



**Efecto de isla de calor superficial y su relación con la
cobertura del suelo para las ciudades de Barranquilla
y Sincelejo en los años 2002 y 2018**

William José Pérez Cárdenas

Universidad del Norte

Área de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Geociencias

Barranquilla, Colombia

2023

Efecto de isla de calor superficial y su relación con la cobertura del suelo para las ciudades de Barranquilla y Sincelejo en los años 2002 y 2018

William José Pérez Cárdenas

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Geólogo

Directora:

Ph.D. Natalia Hoyos Botero

Línea de Investigación:

Sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica

Universidad del Norte

Área de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Geociencias

Barranquilla, Colombia

2023

A tu nombre.

Resumen

El fenómeno de isla de calor superficial es un problema que se ha agudizado con el aumento de la temperatura y el cambio climático. Barranquilla y Sincelejo son ciudades del Caribe colombiano, donde la temperatura promedio es de 27.4 °C y no son ajenas a las repercusiones que pueda generar la isla de calor sobre sus habitantes. Se realizó un análisis que compara como varía la temperatura superficial en relación con la cobertura de la zona urbana y de periferia, utilizando imágenes procesadas de Landsat 5, 7 y 8, y los archivos de la cobertura de la tierra del IDEAM, para los años 2002 y 2018 en las ciudades mencionadas. Los resultados obtenidos exponen que existen islas de calor superficial para ambas ciudades, siendo más dominante en Barranquilla con ~5 °C que en Sincelejo con ~1 °C. También se encontró que hubo un aumento en la temperatura entre los dos periodos estudiados siendo 2018 más cálido. Además, se determinó que las coberturas inundables y con vegetación densa (por ej. bosques) poseen los menores valores de temperatura mientras las coberturas con poca vegetación y baja humedad son las más calientes. Para finalizar la proximidad a la costa y por tanto a cuerpos de agua acentúa el fenómeno de isla de calor debido a la diferencia en inercia térmica entre las coberturas inundables y urbana.

Palabras claves: Isla de calor, temperatura, vegetación, Barranquilla, Sincelejo.

Abstract

The phenomenon of the surface heat island is a problem that has worsened with the increase in temperature and climate change. Barranquilla and Sincelejo are cities in the Colombian Caribbean, where the average temperature is 27.4 °C, and they are not immune to the effects that the heat island may have on their inhabitants. An analysis was conducted comparing how the surface temperature varies in relation to the coverage of the urban and peripheral areas, using processed images from Landsat 5, 7, and 8, and land cover from the National Hydrological Meteorological and Environmental Studies Institute (IDEAM) for the years 2002 and 2018. Results show that there are urban heat islands in both cities, with Barranquilla having a temperature difference with its periphery of ~ 5°C, compared to Sincelejo with around 1°C. It was also found that there was an increase in temperature between the two study periods, with 2018 being warmer. Furthermore, it was determined that floodable and densely vegetated areas (e.g., forests) had the lowest temperatures, while areas with little vegetation and low humidity are the hottest. In conclusion, the proximity to the coast and, therefore, to bodies of water accentuates the heat island phenomenon due to the difference in thermal inertia between floodable and urban coverings.

Keywords: Heat island, temperature, vegetation, Barranquilla, Sincelejo.

Contenido

Resumen.....	1
Listas de figuras.....	4
Listas de tablas	4
1. Planteamiento del problema	7
2. Objetivos	8
2.1 Objetivo general	8
2.2 Objetivos específicos	8
3. Área de estudio	9
4. Metodología	11
4.1 Datos	11
4.2 Procesamiento de datos	11
4.2.1 Cobertura, polígono urbano y periferia	11
4.2.2 Temperatura de la superficie (LST).....	13
4.2.3 Elevación.....	13
4.3 Diferencias en LST entre coberturas.....	14
5. Resultados	15
5.1 Extensión de la zona urbana y periferia.....	15
5.2 Elevación.....	16
5.3 Distribución de la temperatura superficial	16
5.4 Cobertura del suelo y temperatura superficial.....	20
6. Discusiones	24
7. Conclusiones	26
8. Recomendaciones	27
9. Bibliografía	28

Listas de figuras

Figura 1. Localización de la zona de estudio.....	10
Figura 2. Diagrama resumen del procesamiento de datos.	14
Figura 3. Zona urbana y periferia (Buffer) de las ciudades estudiadas	15
Figura 4. Temperatura superficial para Sincelejo (polígono gris) y su periferia.....	16
Figura 5. Temperatura superficial para Barranquilla (polígono gris) y su periferia	18
Figura 6. Boxplot de la temperatura para Sincelejo y Barranquilla.....	19
Figura 7. Mapa de las coberturas presentes en Sincelejo.....	20
Figura 8. Mapa de las coberturas presentes en Barranquilla	21
Figura 9. Distribución de la temperatura por cobertura para Sincelejo	22
Figura 10. Distribución de la temperatura por cobertura para Barranquilla	23

