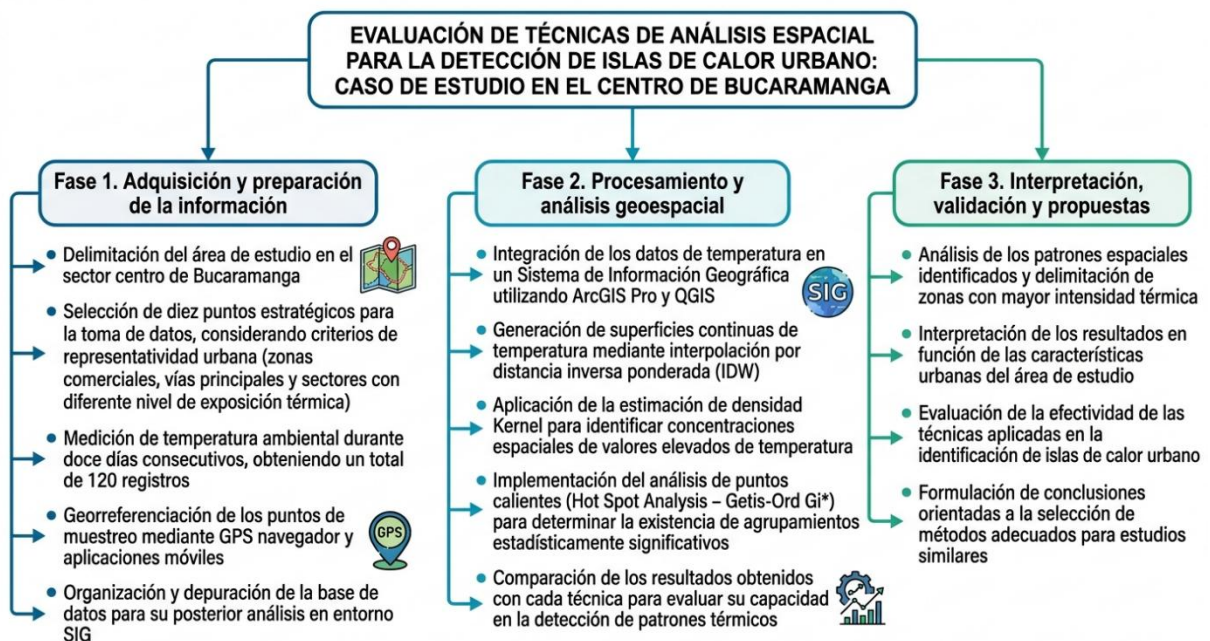


Ilustración 1. Fases del Proyecto. Fuente: Autores

#### **4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO**

El desarrollo del presente proyecto se fundamenta en la aplicación de técnicas de ingeniería en topografía, teledetección y análisis geoespacial, orientadas a la identificación y caracterización de islas de calor urbanas (ICU) en el centro de Bucaramanga.

En primera instancia, se realizó una revisión exhaustiva de literatura científica, presentada en el apartado 1.4 – Estado del Arte, donde se recopilaron y analizaron 15 investigaciones relevantes sobre el fenómeno de las ICU, clasificadas según su alcance internacional, nacional y local. Este análisis permitió reconocer los principales avances metodológicos y tecnológicos implementados en diferentes contextos geográficos, especialmente en torno al uso de sensores remotos, índices espectrales e integración de datos en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Entre los estudios revisados, se destacan investigaciones provenientes de España, Chile, México, Argentina, Brasil, Panamá, Costa Rica, Perú y Colombia, las cuales aportaron información clave sobre la relación entre la morfología urbana, el uso del suelo, la cobertura vegetal y los materiales de construcción con la intensidad térmica de las zonas urbanas.

Los hallazgos más relevantes evidencian que las metodologías más efectivas para el estudio del fenómeno combinan el procesamiento de imágenes satelitales Landsat, la estimación de la temperatura superficial terrestre (LST) mediante bandas térmicas y la modelación espacial de variables morfológicas y ambientales dentro de entornos SIG. Estos enfoques han demostrado ser eficientes para la detección de áreas críticas de acumulación térmica, la evaluación del confort urbano y la formulación de estrategias de mitigación ambiental.

Con base en esta revisión comparativa, se seleccionaron las técnicas y herramientas más pertinentes al contexto urbano de Bucaramanga, priorizando la aplicación de teledetección multitemporal, clasificación de coberturas del suelo y modelamiento térmico geoespacial como pilares metodológicos del proyecto.

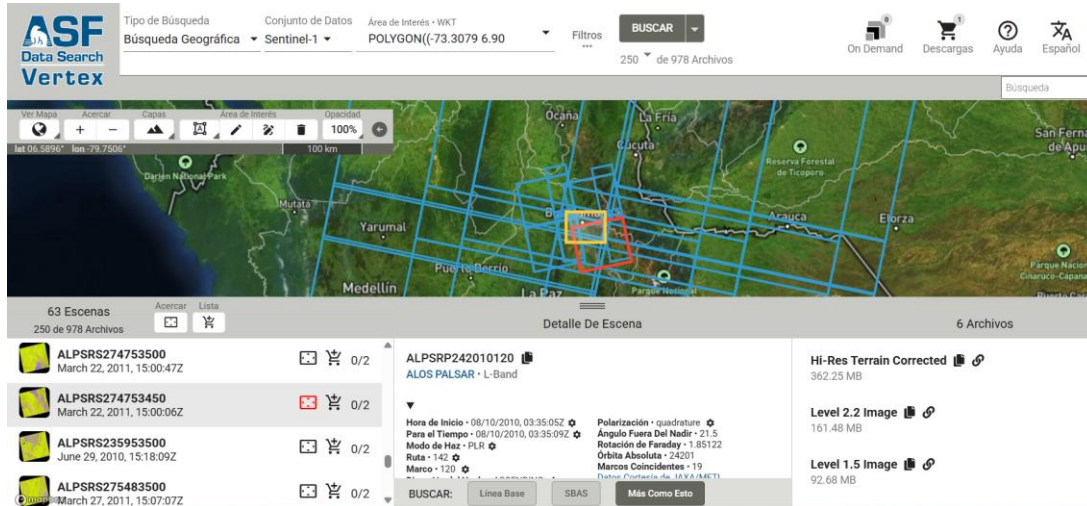
Para el análisis técnico, se recopilaron diversos insumos geoespaciales provenientes de fuentes satelitales y plataformas oficiales, los cuales constituyen la base del análisis multitemporal del comportamiento térmico urbano.

Se descargó un Modelo Digital de Elevación (MDE) con resolución adecuada para representar la morfología del terreno en el centro de Bucaramanga. Este insumo permitió calcular variables topográficas esenciales como pendiente, altitud y orientación, determinantes en la distribución térmica y en la ventilación natural del área de estudio.

Asimismo, se emplearon imágenes satelitales Landsat 8 OLI/TIRS y Sentinel-1 SAR, seleccionando escenas representativas de los años 2017 y 2024 con el objetivo de analizar los cambios en la cobertura del suelo y la temperatura superficial ocurridos durante dicho período. Las imágenes Landsat fueron procesadas para obtener la LST y calcular índices espectrales como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y el NDBI (Índice de Construcción Normalizada), que permitieron correlacionar la vegetación y las superficies impermeables con la temperatura. Por su parte, los datos Sentinel-1 se utilizaron para complementar la caracterización morfológica y estructural del entorno urbano mediante información de radar.

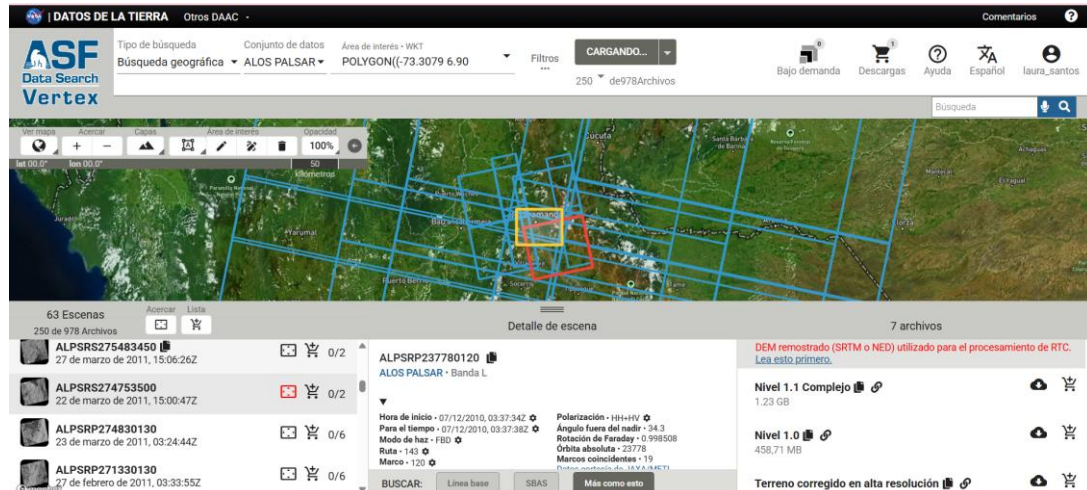
El tratamiento y análisis de la información se desarrollaron en un entorno SIG, integrando los resultados de teledetección con las variables topográficas obtenidas del MDE. Este procedimiento permitió generar cartografía temática y modelos térmicos geospaciales, identificando las zonas críticas del fenómeno y estableciendo la base técnica para la formulación de estrategias de mitigación ambiental en el centro de Bucaramanga.

Ilustración 2. Sentinel-1



Fuente: <https://n9.cl/uzsni>

Ilustración 3. Alos Palsar

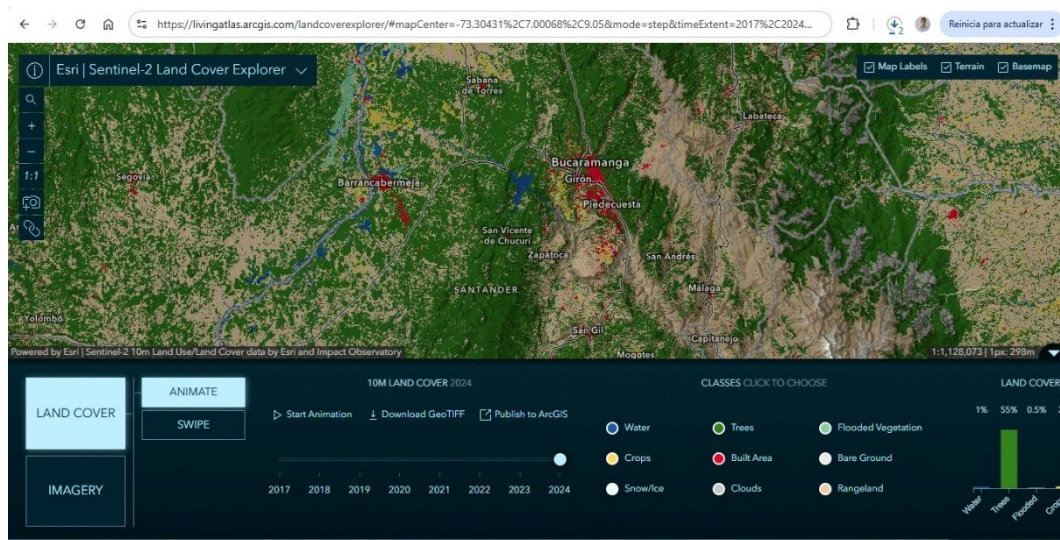


Fuente: <https://n9.cl/h5h1k>

Adicionalmente, se integraron datos provenientes del Esri Land Cover, los cuales permitieron complementar la caracterización del entorno urbano y natural del área de estudio. A partir de esta fuente, se extrajeron las clases de cobertura

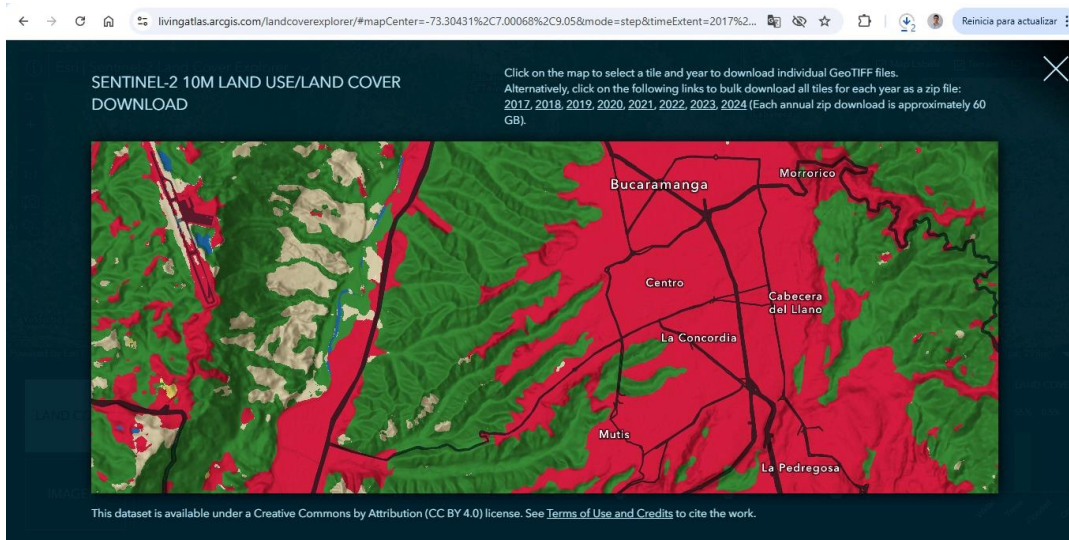
correspondientes al nivel 7, que agrupan las áreas construidas tipo 1 y tipo 2, junto con las coberturas vegetales identificadas como bosques, pastos y vegetación arbustiva. Esta información resultó fundamental para diferenciar las superficies impermeables de las zonas con presencia de vegetación, facilitando la interpretación espacial de la distribución térmica en el centro de Bucaramanga.