Listas de tablas

Tabla 1. Resumen de las capas usadas.....	11
Tabla 2. Clases de coberturas utilizadas	12
Tabla 3. Estadísticas para las áreas urbanas y periferia.....	16
Tabla 4. Cantidad de píxeles por intervalo de temperatura para Sincelejo.....	17
Tabla 5. Cantidad de píxeles por intervalo de temperatura para Barranquilla.....	18
Tabla 6. Resumen de las estadísticas de los boxplots de la figura 6.....	19
Tabla 7. Valor promedio de temperatura para la zona urbana y la periferia	23

Introducción

El efecto de isla de calor se refiere a las temperaturas altas que experimentan las zonas urbanas en relación con su periferia y se relaciona con el hecho de que los edificios, las carreteras y otras estructuras antrópicas tienden a absorber y emitir más calor que las zonas verdes (EPA, 2022). Por tal motivo, en áreas urbanas con mucha densidad de construcciones, la temperatura tiende a ser alta, en comparación con la periferia donde hay menos infraestructura, y a esta diferencia en temperatura se le asigna el nombre de isla de calor. Dos variables claves en el entendimiento de este fenómeno son la temperatura superficial (LST o Land Surface Temperature), la cual se puede entender como “qué tan caliente se sentiría la superficie de la Tierra al tacto en un lugar particular” (NASA, 2023) y la cobertura del suelo, que EEA (2023) define como “aquello que cubre el terreno y permite distinguir entre categorías biofísicas”. La temperatura superficial será el factor que nos indica la cantidad de energía que irradia el suelo, mientras que la cobertura de la tierra moldeará cuánta energía puede liberar o capturar, lo cual dependerá de su albedo, rugosidad, grado de impermeabilidad, calidad, cantidad y tipo de cobertura (Arellano & Roca, 2018). Es necesario puntualizar que la temperatura de la superficie es diferente a la temperatura del aire pues esta última hace referencia a la temperatura medida de forma estándar por estaciones climatológicas a ~ 2 m de la superficie. En comparación, la temperatura de la superficie es medida usualmente por satélites. Estas dos formas de medir la temperatura definen las islas de calor superficiales y las islas de calor atmosféricas, esta última se vincula directamente con la diferencia de temperatura en el aire, mientras que la primera está relacionada con la diferencia de temperatura superficial entre lo urbano y lo rural (EPA, 2022).

El estudio del fenómeno isla de calor se ha abordado desde diferentes ámbitos, por ejemplo, cuáles son los efectos de este fenómeno sobre la salud humana y el desarrollo de enfermedades (Tan et al., 2009; Heaviside et al., 2017), las consecuencias sobre patrones de migración de especies (Zhang et al., 2023), su comportamiento en las próximas décadas (Shen et al., 2022), su relación con el cambio climático (Thanvisitthapon et al., 2023) o su impacto en el consumo de la energía eléctrica (Yang et al., 2020). A pesar de que existen numerosos estudios, estos se concentran principalmente en ciudades de zonas templadas. A nivel nacional, se han realizado para ciudades como Bogotá (Ramírez-Aguilar & De Souza, 2019), Bucaramanga (Villamil-Almeida et al., 2019), Cartago (Garzón et al., 2021), Manizales (Roncancio, 2013) y Medellín (Soto-Estrada, 2019), en contraste, la disponibilidad de información sobre el Caribe es escasa, con solo un artículo referente a Cartagena (Amado,

2022) y esta falta de datos es especialmente notoria dado que el Caribe es una de las regiones más calurosas de nuestro país. Por lo anterior, se realiza un análisis sobre la variabilidad del fenómeno de isla de calor superficial para los años 2002 y 2018 en las ciudades de Barranquilla y Sincelejo durante la temporada seca y se estudia su relación con la cobertura de la tierra. La selección de ambas ciudades se realizó con base en sus diferencias geográficas, específicamente la proximidad de Barranquilla al mar y cuerpos de agua continentales, comparado con Sincelejo que se localiza al interior de la región Caribe.

1. Planteamiento del problema

El panorama de la investigación de isla de calor en América Latina es poco alentador en comparación con Europa, Asia o Norteamérica y es más crítico para Colombia puesto que solo nos corresponde el 5% de los estudios realizados en América Latina entre 2015 y 2020 (Palme & Carrasco, 2022). Según DANE (2023) la población conjunta de Barranquilla y Sincelejo para el año 2018 fue de 1.484.092 habitantes, siendo las ciudades capitales número 1 y 7 respectivamente con mayor población en la región Caribe de Colombia (DANE, 2023). Esta región se caracteriza por un clima cálido con una temperatura promedio de 27.4 °C (IDEAM, 2010a) que puede tener efectos negativos en la salud, ya sean directos al aumentar la mortalidad, o indirectos a través de enfermedades respiratorias o cardiovasculares (Tan et al., 2009; Laaidi et al., 2012; Dai & Liu, 2022). Adicionalmente, el aumento de temperatura relacionado con el cambio climático agudizará el efecto de islas de calor y sus consecuencias negativas sobre los habitantes urbanos (IPCC, 2022).

El Caribe colombiano constituye una región prioritaria para el estudio de este fenómeno debido a sus características climáticas, y al rápido y, en la mayoría de los casos, caótico crecimiento de sus ciudades (Da Cunha, 2009). Por lo tanto, este estudio aborda la siguiente pregunta: ¿Cómo varía el efecto de isla de calor superficial en la temporada seca en las ciudades de Barranquilla y Sincelejo para los años 2002 y 2018 y cuál es su relación con la cobertura del suelo? Teniendo como hipótesis nula que no existe relación alguna entre la temperatura superficial y el tipo de cobertura, y que la temperatura no se relaciona con la proximidad a la costa y cuerpos de agua. Por el contrario, la hipótesis alterna sostiene que la temperatura superficial presenta diferencias entre las coberturas del suelo, y que será menor en ciudades costeras y cercanas a cuerpos de agua.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

- Analizar la variación del efecto de isla de calor superficial en la temporada seca en las ciudades de Barranquilla y Sincelejo para los años 2002 y 2018 y su relación con la cobertura del suelo.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar la extensión de la zona urbana y su periferia para Barranquilla y Sincelejo en los años 2002 y 2018.
- Analizar los patrones de temperatura superficial en la temporada seca en las dos ciudades y periodos mencionados, abarcando tanto la zona urbana como su periferia.
- Analizar la relación entre cobertura del suelo y temperatura superficial en la temporada seca en las ciudades y años indicados.

3. Área de estudio

Barranquilla está ubicada en el litoral norte de la región Caribe colombiana a orillas del río Magdalena, es un puerto aéreo, marítimo, fluvial y de comunicaciones (fig. 1B-1C). La ciudad hace parte de la entidad administrativa del Área Metropolitana de Barranquilla (AMB, 2017). Para efectos de esta investigación el área de estudio se define como el área urbana continua de Barranquilla y Soledad (en adelante referida como Barranquilla) y se excluye las áreas urbanas de Galapa, Malambo y Puerto Colombia ya que se encuentran separadas espacialmente de Barranquilla. Con respecto a la climatología de Barranquilla, el promedio de precipitación anual es de 822 mm, siendo mayo, septiembre y octubre los meses más lluviosos mientras que el primer trimestre del año es el más seco. La temperatura promedio anual es de 26.9 °C y según la clasificación climática de Köppen posee un clima tropical lluvioso de sabana con invierno seco (Aw), además presenta elevaciones iniciando en 0 hasta los 150 msnm (IDEAM, 2010a).