Ilustración 4. Esri Land Cover



Fuente: <https://n9.cl/r4qh1>

### Ilustración 5. Esri Land Cover



Fuente: <https://n9.cl/r4qhI>

Adicionalmente, se llevaron a cabo jornadas de recolección de información en campo mediante la inspección directa de diez (10) puntos definidos como estratégicos dentro del área de estudio. Esta actividad tuvo como objetivo diagnosticar las condiciones y características propias de cada punto, facilitando la verificación in situ de la información disponible y su correlación con los datos recopilados. Con ello, se fortaleció la confiabilidad del análisis geoespacial y la consistencia de los resultados obtenidos.

Ilustración 6. Puntos Estratégicos de toma de temperatura



### Descripción de la zona

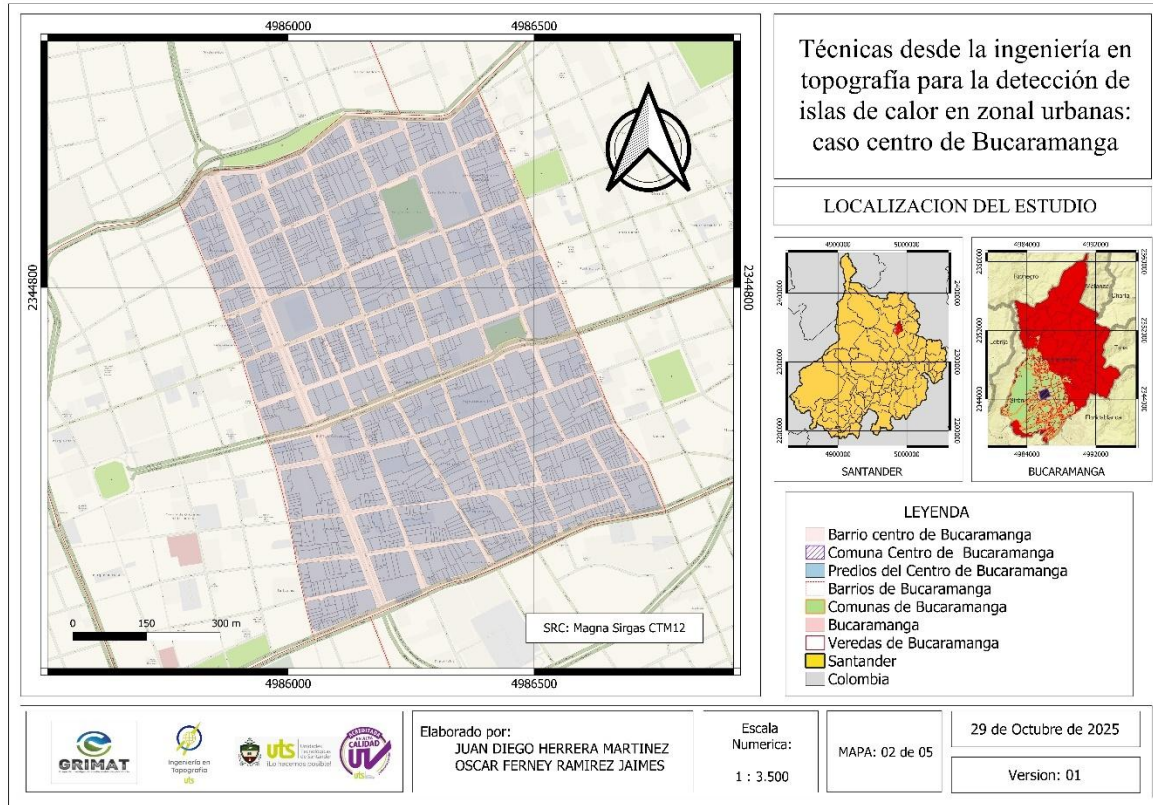
El área de estudio corresponde a la Comuna 15 – Centro, ubicada en el corazón del municipio de Bucaramanga, capital del departamento de Santander, Colombia. Esta comuna comprende el barrio Centro, considerado el núcleo histórico, administrativo, financiero y comercial de la ciudad. En esta zona convergen importantes ejes viales, instituciones públicas, entidades bancarias, establecimientos educativos, templos religiosos y espacios patrimoniales, lo que la consolida como el principal punto de concentración de actividades económicas y de movilidad del área metropolitana.

El sector presenta una morfología urbana compacta, caracterizada por una alta densidad edificatoria, predominio de construcciones en concreto, ladrillo y cubiertas metálicas, y una limitada presencia de zonas verdes. Estas condiciones, sumadas al flujo vehicular constante y a la escasez de espacios permeables, favorecen la acumulación térmica y la aparición del fenómeno de islas de calor urbanas (ICU).

Topográficamente, la zona se asienta sobre una superficie ligeramente ondulada, con altitudes que oscilan entre los 960 y 1.020 metros sobre el nivel del mar, en un relieve de ladera media con pendientes suaves que descienden hacia el oriente, en dirección al valle del río de Oro. El clima es cálido húmedo, con temperaturas promedio anuales cercanas a los 25 °C y una variación térmica diaria moderada, propia del régimen tropical de la región andina.

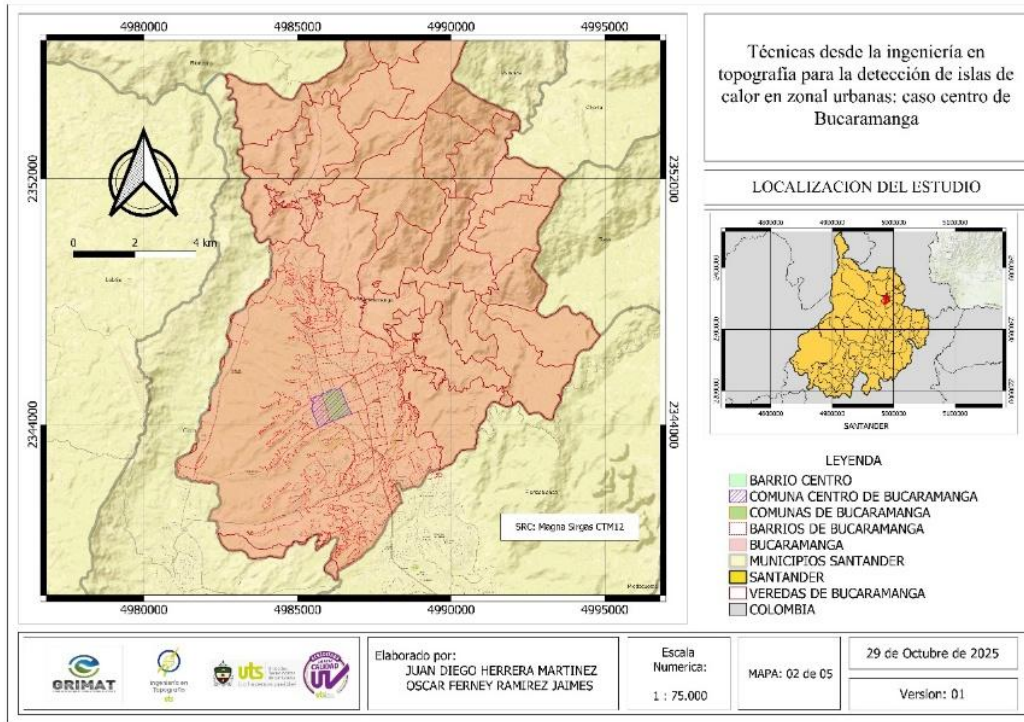
El Centro de Bucaramanga constituye un espacio urbano estratégico para el análisis de fenómenos ambientales derivados de la densificación urbana, tales como la pérdida de cobertura vegetal, el incremento del material impermeable y la alteración del confort térmico. Por ello, su estudio aporta información clave para la planificación territorial sostenible, la gestión ambiental urbana y el diseño de estrategias de mitigación del calor en zonas consolidadas de alta ocupación.

Ilustración 7. ZONA DE ESTUDIO CENTRO



Fuente: Autores

Ilustración 7. Localización zona de estudio



Fuente: Autores

## 4.1. Técnicas

En el desarrollo del análisis de islas de calor urbano, se emplearon diferentes técnicas de procesamiento estadístico y espacial orientadas a la generación, interpretación y validación de la distribución térmica en el área de estudio. A continuación, se describen los métodos utilizados:

### 4.1.1. Interpolación por Distancia Inversa Ponderada (IDW)

Como primera técnica, se utilizó la interpolación mediante Distancia Inversa Ponderada (IDW), un método determinístico que permite estimar valores en ubicaciones sin medición a partir de datos puntuales conocidos. Este enfoque

asigna mayor influencia a los puntos más cercanos y reduce progresivamente el peso de aquellos más alejados, en función de la distancia (Geo Innova, 2020).

La aplicación de este método permitió generar superficies continuas de temperatura, facilitando la representación espacial del comportamiento térmico. Asimismo, resultó adecuado para captar variaciones locales, evidenciando cambios térmicos entre diferentes sectores del área urbana. Su implementación se consideró pertinente debido a su simplicidad operativa y eficiencia computacional.

#### ***4.1.2. Estimación de Densidad Kernel (Mapa de calor)***

Adicionalmente, se empleó la técnica de estimación de densidad Kernel para la elaboración de mapas de calor. Este método estadístico no paramétrico permite estimar la distribución espacial de una variable a partir de datos puntuales, generando una superficie continua, basada en la influencia de los valores cercanos (ESRI, s.f.).

En su aplicación, a cada punto de medición se le asignó una función de densidad cuya intensidad disminuye gradualmente con la distancia. La superposición de estas funciones permitió obtener una representación espacial de la concentración térmica, facilitando la identificación de zonas con mayor acumulación de calor.

El uso de esta técnica permitió visualizar de manera clara la distribución espacial de la temperatura y reconocer áreas críticas asociadas a la presencia de islas de calor urbano.

### 4.1.3. Análisis de Puntos Calientes (Hot Spot Analysis)

Finalmente, se aplicó el análisis de puntos calientes (Hot Spot Analysis), una técnica de estadística espacial que permite identificar patrones de agrupamiento significativo en la distribución de una variable. Este método, basado en el estadístico Getis-Ord  $G_i^*$ , clasifica las observaciones en zonas de alta concentración (hotspots) y baja concentración (coldspots) (Geo Innova, 2020).

Para su interpretación, se utilizaron valores Z (Z-scores) y valores p (p-values), los cuales permiten determinar la significancia estadística de los patrones observados. Valores Z positivos elevados indican agrupaciones de altas temperaturas, mientras que valores negativos evidencian zonas con concentraciones bajas.

La aplicación de esta técnica permitió identificar áreas donde las temperaturas presentan una agrupación espacial significativa, aportando un sustento estadístico robusto para la delimitación de zonas de calor y frío dentro del área de estudio.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LOS DATOS

ID	X	Y	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T. PROM
1	4986031.8	2344086.6	27.1	32.4	27.1	28.7	27.8	24.7	28.6	27.2	27.4	23.4	27.6	28.2	27.52
2	4986420.3	2344233.3	27.6	31.7	27.8	28.3	26.7	23.9	27.8	26.6	24.9	20.7	26.2	27.5	26.64
3	4986763.8	2344350.1	27.5	35.1	28.6	29.3	26.4	24.2	27.5	26.7	25.2	21.6	26.4	27.8	27.19
4	4986554.0	2344786.2	27.5	35.1	27.8	28.6	26.4	23.7	27.1	26.4	25.1	20.3	26.1	27.7	26.82
5	4986233.8	2344671.4	27.5	28.9	26.4	26.8	26.1	25.2	27.6	26.5	25.7	22.4	26.9	27.3	26.44
6	4985939.1	2344559.8	28	33.3	27.8	28.8	27.3	24.8	28.2	27.8	25.8	21.7	27.5	29.3	27.53
7	4985781.6	2344971.6	27.7	33.8	28.2	29.7	27.3	25.3	28.7	28.1	26.8	22.6	27.8	29.5	27.96
8	4986078.6	2345115.0	27.4	33.3	28.8	29.6	26.8	25.1	28.8	28.3	27.3	22.5	27.7	29.2	27.90
9	4986384.8	2345203.1	27.5	31.3	28.1	28.9	29.6	23.8	28.3	26.5	25.4	21.3	27.6	28.4	27.23
10	4986218.5	2344939.1	28.3	31.5	27.9	28.9	25.9	22.7	27.4	26.3	25.4	21.2	27.1	28.2	26.73