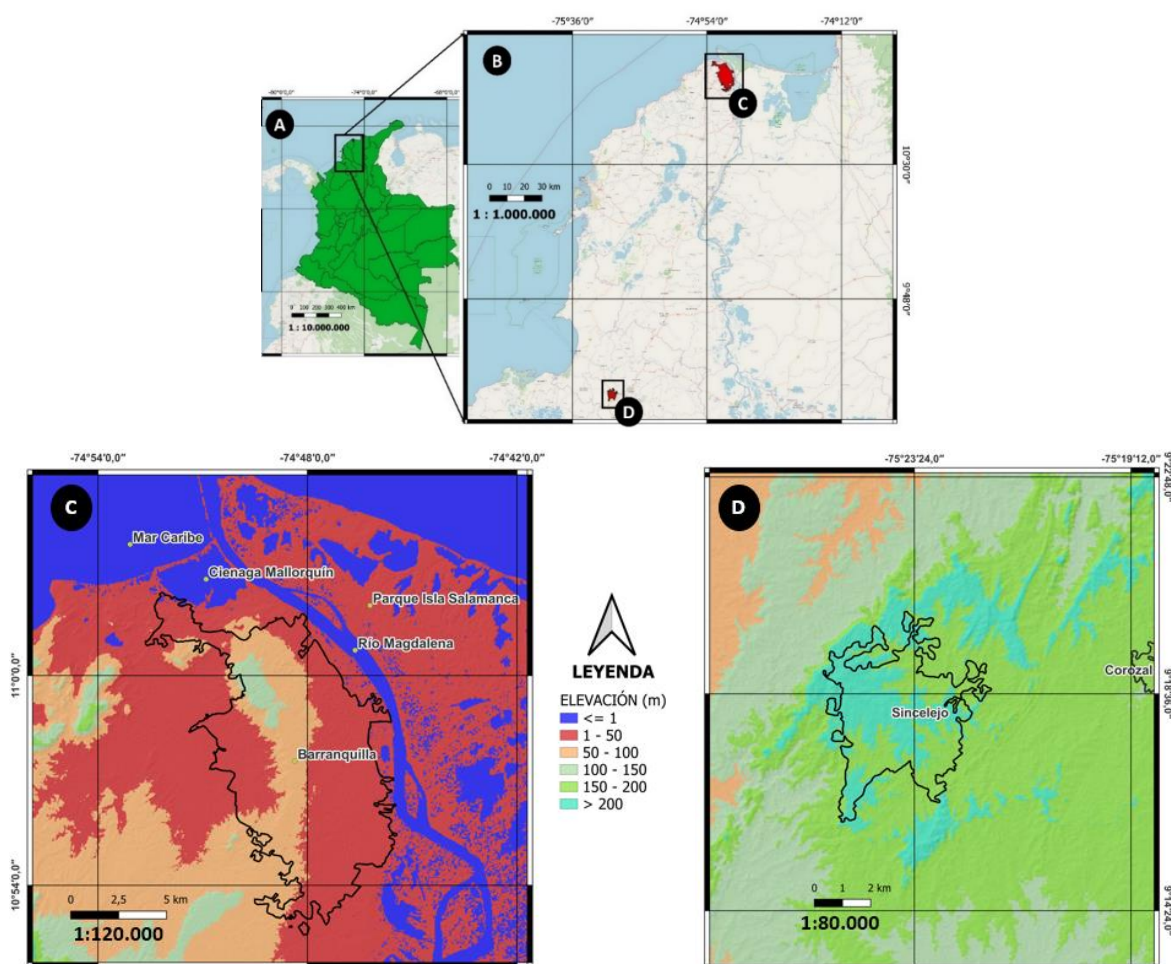


Figura 1. Localización de la zona de estudio. (A) División administrativa nacional. (B) Región Caribe, ciudades estudiadas en rojo. (C) Topografía del límite urbano Barranquilla-Soledad 2018 y sus alrededores. (D) Topografía del límite urbano de Sincelejo 2018 y sus alrededores.

Por otra parte, Sincelejo se encuentra ubicado en el centro de la región Caribe en la subregión de la Sabana (fig. 1B-1D), con elevaciones desde los 50 hasta los 260 metros y un clima cálido seco que según la clasificación de Köppen corresponde a un clima tropical lluvioso de sabana con invierno seco (Aw). La precipitación anual promedio varía entre 500 y 1200 milímetros con un promedio de 1099 mm, siendo mayo, agosto y septiembre los meses más lluviosos, mientras que su contraparte seca son los tres primeros meses del año, además la temperatura media anual es 27.1 °C (Alcaldía, 2023; IDEAM, 2010a).

Para el presente análisis se definieron para cada ciudad y periodo, un polígono urbano y una periferia, ya que el efecto de isla de calor superficial se calcula como la diferencia de temperatura entre estas dos zonas. Los periodos se seleccionaron como el más antiguo (2000-2002) y más reciente (2018) disponibles en el mapeo nacional de cobertura de la tierra del IDEAM (IDEAM, 2023). Además, la temporada seca en esta revisión hace referencia a los meses del año donde la precipitación es menor, que para Barranquilla corresponde al periodo desde diciembre hasta abril y para Sincelejo comprende desde diciembre hasta marzo (IDEAM, 2010a). La selección de este periodo se realizó para minimizar la cobertura de nubes en los datos satelitales de temperatura superficial.

4. Metodología

4.1 Datos

Los datos usados en este análisis, así como sus características más relevantes se presentan en la Tabla 1. Para cada año se seleccionó como periodo de estudio la temporada seca, definida de acuerdo con la climatología de cada ciudad. Lo anterior con el fin de minimizar el porcentaje de datos faltantes en las imágenes satelitales y hacer comparables los datos de ambas ciudades.

Tabla 1. Resumen de las capas usadas, mostrando las principales características de los datos.

Capa	Año	Descripción	Fuente
Cobertura de la tierra	2000-2002, 2018	Vector de cobertura según metodología Corine Land Cover, 1:100.000.	Corine Land Cover IDEAM (2012); IDEAM (2021)
Temperatura superficial (LST)	1999-2004, 2015-2020	Ráster de temperatura superficial de 30 m.	Landsat 5, 7 y 8; USGS (2023b)
Elevación	2000	Ráster de elevación de 1 arcsec (aprox. 30 m).	SRTM; NASA JPL (2020)

4.2 Procesamiento de datos

4.2.1 Cobertura, polígono urbano y periferia

Para delimitar el área de estudio se procedió a extraer en Qgis 3.32.0 del vector de cobertura el polígono urbano y a partir de éste se generó la periferia usando un buffer de 5 km; este valor se encuentra dentro del rango de valores usado en otros estudios (Lai et al. 2018; Li et al. 2019; Moffett, Makido, and Shandas 2019). El polígono de la periferia se usó para cortar la capa de cobertura de la tierra para la cual se usaron las clases indicadas en la Tabla 2. Específicamente, el sistema de Corine Land Cover considera hasta 6 niveles de clasificación para las coberturas (IDEAM, 2010b) donde el nivel 1 representa el más general, y el nivel 6 el más detallado. En el presente análisis, se utilizó el nivel 1 para las coberturas denominadas “Territorios artificializados”, “Áreas húmedas” y “Superficies de agua” y el nivel 2 para los “Territorios agrícolas” y “Bosques y áreas seminaturales” (Tabla 2). La justificación de porque se están usando estos niveles se debe a la profundidad de la investigación. Si se usa el nivel 6 los resultados serían aptos para un trabajo de posgrado, al usar los primeros niveles de clasificación se asegura que la investigación y su extensión metodológica quedan dentro del eje temático de

un pregrado. Por otro lado, para algunas coberturas se usa el nivel 1 mientras que en otras se usa el nivel 2, esto se hace así porque el comportamiento de la temperatura sería similar para un rango de coberturas, por ejemplo, la temperatura en las subclasificaciones de los “territorios artificializados” sería similar por lo cual se decidió tomar el nivel 1, por el contrario, el comportamiento de la temperatura en las subclasificaciones de los “territorios agrícolas” sería diferente por tanto se decide usar el nivel 2.

Tabla 2. Clases de coberturas utilizadas en este análisis. Se indican además aquellas que fueron reclasificadas. La reclasificación tiene por objetivo simplificar el análisis, usar los 6 niveles de clasificación conllevaría a un análisis muy extenso que sería idónea para un trabajo de postgrado.

Clasificación Corine land Cover (IDEAM, 2010b)	Nivel usado para la reclasificación	Nombre después de la reclasificación
1.1.1. Tejido urbano continuo	1	1. Territorios artificializados
1.1.2. Tejido urbano discontinuo		
1.2.1. Zonas industriales o comerciales		
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados		
1.2.3. Zonas portuarias		
1.2.4. Aeropuertos		
1.3.1. Zonas de extracción minera		
1.3.2. Zona de disposición de residuos		
1.4.1. Zonas verdes urbanas		
1.4.2. Instalaciones recreativas		
2.1.1. Otros cultivos transitorios	2	2.1. Cultivos transitorios
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	2	2.2. Cultivos permanentes
2.3.1. Pastos limpios	2	2.3. Pastos
2.3.2. Pastos arbolados		
2.3.3. Pastos enmalezados		
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	2	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales		
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales		
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales		
3.1.1. Bosque denso		
3.1.2. Bosque abierto	2	3.1. Bosques
3.1.3. Bosque fragmentado		
3.1.4. Bosque de galería y ripario		
3.1.5. Plantación forestal		
3.2.1. Herbazal	2	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
3.2.2. Arbustal		
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición		
3.3.1. Zonas arenosas naturales	2	

3.3.3. Tierras desnudas y degradadas		3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación
4.1.1. Zonas pantanosas	1	4. Áreas húmedas
4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua		
4.2.1. Pantanos costeros		
5.1.1. Ríos (50 m)	1	5. Superficies de agua
5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales		
5.1.3. Canales		
5.1.4. Cuerpos de agua artificiales		
5.2.1. Lagunas costeras		

4.2.2 Temperatura de la superficie (LST)

Las capas de temperatura superficial se obtuvieron de los satélites Landsat 5, 7 y 8. Se seleccionaron las imágenes para los meses de la estación seca definidos anteriormente y un filtro de nubosidad menor al 35%. De acuerdo con estos filtros, se obtuvieron 38 y 76 imágenes para Barranquilla (2002 y 2018 respectivamente), y 29 y 48 imágenes para Sincelejo, respectivamente. Posteriormente, se calculó un promedio de éstas para cada periodo y ciudad. La selección y procesamiento de los datos de LST se realizaron en Google Earth Engine (GEE).

4.2.3 Elevación

Se usaron datos de elevación del SRTM (Tabla 1) para cada ciudad con el fin de analizar la diferencia de altitud entre la zona urbana y su periferia. Para este fin se recortaron los rásteres de elevación usando los polígonos urbanos y de periferia de cada ciudad, y se generaron estadísticas básicas incluyendo valor mínimo, máximo, promedio y desviación estándar. Además, se implementó el coeficiente de correlación de Spearman y un modelo de regresión lineal para determinar si la elevación podría tener un efecto significativo sobre los patrones de temperatura superficial.

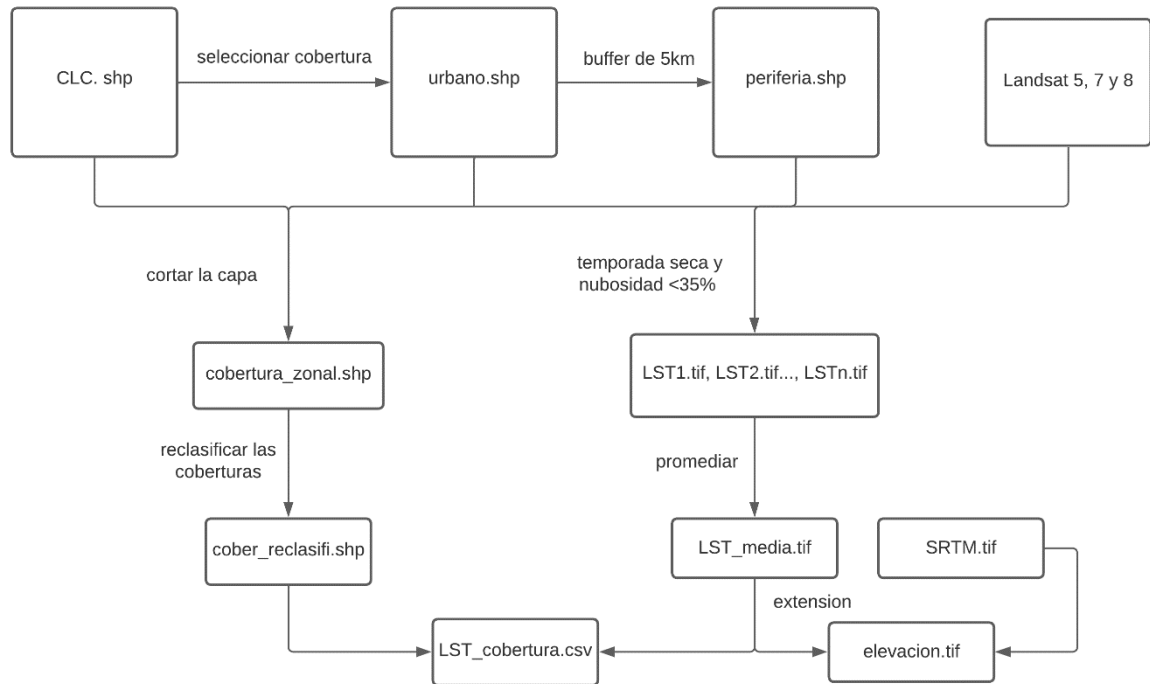


Figura 2. Diagrama resumen del procesamiento de datos.