Tabla 1. Análisis exploratorio de los datos. Fuente: Autores

### 5.1.1. Procesamiento de datos

#### I) Carga de datos

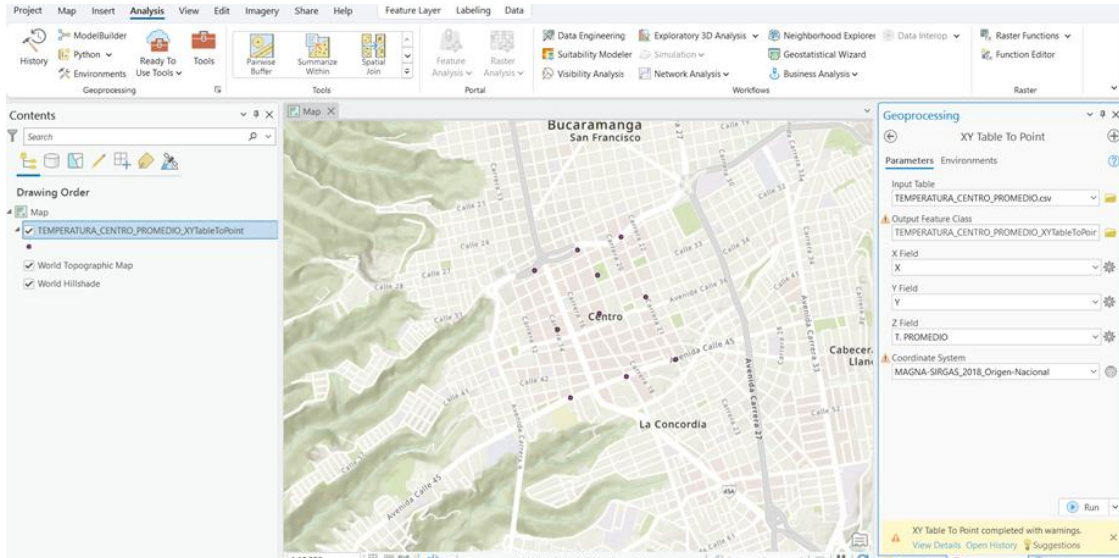


Ilustración 8. Carga de datos a ArcGIS Pro. Fuente: Autores

#### II) Directional Distribution (Standard Deviational Ellipse)

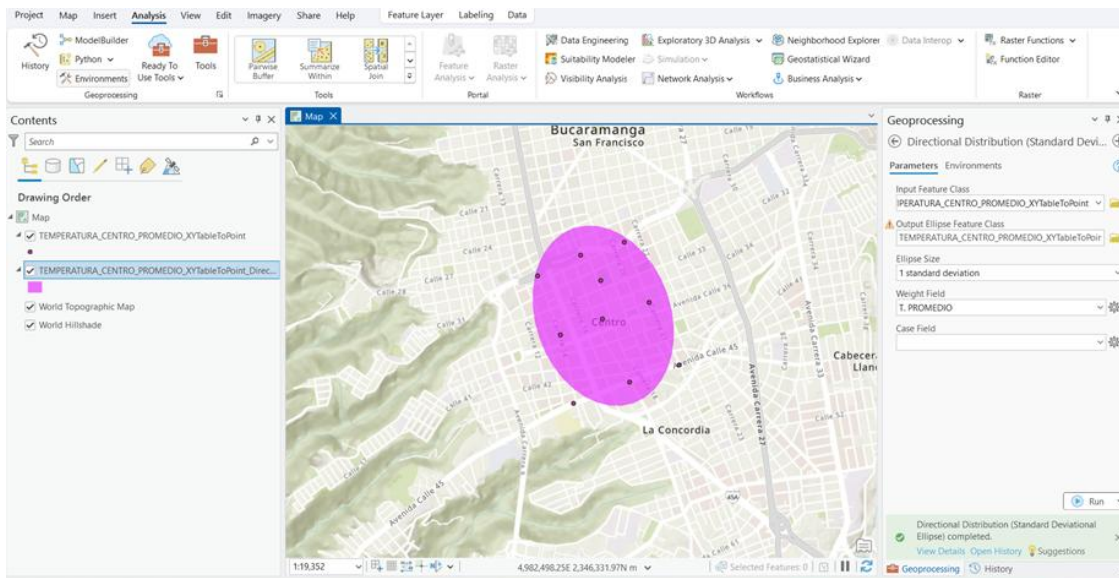


Ilustración 9. Directional Distribution. Fuente: Autores

La elipse de desviación estándar generada mediante la herramienta Directional Distribution en ArcGIS Pro permite identificar la tendencia espacial, dispersión y orientación del fenómeno analizado, en este caso los registros de temperatura. Esto significa que la dispersión de los datos es mayor en el eje norte-sur que, en el eje este-oeste, lo que se refleja en una elipse más alargada verticalmente.

### III) Gráfico de Probabilidad Normal (Q-Q Plot).

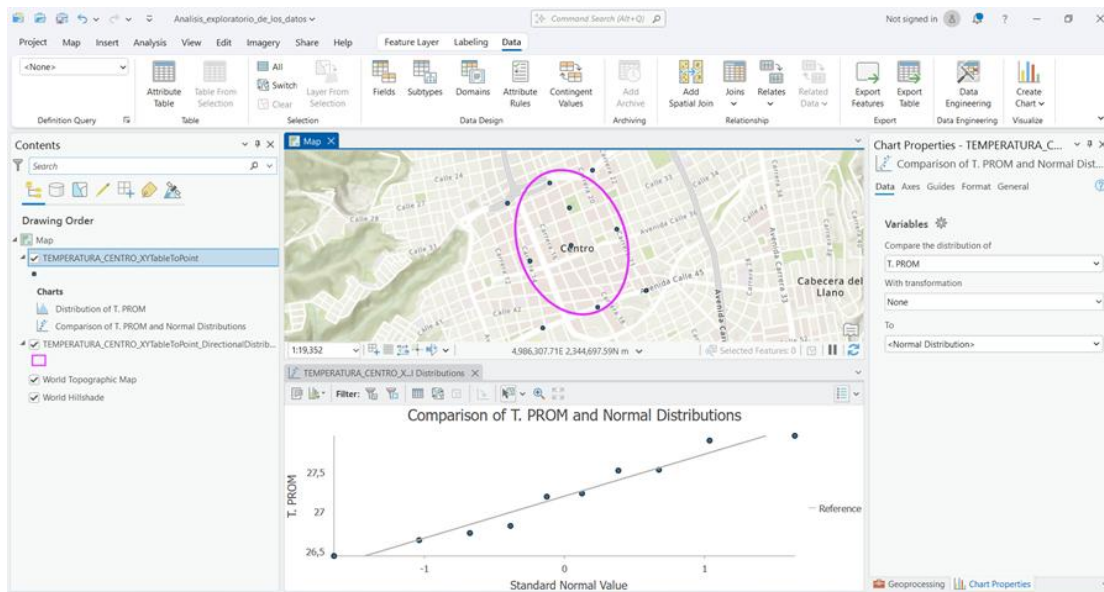


Ilustración 10. Gráfico de probabilidad normal. Fuente: Autores

Analizando la gráfica, donde la línea recta gris representa la referencia de una distribución normal, se observa que los datos se dispersan alrededor de dicha línea, presentando tanto valores bajos como altos. Este comportamiento indica que, aunque existe una tendencia general hacia la normalidad, la dispersión es moderada, evidenciando que los datos no se ajustan de manera perfecta a una distribución normal.

IV) Vecino más cercano.

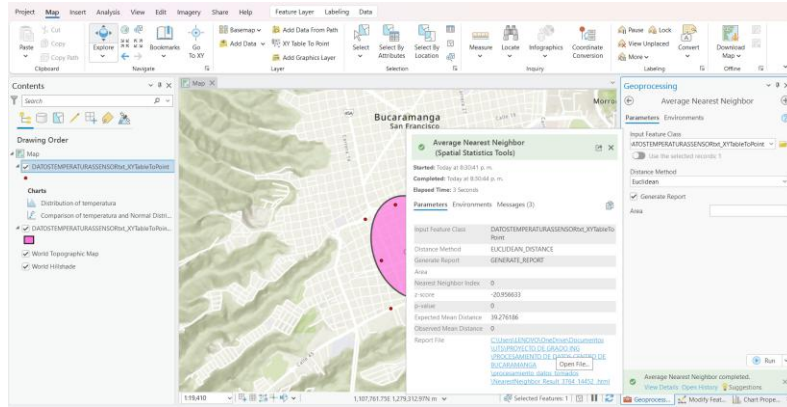


Ilustración 11. Vecino más cercano. Fuente: Autores

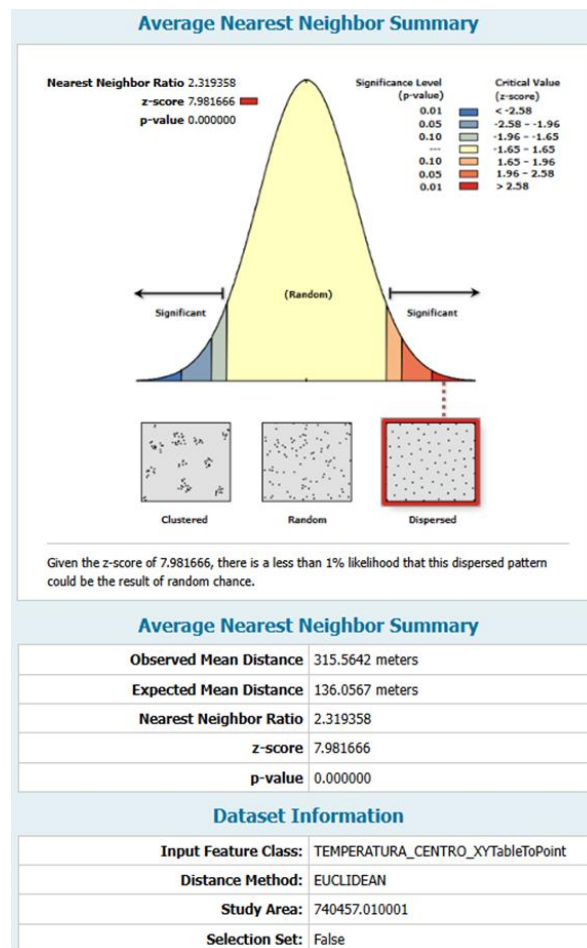


Ilustración 12. Reporte vecino más cercano. Fuente: Autores

**ELABORADO POR:**  
Docencia

**REVISADO POR:**  
Sistema Integrado de Gestión

**APROBADO POR:** Líder del Sistema Integrado de Gestión  
**FECHA APROBACIÓN:** Octubre de 2023

Con base en el análisis del vecino más cercano, la distribución espacial de los datos de temperatura presenta un patrón de tipo disperso, evidenciando que los puntos se encuentran más separados entre sí de lo que se esperaría en una distribución aleatoria.

### V) Polígono de Voronoi.

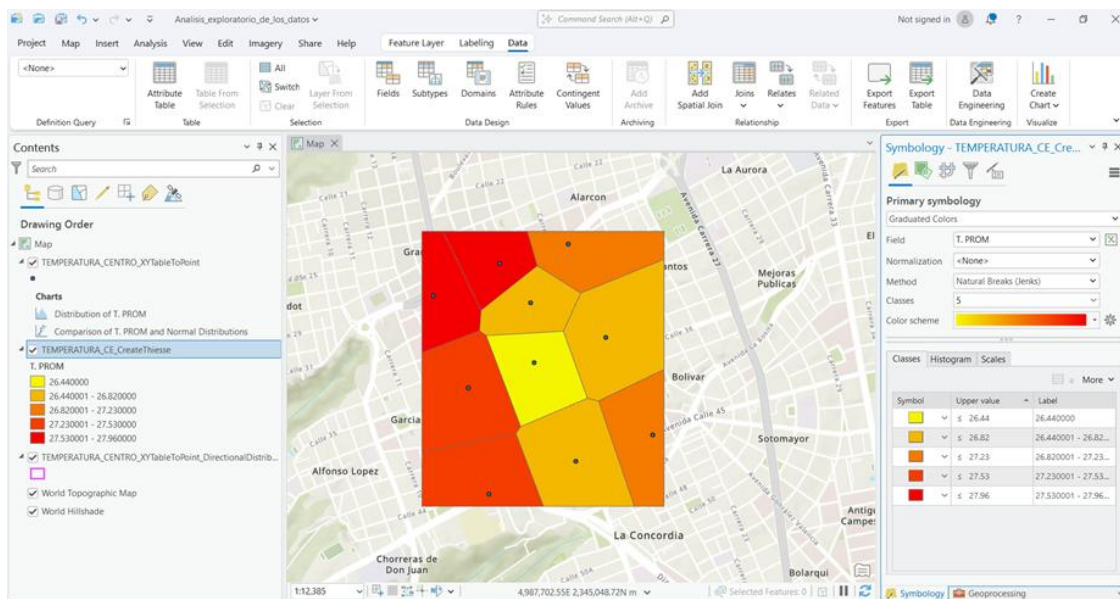


Ilustración 13. Polígono de voronoi. Fuente: Autores

A partir de la interpretación del gráfico, se evidencia un comportamiento espacial en el que los valores de temperatura más elevados se concentran hacia el sector occidental del área analizada, lo que indica que esta zona presenta mayores niveles térmicos dentro de la comuna Real de Minas. Por el contrario, en la zona central se registran los valores más bajos, lo que sugiere una menor acumulación de calor en dicho sector.

## VI) Trend analysis.

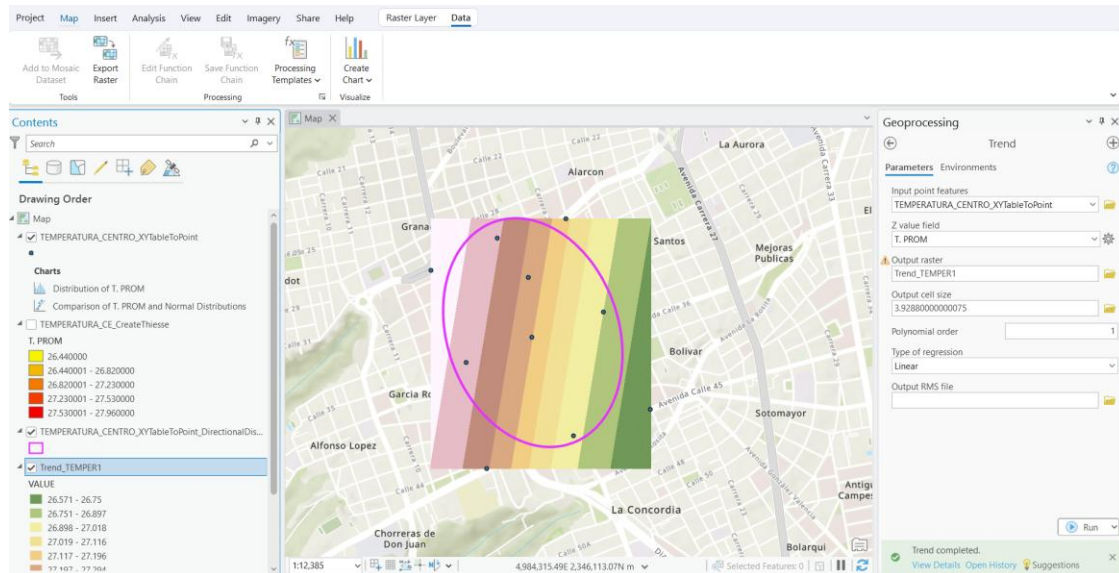


Ilustración 14. Trend analysis. Fuente: Autores

A partir del análisis de la distribución de los datos representados en el gráfico, se identifica una concentración de valores térmicos más elevados hacia el sector occidental del centro de Bucaramanga, con registros que oscilan entre 26,57 °C y 27,74 °C. Al contrastar estos resultados con los obtenidos en análisis previos, se ratifica la presencia de un patrón espacial consistente que evidencia una mayor acumulación de temperatura en dicha zona del área de estudio.

## 5.2. TÉCNICAS IDW, KERNEL Y HOT SPOT

### 5.2.1. IDW

Gracias a este procedimiento, es posible visualizar gradientes térmicos, reconocer sectores más cálidos y comparar espacialmente la intensidad del calor urbano. se obtiene una superficie térmica continua.

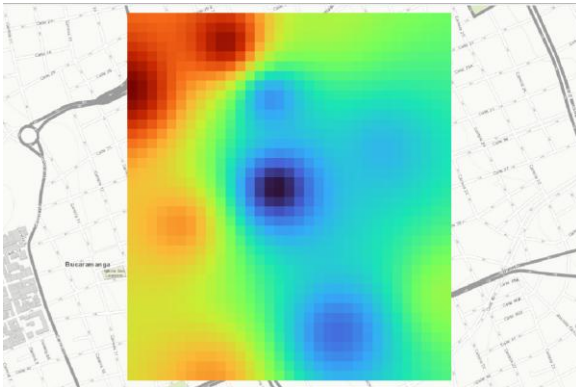


Ilustración 15. Técnica IDW - Temp.  
Promedio (QGIS).  
Fuente: Autores

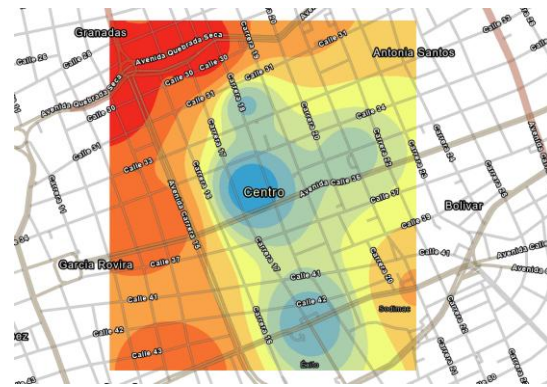


Ilustración 16. Técnica IDW - Temp.  
Promedio (ArcGIS Pro).  
Fuente: Autores

Se identifican zonas con mayor concentración de calor hacia el sector noroeste, mientras que áreas centrales presentan temperaturas más bajas, posiblemente asociadas a la presencia de espacios verdes. Estos resultados sugieren la existencia de una isla de calor urbana localizada, influenciada por las características del uso del suelo y la cobertura urbana en el sector de Quebrada-seca.

En cuanto a la calidad de las imágenes la primera se realizó con el programa QGIS, la cual se ve más pixelada y con menos calidad y la segunda se ha realizado con ArcGIS Pro por lo cual permite una mejor visualización de la trama urbana y se ve menos pixelada.

TECNICA IDW TEMPERTURA DIA 1

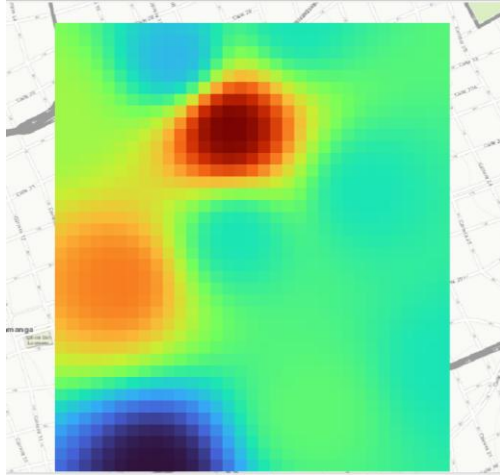


Ilustración 17. Técnica IDW - Día 1 (QGIS). Fuente: Autores

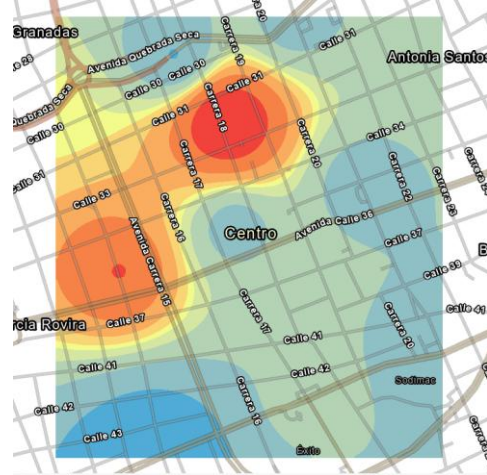


Ilustración 18. Técnica IDW - Día 1 (ArcGIS Pro). Fuente: Autores

Este resultado IDW evidencia que las mayores concentraciones térmicas se localizan en los sectores norte y noroeste del área de estudio. En contraste, las zonas sur y centrales presentan temperaturas más bajas, lo que sugiere una distribución heterogénea del calor urbano.

TECNICA IDW TEMPERTURA DIA 2

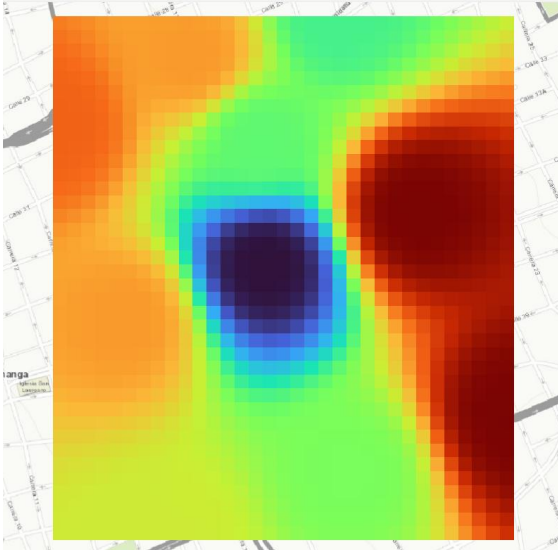


Ilustración 19. Técnica IDW - Día 2 (QGIS). Fuente: Autores

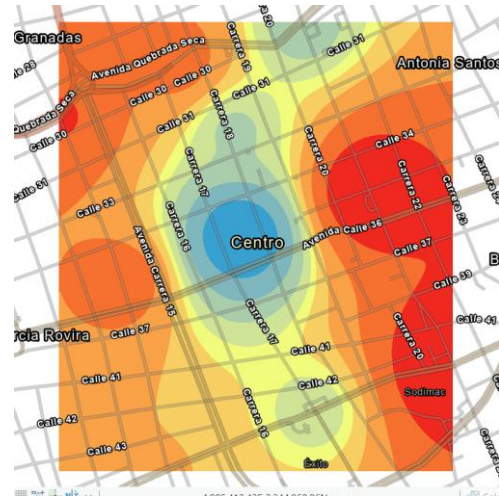


Ilustración 20. Técnica IDW - Día 2 (ArcGIS Pro). Fuente: Autores

Este resultado IDW evidencia una distribución de temperaturas altas hacia el sector oriental del área de estudio, el sector central presenta un núcleo de bajas temperaturas en la zona del paseo del comercio, posiblemente asociado al menor tráfico de carros, y mayor presencia de comercio tipo bancos y atención al cliente.

### TECNICA IDW TEMPERTURA DIA 3

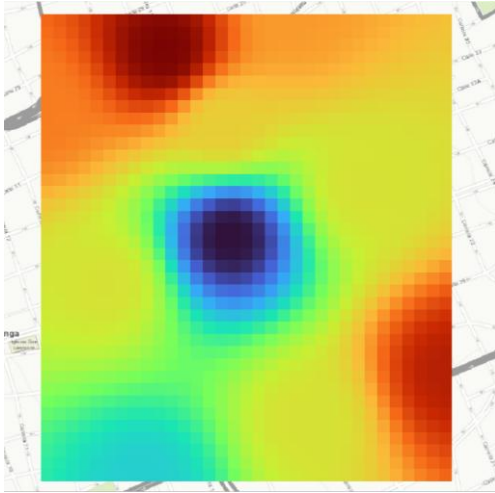


Ilustración 21. Técnica IDW - Dia 3  
(QGIS). Fuente: Autores

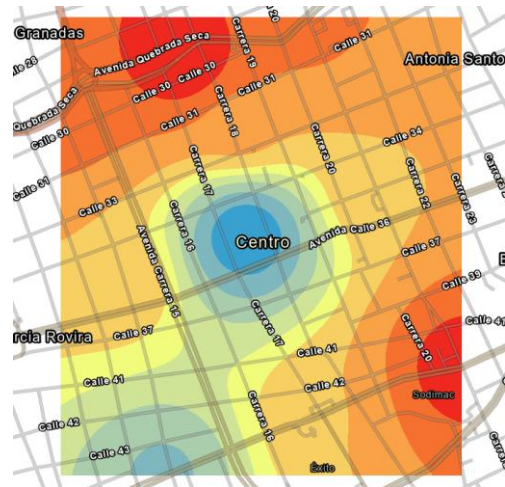


Ilustración 22. Técnica IDW - Dia 3  
(ArcGIS Pro).  
Fuente: Autores

Se evidencia una distribución térmica con dos focos de altas temperaturas ubicados principalmente en los sectores noroeste hacia Quebrada-seca y al hacia el este cerca de Homecenter. se identifica el mismo núcleo de bajas temperaturas en la zona del paseo del comercio.

### TECNICA IDW TEMPERTURA DIA 4

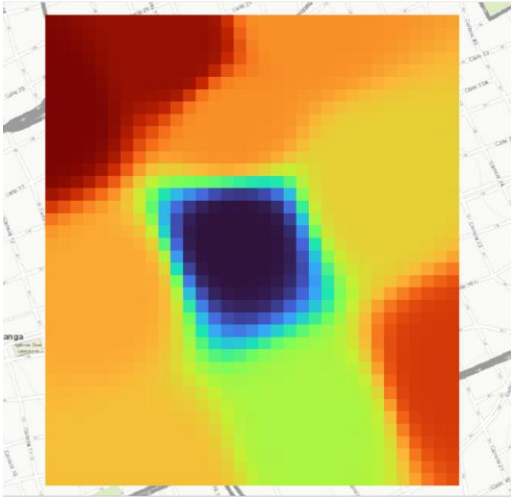


Ilustración 23. Técnica IDW - Día 4 (QGIS). Fuente: Autores

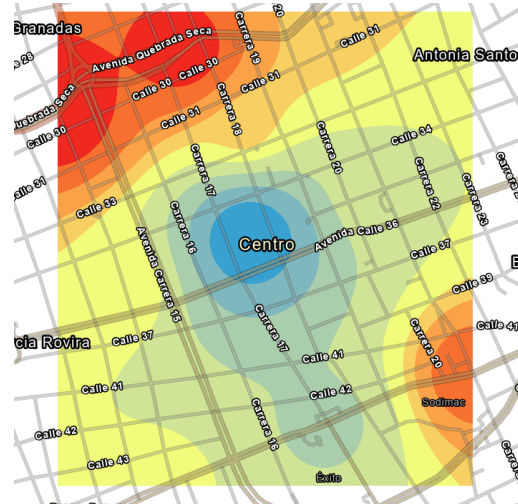


Ilustración 24. Técnica IDW - Día 4 (ArcGIS Pro). Fuente: Autores

El resultado del IDW muestra la persistencia de los dos focos de altas temperaturas detectados en el resultado anterior, lo que evidencia una continuidad en cuanto al calentamiento dentro del área de estudio. No obstante, se destaca un incremento térmico más evidente hacia el sector noroeste, particularmente en la zona de Quebrada-seca. De igual manera, se conserva el núcleo de bajas temperaturas en el Paseo del Comercio, esta vez con una intensidad mayor.

TECNICA IDW TEMPERTURA DIA 5

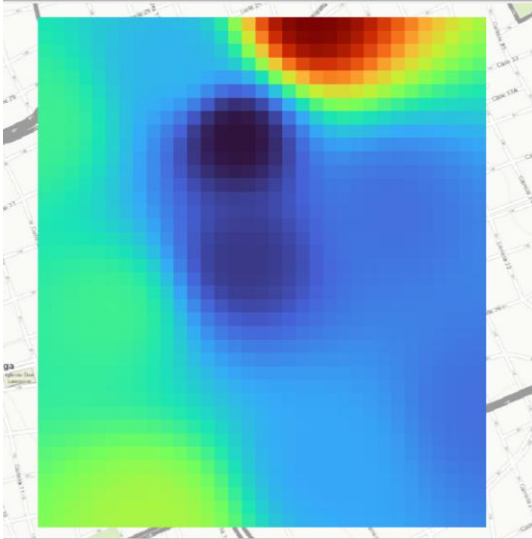


Ilustración 25. Técnica IDW - Dia 5  
(QGIS). Fuente: Autores

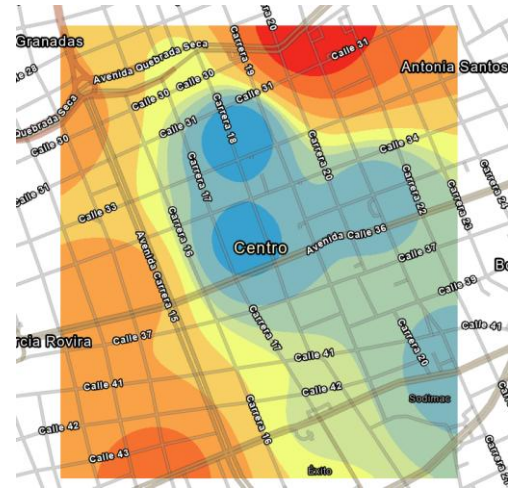


Ilustración 26. Técnica IDW - Dia 5  
(ArcGIS Pro). Fuente: Autores

Este mapa de interpolación IDW destaca un foco de altas temperaturas en el sector norte, en el sector de Quebrada-seca mientras que en la zona centro-noroeste se mantiene un núcleo de bajas temperaturas de alta intensidad, extendiéndose hacia el sur en forma de franja. Asimismo, hacia el suroccidente se registran valores intermedios, lo que muestra un cambio gradual de la temperatura.