4.3 Diferencias en LST entre coberturas

Para identificar las diferencias en temperatura superficial entre coberturas, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis y la prueba de Dunn. El primer test solo muestra un valor de significancia (p valor) para todas las coberturas, por lo cual se recurre a la prueba de Dunn con comparaciones por pares para obtener las significancias de cada tipo de cobertura. Para ambas pruebas se maneja un valor de $\alpha = 0.05$ y la implementación de estas pruebas se debe a la distribución no normal de los datos. Para determinar si dos coberturas son estadísticamente iguales, su p valor debe ser mayor que alpha, de lo contrario se asume que son diferentes estadísticamente.

5. Resultados

5.1 Extensión de la zona urbana y periferia.

La definición de las áreas urbanas y sus periferias para Sincelejo y Barranquilla, años 2002 y 2018, se muestran en la Figura 3. Para ambas ciudades es notorio el incremento del área urbana entre ambos periodos, ~ 15% para Barranquilla, y 41% para Sincelejo (Figura 3, Tabla 3).

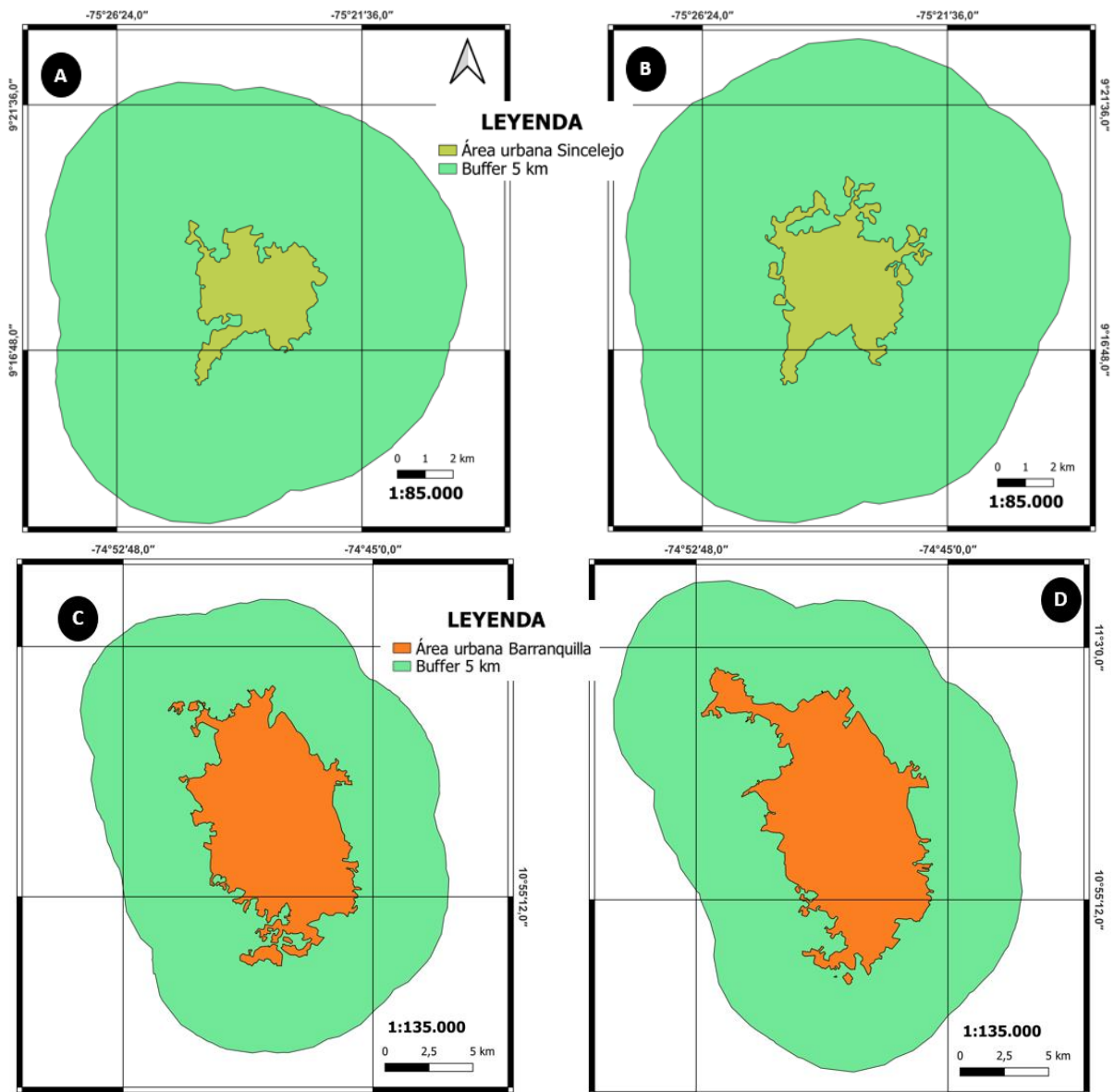


Figura 3. Zona urbana y periferia (Buffer) de las ciudades estudiadas. (A) Sincelejo 2002. (B) Sincelejo 2018. (C) Barranquilla 2002. (D) Barranquilla 2018.