TECNICA IDW TEMPERTURA DIA 6

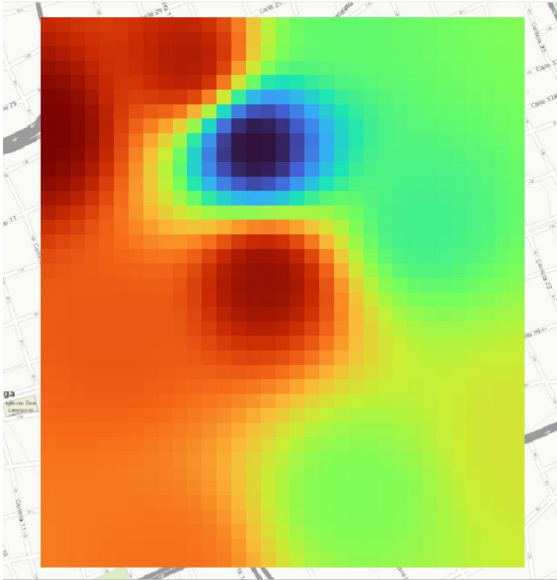


Ilustración 27. Técnica IDW - Día 6 (QGIS). Fuente: Autores

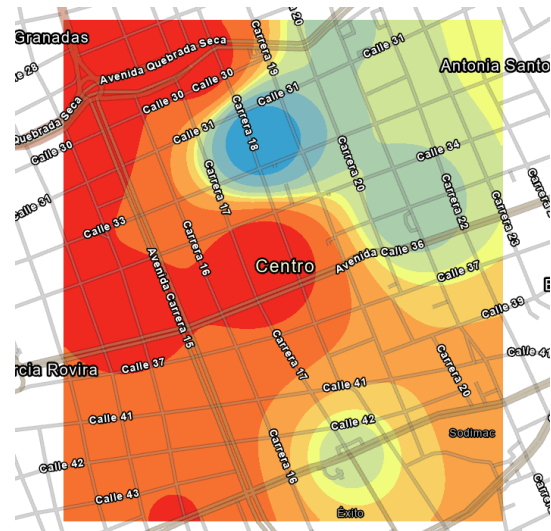


Ilustración 28. Técnica IDW - Día 6 (ArcGIS Pro). Fuente: Autores

En este resultado del IDW se observa una distribución térmica heterogénea en el área de estudio. Se identifican dos focos de altas temperaturas, uno en el sector noroccidental (Quebrada-seca) y otro en la zona central (paseo del comercio), mientras que entre ambos se distingue un núcleo de bajas temperaturas en la parte centro-norte (parque centenario). Además, hacia el sector oriental predominan valores intermedios, lo que muestra un cambio gradual entre las zonas más cálidas y las más frescas.

TECNICA IDW TEMPERTURA DIA 7

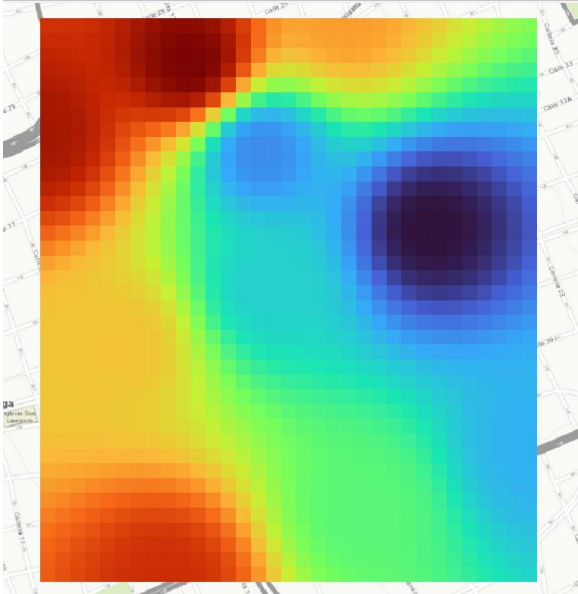


Ilustración 29. Técnica IDW - Dia 7 (QGIS). Fuente: Autores

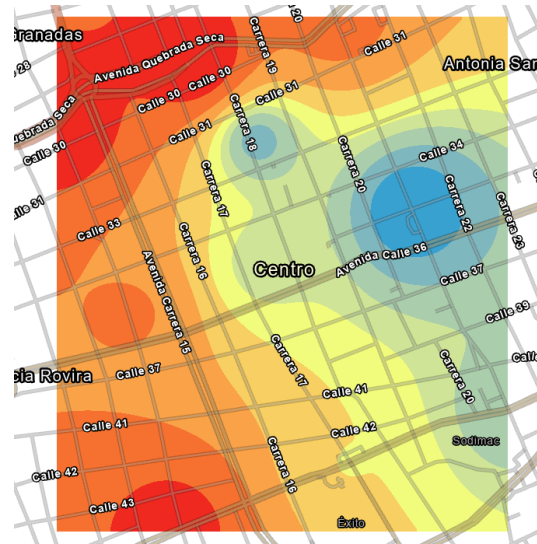


Ilustración 30. Técnica IDW - Dia 7 (ArcGIS Pro). Fuente: Autores

En este resultado del IDW se observa una distribución térmica contrastante en el área de estudio. Se identifican dos focos de altas temperaturas en los sectores noroccidental y suroccidental, mientras que en la zona oriental se distingue un núcleo de bajas temperaturas de mayor intensidad. Además, en la parte central predominan valores intermedios, lo que evidencia un cambio gradual entre las áreas más cálidas y las más frescas.

TECNICA IDW TEMPERTURA DIA 8

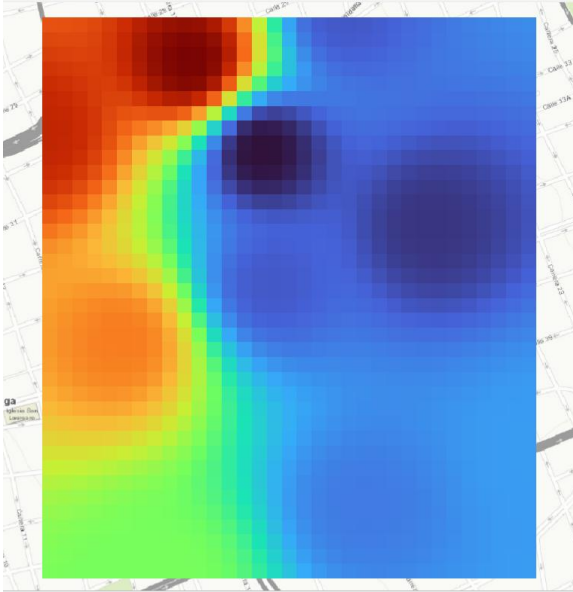


Ilustración 31. Técnica IDW - Día 8 (QGIS). Fuente: Autores

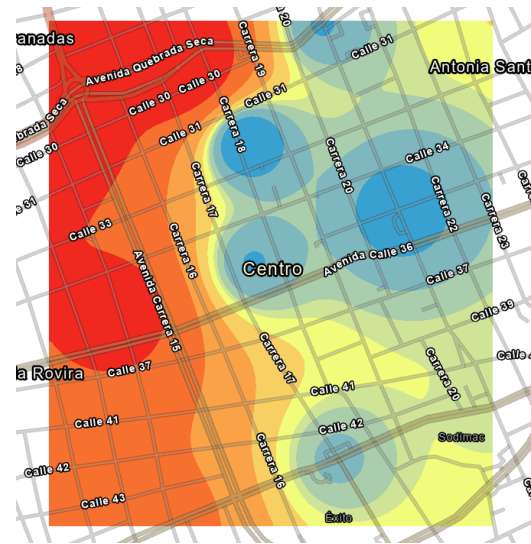


Ilustración 32. Técnica IDW - Día 8 (ArcGIS Pro). Fuente: Autores

En este resultado del IDW se destaca un foco de altas temperaturas en el sector noroccidental (Quebrada-Seca), acompañado de un segundo núcleo cálido de menor intensidad hacia el occidente y en la zona centro-norte y hacia el oriente se identifican núcleos de bajas temperaturas, representados por tonalidades azules y moradas, lo que evidencia un contraste térmico marcado entre ambos sectores.

TECNICA IDW TEMPERTURA DIA 9

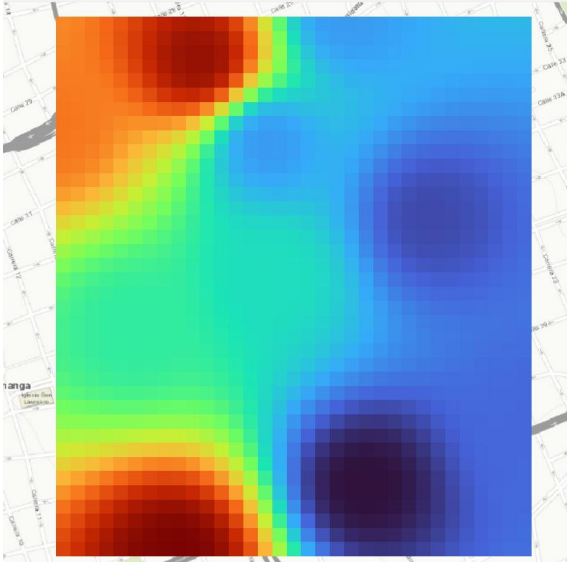


Ilustración 33. Técnica IDW - Día 9  
(QGIS). Fuente: Autores

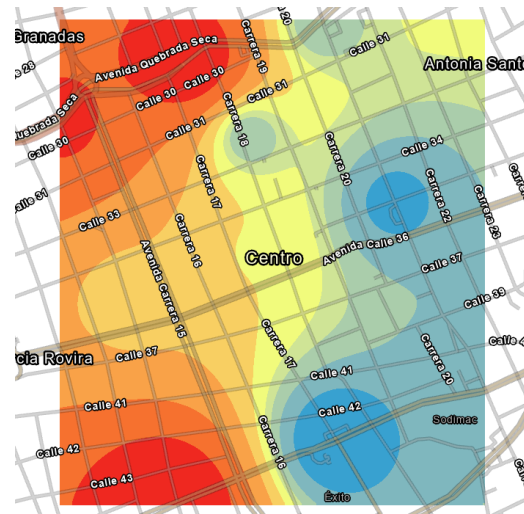


Ilustración 34. Técnica IDW - Día 9  
(ArcGIS Pro). Fuente: Autores

En este resultado del IDW se evidencia una distribución térmica heterogénea dentro del área de estudio. Se identifican dos focos de altas temperaturas en los sectores noroccidental y suroccidental, mientras que hacia el oriente se observan núcleos de bajas temperaturas, especialmente en la zona suroriental, donde se concentra el valor más bajo.

IDW TECNICA TEMPERTURA DIA 10

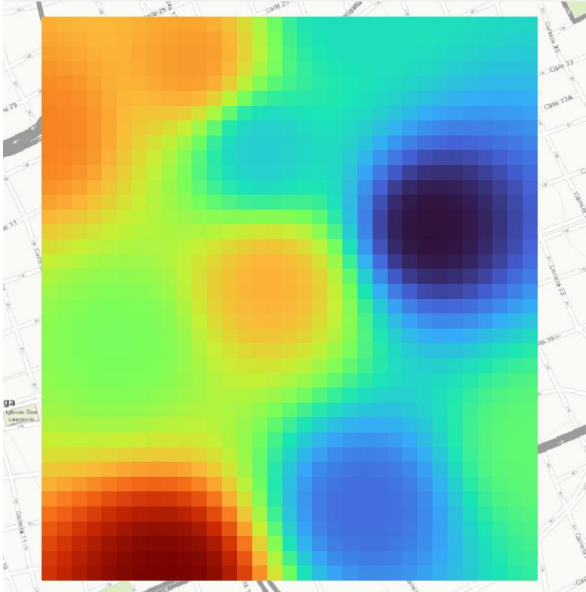


Ilustración 35. Técnica IDW - Día 10 (QGIS). Fuente: Autores

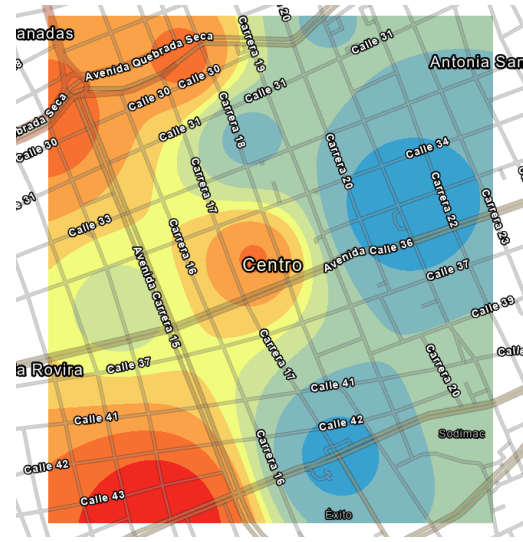


Ilustración 36. Técnica IDW - Día 10 (ArcGIS Pro). Fuente: Autores

Se identifica un foco de altas temperaturas de mayor intensidad en el sector suroccidental, acompañado de valores relativamente altos hacia el noroccidente y un núcleo cálido de menor intensidad en la zona central. En contraste, hacia el oriente se distinguen núcleos de bajas temperaturas, especialmente en el sector nororiental, donde se concentra el valor más bajo.

TECNICA IDW TEMPERTURA DIA 11

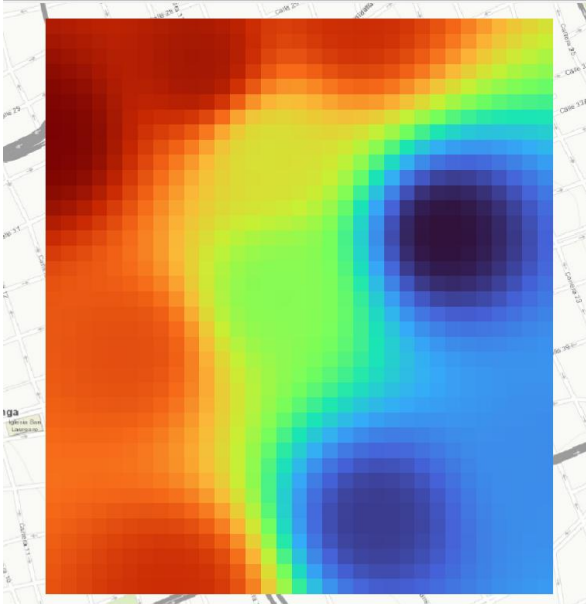


Ilustración 37. Técnica IDW - Día 11 (QGIS). Fuente: Autores

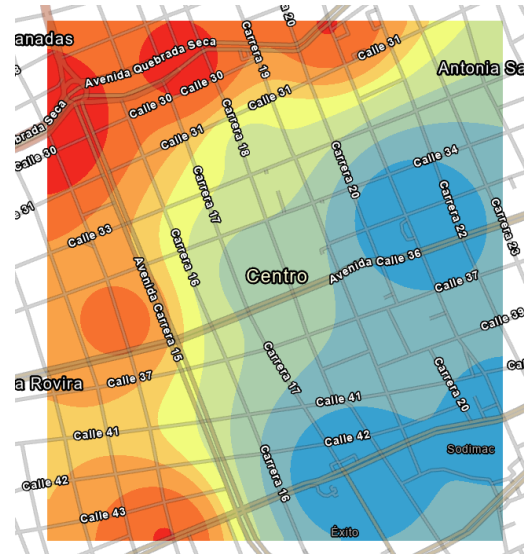


Ilustración 38. Técnica IDW - Día 11 (ArcGIS Pro). Fuente: Autores

Evidencia una distribución térmica heterogénea en el área de estudio. Se identifican valores más altos de temperatura hacia el occidente, especialmente en los sectores noroccidental y suroccidental, donde predominan tonalidades rojas y naranjas. En contraste, hacia el oriente se observan dos núcleos de bajas temperaturas, uno en la zona nororiental y otro en la parte suroriental.