Tabla 3. Estadísticas para las áreas urbanas y periferia para Barranquilla y Sincelejo.

Ciudad	Zona	Área (Km ²)		Cambio (%)
		2002	2018	
Sincelejo	Urbana	14.34	20.29	41.49
	Periferia	174.44	195.81	12.25
Barranquilla	Urbana	88.73	101.05	13.88
	Periferia	325.28	358.88	10.33

5.2 Elevación

El análisis de correlación entre la temperatura y la elevación revela valores diferentes para ambas ciudades. En Sincelejo, el coeficiente de correlación de Spearman es de 0.13 y un valor de 0.61 para Barranquilla. Debido al resultado de Barranquilla se aplica un modelo de regresión lineal donde $r^2 = 0.26$, con los anteriores resultados se procede a establecer las incidencias de una variable sobre la otra.

5.3 Distribución de la temperatura superficial

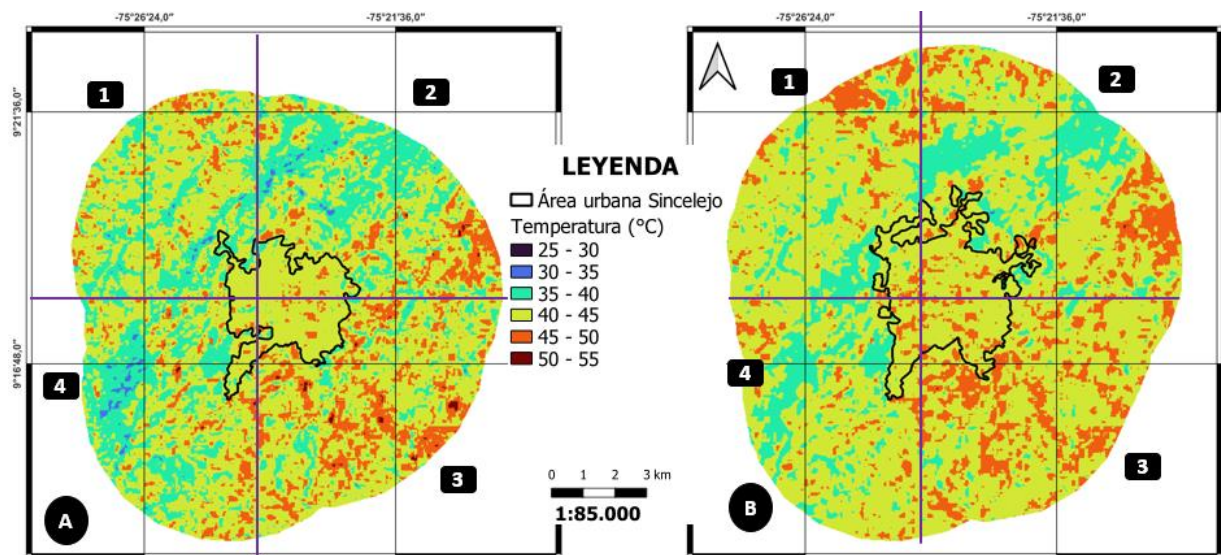


Figura 4. Temperatura superficial para Sincelejo (polígono gris) y su periferia. (A) Distribución de la temperatura para 2002. (B) Distribución de la temperatura para 2018. Las líneas violetas indican la división de la zona en cuatro cuadrantes para que la explicación sea más intuitiva y que el lector pueda localizarse con mayor facilidad.

Respecto a los patrones de temperatura superficial, para el caso de Sincelejo la zona urbana presenta valores entre 35°C y 50 °C, siendo el intervalo entre 40–45°C el más frecuente, correspondiendo al 61.22% y 69.69% del total de los datos para 2002 y 2018 respectivamente (Figura 4, Tabla 4). En comparación, los intervalos extremos (30-35 °C y 50-55°C) son los de

menor frecuencia presentando menos del 1% del total de los datos para cada periodo. Para el caso de la zona de la periferia, se presentan temperaturas desde los 30°C hasta los 55°C, con el mayor % en el rango de 40-45°C (Figura 4, Tabla 4). Para ambos periodos, las mayores temperaturas se presentan en el cuadrante SE (3) del área de estudio (Figura 4), mientras que los demás cuadrantes presentan más área con temperaturas menores.

Tabla 4. Cantidad de píxeles por intervalo de temperatura para Sincelejo, se muestra la cantidad total por año y por zonas (urbano/periferia).