IDW TEMPERTURA DIA 12

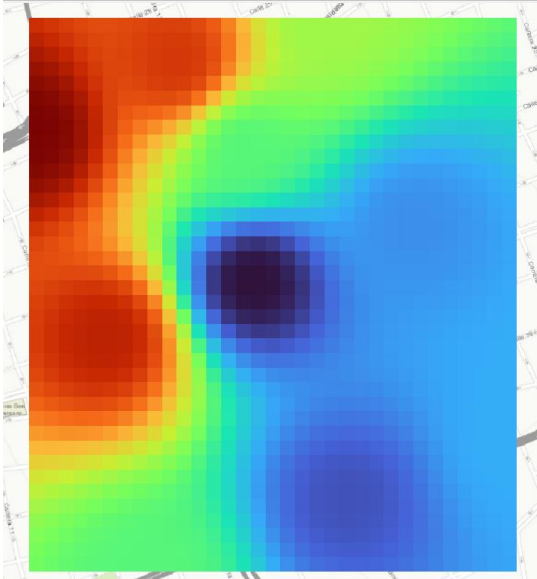


Ilustración 39. Técnica IDW - Día 12 (QGIS). Fuente: Autores

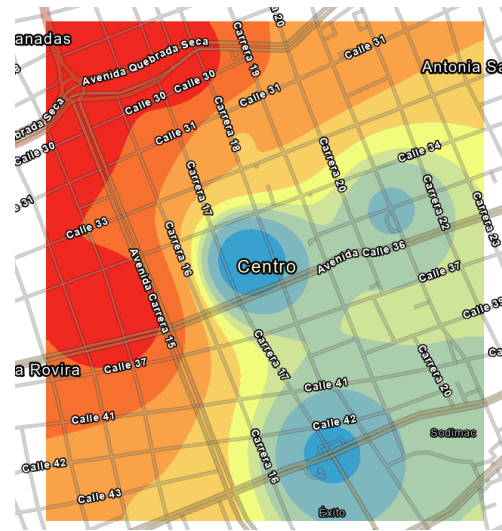


Ilustración 40. Técnica IDW - Día 12 (ArcGIS Pro). Fuente: Autores

Se identifican valores más altos de temperatura hacia el occidente, especialmente en los sectores noroccidental y centro-occidental, donde predominan tonalidades naranjas y rojas. En contraste, en la zona central se distingue un núcleo de bajas temperaturas de mayor intensidad, acompañado por otro de menor magnitud hacia el sector suroriental.

### 5.2.2. Kernel Density.

Permite definir donde se concentran las mayores intensidades térmicas y se obtiene una intensidad de concentración y determinar núcleos de calor, como se puede apreciar en las imágenes nos arroja núcleos de calor muy similares excepto en la temperatura promedio nos muestra un núcleo central en el sector norte.

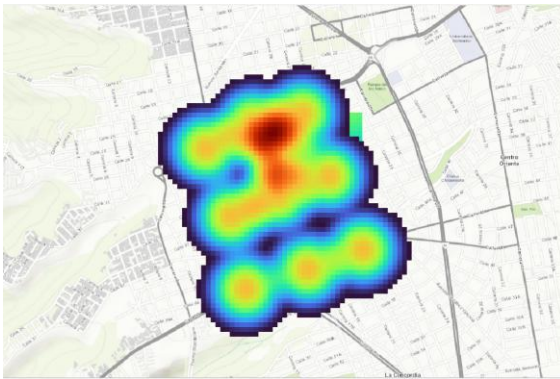


Ilustración 41. Kernel - estimación de núcleos radio 300. Temperatura promedio (QGIS).  
Fuente: Autores

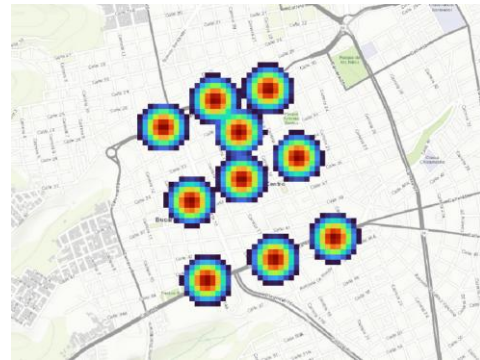


Ilustración 42. Kernel - estimación de núcleos radio 150. Temperatura promedio (QGIS).  
Fuente: Autores

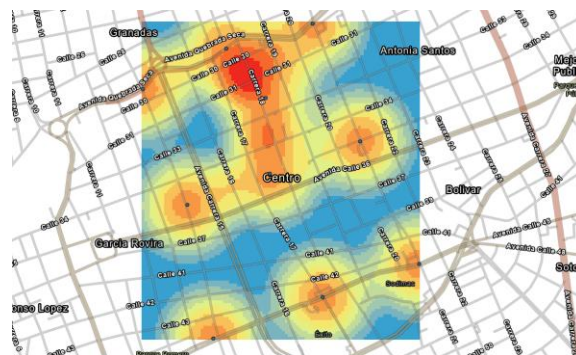


Ilustración 43. Kernel Temperatura promedio (ArcGIS).  
Fuente: Autores

En la interpolación mediante mapa de calor se elaboraron dos representaciones empleando radios de influencia de 300 m y 150 m. En este enfoque, cada punto de medición actúa como un centro térmico desde el cual los valores se difunden hacia el entorno, disminuyendo progresivamente a medida que aumenta la distancia.

Para el caso del radio de 300 m, las áreas de influencia de los puntos se superponen con mayor facilidad, dando lugar a superficies térmicas más continuas. Este comportamiento se evidencia especialmente en el sector norte, donde la unión de tonalidades rojas y naranjas indica proximidad entre los puntos de muestreo y una mayor concentración de temperaturas elevadas. Por el contrario, con un radio de 150 m se obtienen patrones más localizados, generando pequeñas “islas” térmicas alrededor de cada punto registrado.

En cuanto a las tonalidades azules y verdes, estas corresponden a valores más bajos o zonas con menor influencia de los puntos analizados, lo que sugiere que un incremento en la densidad de muestreo permitiría mejorar la precisión en la representación espacial de la temperatura.

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO  
DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO, MONOGRAFÍA,  
EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

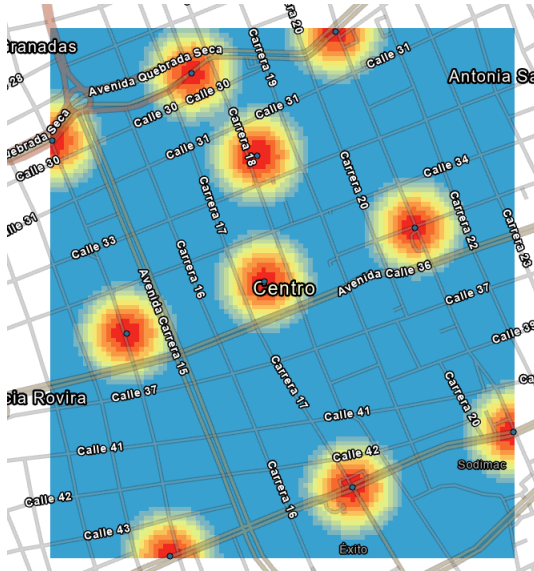


Ilustración 44. Kernel - Día 1 (ArcGIS Pro).  
Fuente: Autores



Ilustración 46. Kernel – Día 5 (ArcGIS Pro).  
Fuente: Autores



Ilustración 45. Kernel - Día 3 (ArcGIS Pro).  
Fuente: Autores

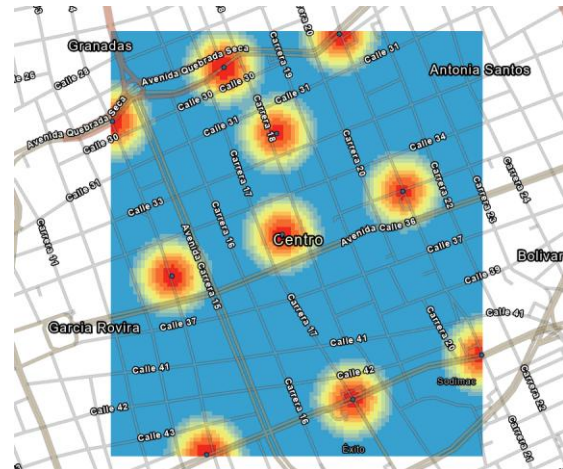


Ilustración 47. Kernel - Día 7 (ArcGIS Pro).  
Fuente: Autores

ELABORADO POR:  
Docencia

REVISADO POR:  
Sistema Integrado de Gestión

APROBADO POR: Líder del Sistema Integrado de Gestión  
FECHA APROBACIÓN: Octubre de 2023



Ilustración 48. Kernel - Día 9 (ArcGIS Pro).  
Fuente: Autores



Ilustración 49. Kernel - Día 11 (ArcGIS Pro).  
Fuente: Autores

Con un radio de 150 m se obtienen patrones espaciales más focalizados, en los que la influencia de cada punto de medición es limitada a su entorno inmediato. Esto da lugar a la formación de pequeñas “islas” térmicas independientes, que no presentan superposición entre sí, manteniéndose separadas alrededor de cada punto registrado. Este comportamiento refleja una menor continuidad espacial de la temperatura y resalta la variabilidad local del fenómeno, evidenciando que, bajo este radio de influencia, la distribución térmica se representa de manera más fragmentada y puntual.

### 5.2.3. HOT SPOT

Permite diferenciar patrones reales de calor, define variaciones y permite priorizar zonas críticas para planificación urbana y se obtienen clusters significativos de calor.

#### HOT SPOT TEMPERATURA PROMEDIO

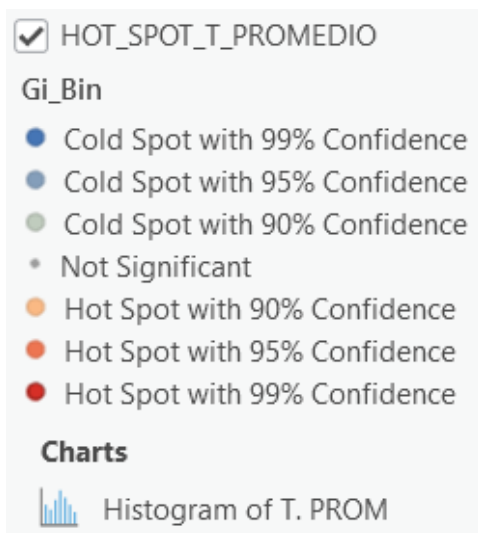


Ilustración 50. Hot Spot Promedio  
Leyenda.  
Fuente: Autores

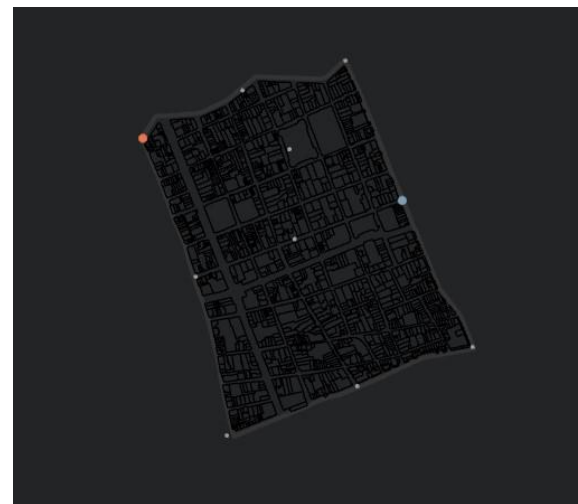


Ilustración 51. Hot Spot Promedio.  
Fuente: Autores

Este método permite identificar los agrupamientos espaciales más relevantes de temperaturas elevadas y bajas. En el caso de los clusters fríos (Cold Spots), se detectó un punto localizado hacia el sector oriental con un nivel de confianza del 95%, lo que indica que su comportamiento es estadísticamente significativo. Por otro lado, se identificó un cluster caliente (Hot Spot) en la zona noroccidental del centro de Bucaramanga, también con un 95% de confianza, evidenciando la presencia de un agrupamiento térmico significativo en esta área.

Adicionalmente, el análisis mostró la existencia de valores no significativos, es decir, puntos que no presentan un patrón claro de agrupamiento ni se alejan de manera

notable del comportamiento promedio. Estos corresponden al 80% de los puntos de control considerados, lo que sugiere que la mayoría de los datos no evidencian concentraciones térmicas estadísticamente definidas dentro del área de estudio.

Ilustración 32 HISTOGRAMA HOT SPOT TEMPERATURA PROMEDIO

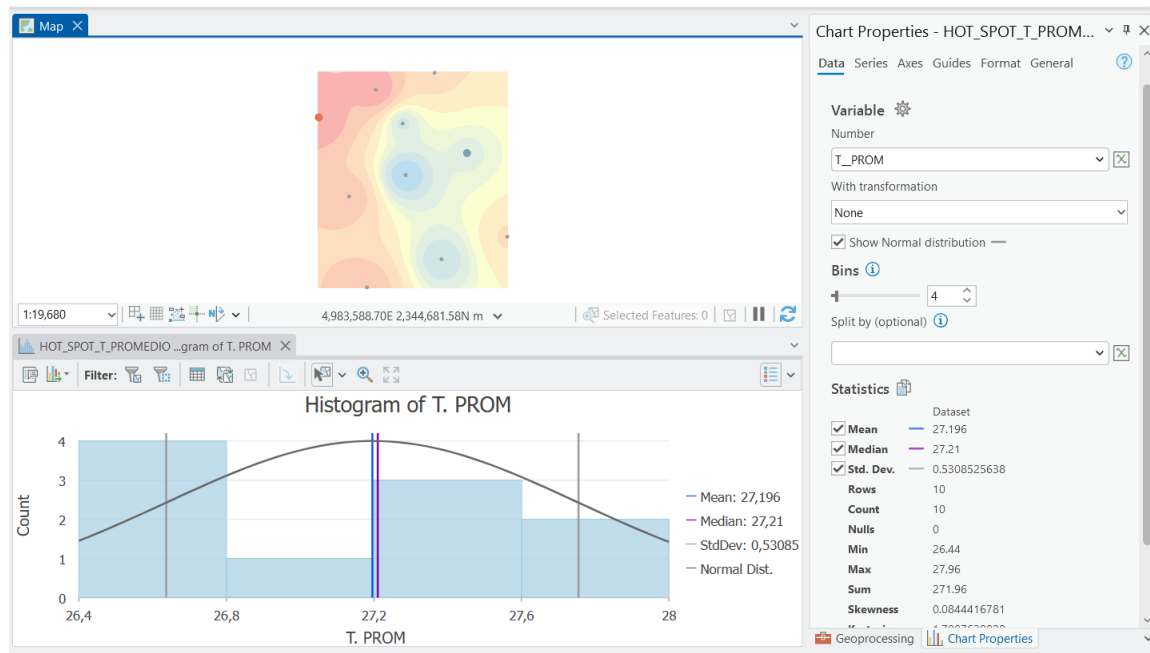


Ilustración 52. Histograma Hot Spot.  
Fuente: Autores

este es el histograma de Hot Spot, donde se ve la relación de las temperaturas teniendo un vacío entre 26.8 y 27.2 en donde nos arroja unos datos (media, moda, mediana y desviación estándar) que indican que a distribución de los datos es muy buena y la correlación entre los puntos es buena, donde se pueden identificar muy bien cuales son los puntos más calientes y cuáles son los puntos más fríos.

### 5.2.4. COMPARACIÓN DE TÉCNICAS

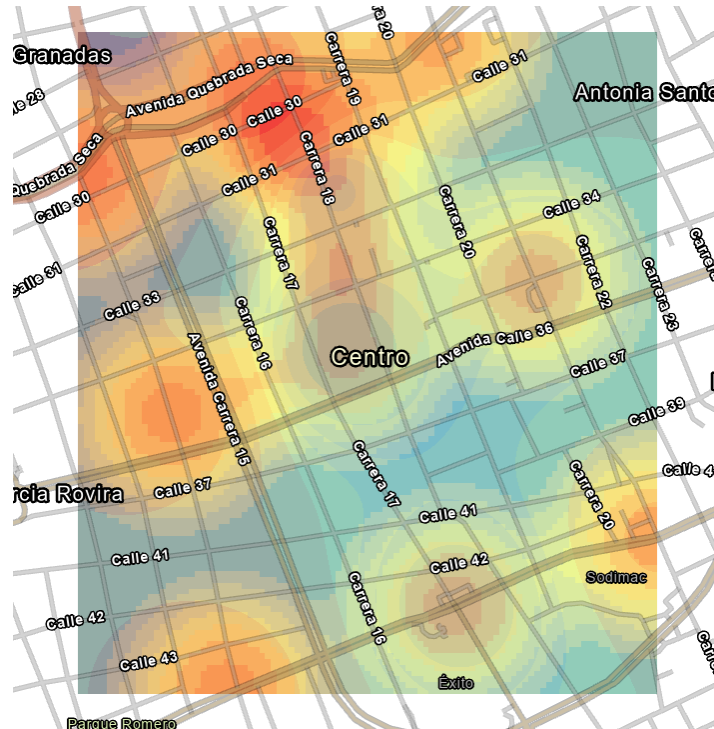


Ilustración 53, Comparación de técnicas. IDW - Kernel.  
Fuente: Autores

Se observa una coherencia espacial entre los resultados derivados de la estimación de densidad Kernel y la interpolación por distancia inversa (IDW). Al comparar ambas superficies, se identifica que las zonas con mayor concentración térmica definidas por el método Kernel coinciden con las áreas de mayor intensidad estimadas mediante IDW, lo que indica la existencia de patrones espaciales consistentes en la distribución de la variable analizada.

Esta concordancia respalda la confiabilidad de los resultados obtenidos, sugiriendo que las áreas identificadas como islas de calor no dependen de un método

específico, sino que corresponden a concentraciones térmicas reales dentro del área de estudio.

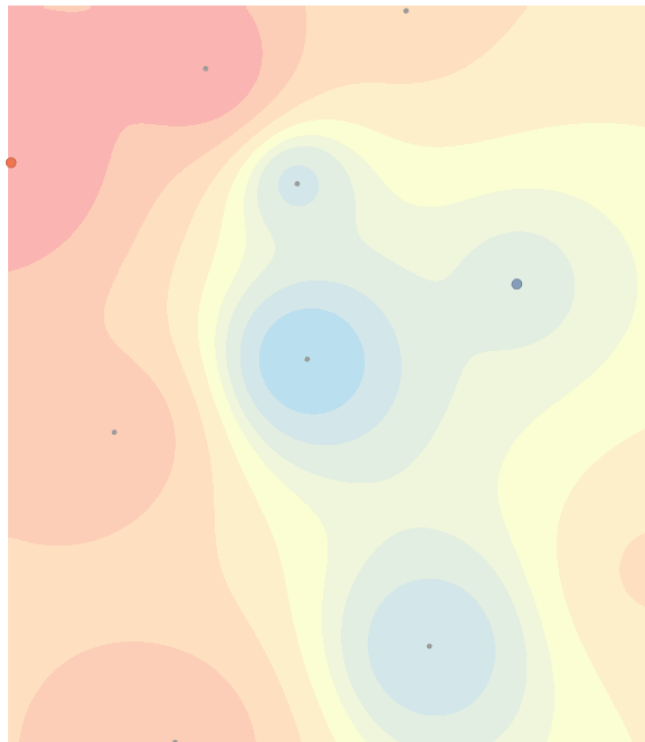


Ilustración 54. Comparación de técnicas. Temp. Promedio IDW – Hot Spot.  
 Fuente: Autores

Comparando el Hot Spot con el IDW de la temperatura promedio nos permite identificar que los clusters con mayor temperatura coinciden con las zonas de mayor temperatura y los de menor temperatura también coinciden con las zonas de temperaturas más bajas.

Ilustración 33 COMPARACION IDW - HOT SPOT TEMPERATURA DIA 1

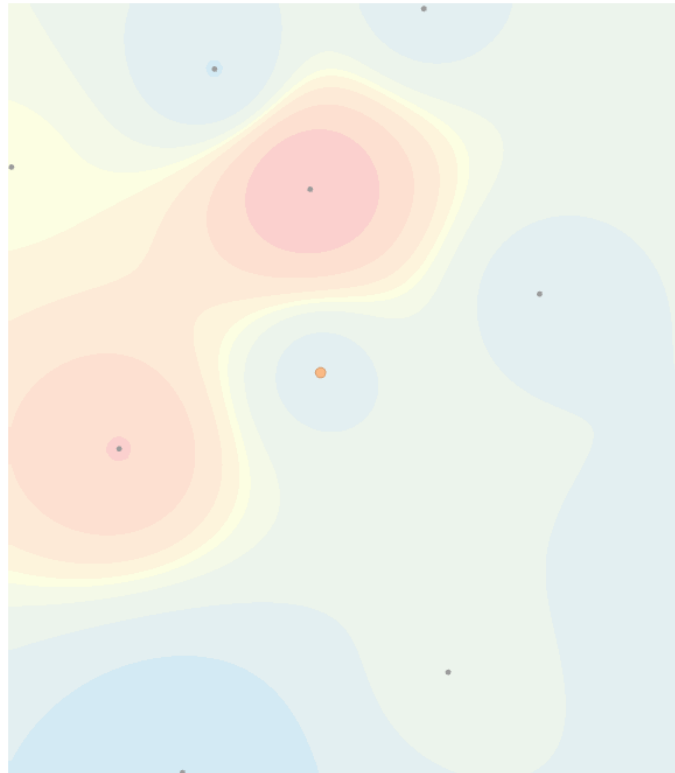


Ilustración 55. Comparación de técnicas. Día 1 IDW – Hot Spot.  
Fuente: Autores

En esta comparación entre IDW y Hot Spot del día uno los clusters con mayor temperatura no coincide con las zonas con temperaturas más altas.

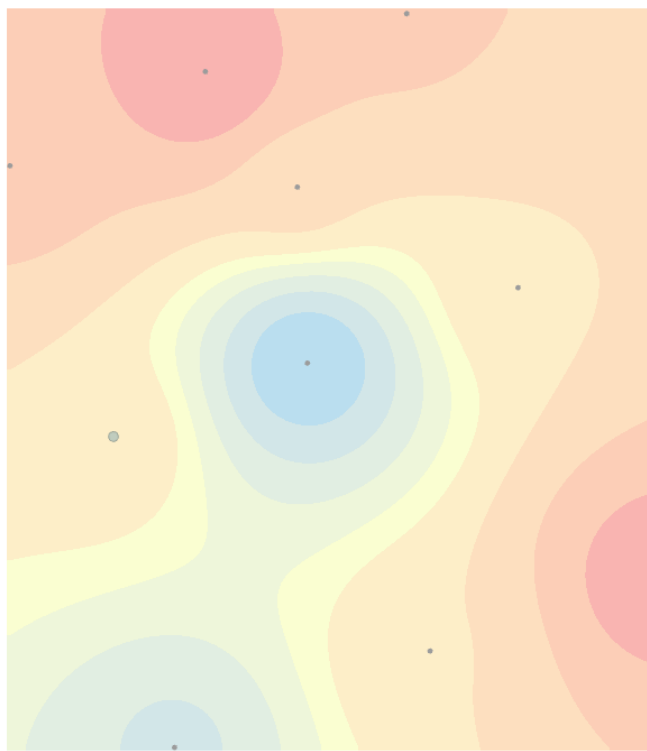


Ilustración 56. Comparación de técnicas. Día 3 IDW – Hot Spot.  
Fuente: Autores

En esta comparación entre IDW y Hot Spot del día tres los clusters con mayor temperatura no coincide con las zonas con temperaturas más altas.

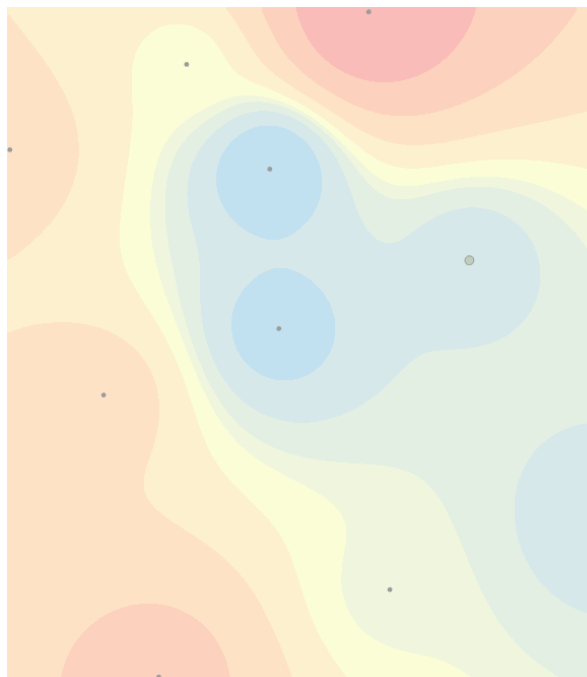


Ilustración 57. Comparación de técnicas. Día 5 IDW – Hot Spot.  
Fuente: Autores

En esta comparación entre IDW y Hot Spot del día cinco los clusters con menor temperatura coincide con las zonas con temperaturas más bajas.

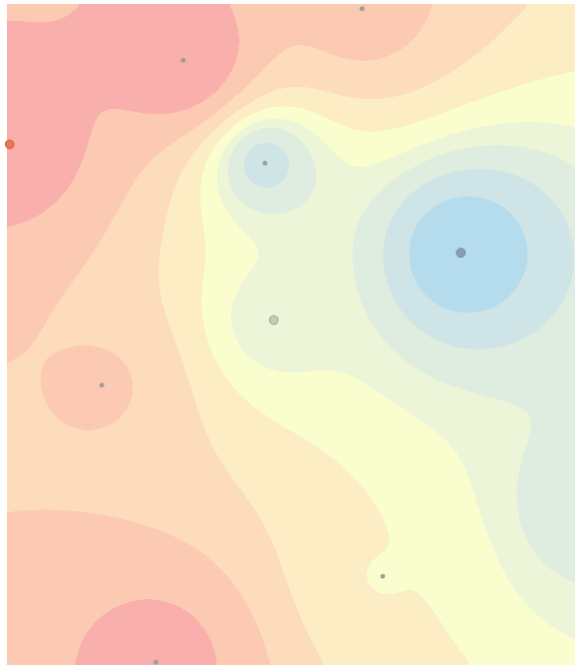


Ilustración 58. Comparación de técnicas. Día 7 IDW – Hot Spot.  
Fuente: Autores

Comparando el Hot Spot con el IDW del día siete nos permite identificar que los clusters con mayor temperatura coinciden con las zonas de mayor temperatura y los de menor temperatura también coinciden con las zonas de temperaturas más bajas.

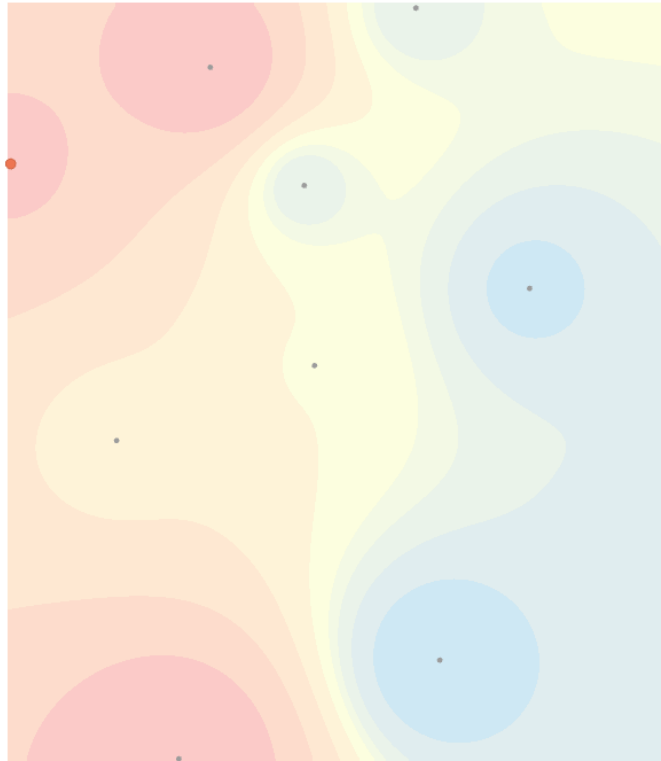


Ilustración 59. Comparación de técnicas. Día 9 IDW – Hot Spot.  
Fuente: Autores

Comparando el Hot Spot con el IDW del día nueve nos permite identificar que los clusters con mayor temperatura coinciden con las zonas de mayor temperatura

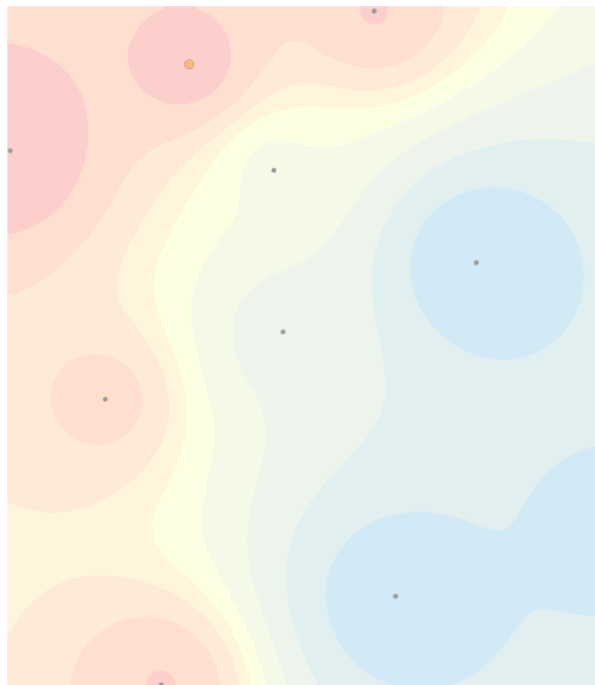


Ilustración 60. Comparación de técnicas. Día 11 IDW – Hot Spot.  
Fuente: Autores

Comparando el Hot Spot con el IDW del día once permite identificar que los clusters con mayor temperatura coinciden con las zonas de mayor temperatura y los de menor temperatura también coinciden con las zonas de temperaturas más bajas.

## 6. CONCLUSIONES

El análisis desarrollado permitió establecer que la identificación de patrones térmicos asociados a islas de calor urbano está directamente condicionada por la técnica de análisis espacial empleada, ya que cada método responde de manera distinta a la distribución y densidad de los datos. En este sentido, se evidenció que los métodos determinísticos, como la interpolación, tienden a generar representaciones continuas del fenómeno, mientras que los métodos basados en análisis estadístico espacial permiten una delimitación más rigurosa de agrupamientos térmicos significativos.

Se determinó que la distribución espacial de la temperatura en el área de estudio presenta un comportamiento disperso con concentraciones localizadas, lo cual dificulta la identificación clara de zonas térmicas cuando se emplean técnicas que no consideran la estructura espacial de los datos. Esta condición influyó en la interpretación de los resultados, haciendo necesario el uso complementario de diferentes técnicas para lograr una representación más confiable del fenómeno.

Uno de los principales inconvenientes durante el desarrollo del estudio fue la limitada densidad de puntos de muestreo, lo que restringe la aplicación de métodos geoestadísticos más robustos y afecta la continuidad espacial de las superficies generadas. Como estrategia para superar esta limitación, se seleccionaron técnicas acordes con la cantidad y distribución de los datos disponibles, priorizando aquellas que permiten identificar tendencias y patrones sin requerir una alta densidad de información.

Asimismo, se evidenció que la coincidencia espacial entre los resultados obtenidos mediante diferentes técnicas fortalece la validez del análisis, ya que permite

confirmar la existencia de patrones térmicos más allá de la dependencia de un método específico. Esto resalta la importancia de integrar múltiples enfoques de análisis espacial para obtener interpretaciones más consistentes.

Finalmente, se concluye que el análisis geoestadístico de datos de temperatura constituye una herramienta efectiva para la identificación de islas de calor urbano, siempre que exista coherencia entre la escala del estudio, la calidad de los datos y las técnicas aplicadas, lo cual resulta fundamental para garantizar la confiabilidad de los resultados en contextos urbanos con información limitada.

## 7. RECOMENDACIONES

Se recomienda aumentar la densidad de puntos de muestreo en futuros estudios, con el fin de mejorar la representatividad espacial de los datos y permitir la aplicación de técnicas geoestadísticas más robustas, como el Kriging, que requieren una mayor cantidad de información para generar resultados confiables.

Se sugiere complementar los datos de campo con información proveniente de sensores remotos, como imágenes satelitales térmicas, que permitan ampliar la cobertura espacial del análisis y realizar evaluaciones multitemporales del fenómeno de isla de calor urbano.

Es recomendable integrar variables urbanas adicionales, tales como cobertura vegetal, uso del suelo y materiales de construcción, con el fin de establecer relaciones más precisas entre la configuración del entorno urbano y el comportamiento térmico

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Referencias Bibliográficas

Alarcón Ruiz, A. (2020). *Análisis del efecto “isla de calor” en la ciudad de Valencia y propuesta de mitigación mediante cubiertas vegetales* [Trabajo final de grado, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio Institucional UPV. <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/4ffc783c-1161-4b92-9706-7c21d576c066/content>

Rasilla, D. F., Allende Álvarez, F., & Fernández García, F. (2016). Isla de calor urbana en Madrid durante julio de 2015. En *X Congreso de la Asociación Española de Climatología. Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio* (pp. 473–484). Universidad de Cantabria. UCrea. <https://hdl.handle.net/10902/31262>  
<https://doi.org/10.14198/XCongresoAECALicante2016-54>

Sánchez Sánchez, M. (2023). *Mitigar la isla de calor urbana paso a paso. Metodología de selección de pavimentos urbanos sostenibles* [Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid]. E.T.S. Arquitectura (UPM). <https://orcid.org/0000-0002-6675-0248>

Campuzano Sotomayor, J. C., Vélez Reina, J. A., & Vera Reyes, S. G. (2019). *Evaluación y propuesta de estrategias de mitigación ante efectos de las islas de calor urbano presentes en el cantón Durán* [Trabajo de titulación, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. ESPOL Repositorio Institucional. <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/46153>

Cúnsulo, M., Kurbán, A., Papparelli, A., & Montilla, E. (2013). Determinación de la Isla de Calor Urbana en San Juan utilizando imágenes Landsat 5 TM+ en invierno y verano. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 17, 1–8. Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES). [https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/147332/Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/147332/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

De Schiller, S., Evans, J. M., & Katschner, L. (2001). Isla de calor, microclima urbano y variables de diseño: estudios en Buenos Aires y Río Gallegos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 5, 41–48. [https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/79672/Documento\\_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/79672/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Heredia, A. S. (2022, mayo). *Islas de calor urbano: Propuesta de adaptación para la ciudad de Rosario* [Informe técnico]. Universidad Nacional de Rosario.

[https://www.researchgate.net/profile/Anahi-Heredia/publication/361172498\\_Islas\\_de\\_Calor\\_Urbano\\_Propuesta\\_de\\_adaptacion\\_para\\_la\\_ciudad\\_de\\_Rosario/links/62a0a9a2416ec50bdb16565a/Islas-de-Calor-Urbano-Propuesta-de-adaptacion-para-la-ciudad-de-Rosario.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Anahi-Heredia/publication/361172498_Islas_de_Calor_Urbano_Propuesta_de_adaptacion_para_la_ciudad_de_Rosario/links/62a0a9a2416ec50bdb16565a/Islas-de-Calor-Urbano-Propuesta-de-adaptacion-para-la-ciudad-de-Rosario.pdf)

Huang Lin, H. (2021). *Mitigación de las islas de calor urbanas mediante diseño residencial bioclimático* [Trabajo de titulación, Universidad de Chile]. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/190234>

Mercado Maldonado, L. (2022). Mitigación y adaptación al efecto de isla de calor urbana de clima cálido seco. El caso de Hermosillo, Sonora. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 11(Enero-Junio), 85–110. Universidad de Guadalajara. <https://doi.org/10.32870/rvcs.voi11.187>

Municipalidad de Curridabat. (2019). *Islas de calor, impactos y respuestas: El caso del cantón de Curridabat*. Curridabat, Costa Rica. [https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/9345/Islas\\_de\\_calor\\_impactos\\_y\\_respuestas.pdf?sequence=1](https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/9345/Islas_de_calor_impactos_y_respuestas.pdf?sequence=1)

Cárdenas Triana, G. L., & Muñoz Carrasco, Y. V. (2020). *Análisis del fenómeno de isla de calor atmosférica en Santiago de Cali a partir de datos históricos de temperatura* [Trabajo de grado, Universidad de La Salle]. Repositorio Institucional Universidad de La Salle. <https://hdl.handle.net/20.500.14625/21086>

Gómez Forero, L. V., & Castañeda Rodríguez, C. C. (2013, agosto 14–16). *Estudio del crecimiento urbano con respecto al efecto isla de calor para establecer lineamientos de gestión energético ambiental en Bogotá*. En *Proceedings of the Eleventh Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013)*. Cancún, México. LACCEI. <https://laccei.org/LACCEI2013-Cancun/RefereedPapers/RP147.pdf>

Montoya Morales, E. F., & Castellanos Jiménez, J. V. (2020). *Análisis del fenómeno de islas de calor urbano en Bogotá y Medellín y su relación con los instrumentos de planeación y gestión del suelo (IPGS)* [Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <http://hdl.handle.net/11349/25695>

Palacio Chaverra, C. A. (2019). *Medidas de adaptación/mitigación ante islas de calor en el Valle de Aburrá* (Trabajo de grado, Universidad EIA). Universidad EIA. <https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/d3ff8ba6-dc90-4fd1-89c3-530177bc05dc/content>

Soto-Soto, J. E., Garzón-Barrero, J., & Jiménez-Cleves, G. (2020). Análisis de islas de calor urbano usando imágenes Landsat: Caso de estudio Armenia-Colombia 1996-2018. *Revista Espacios*, 41(8), 9. <https://www.revistaespacios.com/a20v41n08/a20v41n08p09.pdf>

Zuluaga Gómez, S. C., Londoño Arango, F., Parra Correa, E., Arango Díaz, L., & Salazar Trujillo, J. H. (2023). El impacto de la arborización como estrategia de mitigación de la isla de calor urbana en el Caribe colombiano. *Arquitectura y Urbanismo*, 44(2), 32–39. Instituto

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO  
DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO, MONOGRAFÍA,  
EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 2.0

Superior Politécnico José Antonio Echeverría.  
<https://www.redalyc.org/journal/3768/376875648004/376875648004.pdf>

Carranza del Águila, M. M., Alegría Lazo, K. M., & Tuesta Bernal, J. C. (2024). Análisis de las islas de calor urbana en el sector cercado del distrito de Tarapoto, 2024. *Revista Ciencia Latina*, 8(5), 5401–5415.  
[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i5.13979](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.13979)

Concejo Municipal de Bucaramanga. (2014). Acuerdo Municipal 011 del 21 de mayo de 2014. Por el cual se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial de segunda generación del Municipio de Bucaramanga 2014–2027. Bucaramanga, Colombia.

Constitución Política de Colombia. (1991). Constitución Política de Colombia. Asamblea Nacional Constituyente, Bogotá, Colombia.

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24.  
<https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). Urban heat island. En T. R. Oke, G. Mills, A. Christen, & J. A. Voogt (Eds.), *Urban Climates* (pp. 197–237). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476.008>

República de Colombia. (1993). Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables y se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). *Diario Oficial de la República de Colombia*.

República de Colombia. (1997). Ley 388 de 1997. Por la cual se modifica la Ley 9ª de 1989, la Ley 2ª de 1991 y se dictan otras disposiciones en materia de desarrollo territorial. *Diario Oficial de la República de Colombia*.

República de Colombia. (2018). Ley 1931 de 2018. Por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático. *Diario Oficial de la República de Colombia*.

República de Colombia. (2021). Ley 2169 de 2021. Por medio de la cual se adoptan medidas para la gestión de la acción climática hacia la carbono neutralidad y la resiliencia climática. *Diario Oficial de la República de Colombia*.

Su, M. A. (2021). Empirical evidence on the impact of urban overheating on building energy and indoor comfort. *Building and Environment*, 205, 108208. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108208>

Villamil-Almeida, H. J., Blanco-Mantilla, K. A., Salah-García, O. Y., & García-Sánchez, C. E. (2020). Characterization of the urban heat island at Bucaramanga, Colombia, using real-time temperature monitoring. *Revista Facultad de Ingeniería*, (97), 10–21. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20191260>

**F-DC-125**

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO  
DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO, MONOGRAFÍA,  
EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO**

**VERSIÓN: 2.0**

**ELABORADO POR:**  
Docencia

**REVISADO POR:**  
Sistema Integrado de Gestión

**APROBADO POR:** Líder del Sistema Integrado de Gestión  
**FECHA APROBACIÓN:** Octubre de 2023