Intervalo (°C)	Píxeles		Porcentaje (%)		Porcentaje (%)			
					Urbano		Periferia	
	2002	2018	2002	2018	2002	2018	2002	2018
30-35	1276	20	0.61	0.008	0	0	0.66	0.009
35-40	51635	35076	24.63	14.61	4.57	1.5	26.27	15.92
40-45	128354	167359	61.22	69.73	88.66	83.27	58.93	68.12
45-50	27882	37565	13.30	15.65	6.71	15.24	13.83	15.64
50-55	486	22	0.23	0.009	0	0	0.25	0.01
Total	209633	240042	~100	~100	~100	~100	~100	~100

Para el caso de Barranquilla las figuras 5A-B y la tabla 5 muestran que para la zona urbana (polígono gris) el rango de temperatura superficial va desde 30 °C hasta 50 °C en 2002, mientras que para 2018 tiene un rango entre 25 °C y 50 °C. La mayor frecuencia de datos se presenta en el intervalo 40-45 °C para ambos periodos con un 61.63% para el primero y 79.92% para el último, mientras que el intervalo 25-30 °C es el de menor frecuencia (menos de 1% de los datos). De los 5 intervalos presentes los dos más cálidos (40-45 y 45-50 °C) son los que presentan aumento en el porcentaje de píxeles de 2002 a 2018. Para la zona de la periferia el intervalo con mayor frecuencia es 35-40 °C con un 35.10% y 33.97% para 2002 y 2018 (tabla 5) respectivamente, donde el rango de temperatura varía entre 25 °C y 55 °C. Para todos los cuadrantes se aprecia aumento en la temperatura (fig. 5).

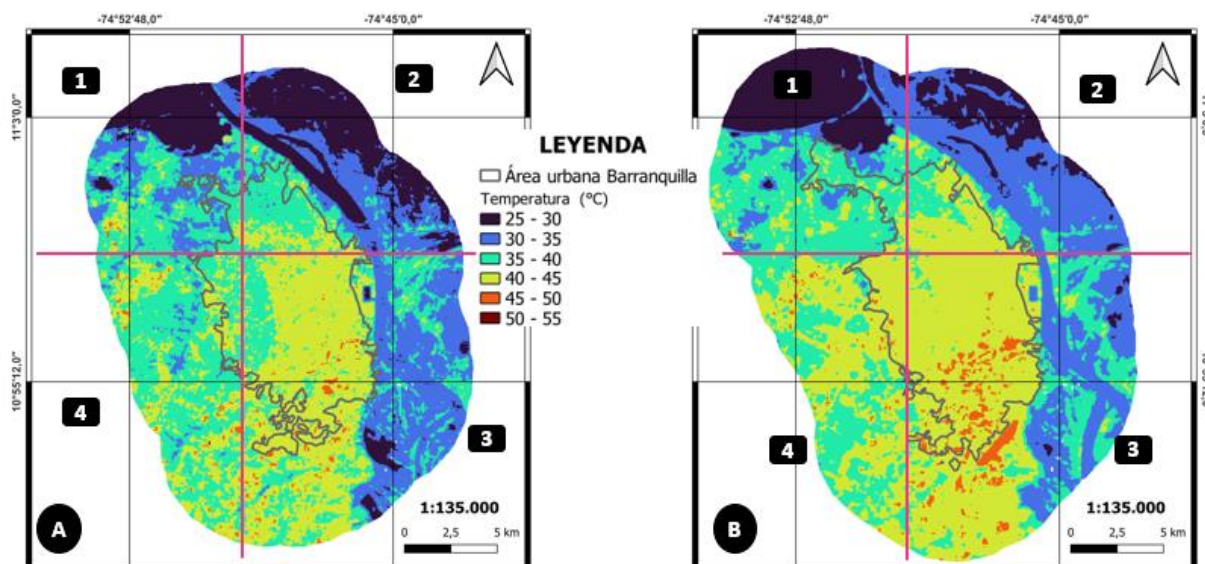


Figura 5. Temperatura superficial para Barranquilla (polígono gris) y su periferia. (A) Distribución de la temperatura para 2002. (B) Distribución de la temperatura para 2018.

Tabla 5. Cantidad de píxeles por intervalo de temperatura para Barranquilla, se muestra la cantidad total por año y por zonas (urbano/periferia).

Intervalo (°C)	Píxeles		Porcentaje (%)		Porcentaje (%)			
	2002	2018	2002	2018	Urbano		Periferia	
					2002	2018	2002	2018
25-30	60236	30721	13.29	6.4	0	0.0008	16.98	8.32
30-35	100380	104335	22.15	21.67	0.54	0.1	28.12	28.28
35-40	160563	141563	35.42	29.38	36.61	14.37	35.10	33.97
40-45	127769	192763	28.23	40.0	61.63	79.92	18.87	27.73
45-50	4333	12449	0.95	2.59	1.22	5.57	0.88	1.66
50-55	16	0	0.003	0	0	0	0.004	0
Total	453297	481831	~100	~100	~100	~100	~100	~100

Por otro lado, la comparación de la temperatura superficial entre zona urbana y periferia indica que indiferente de la ciudad o el período, la temperatura de la zona urbana supera la temperatura de la periferia (figura 6, tabla 6). Para el caso de Barranquilla 2018, al menos el 75% de los datos de la periferia están por debajo del 25% de los datos de la zona urbana. Un factor común para ambas ciudades es que el rango de la zona de la periferia es mayor que el rango de la zona urbana.

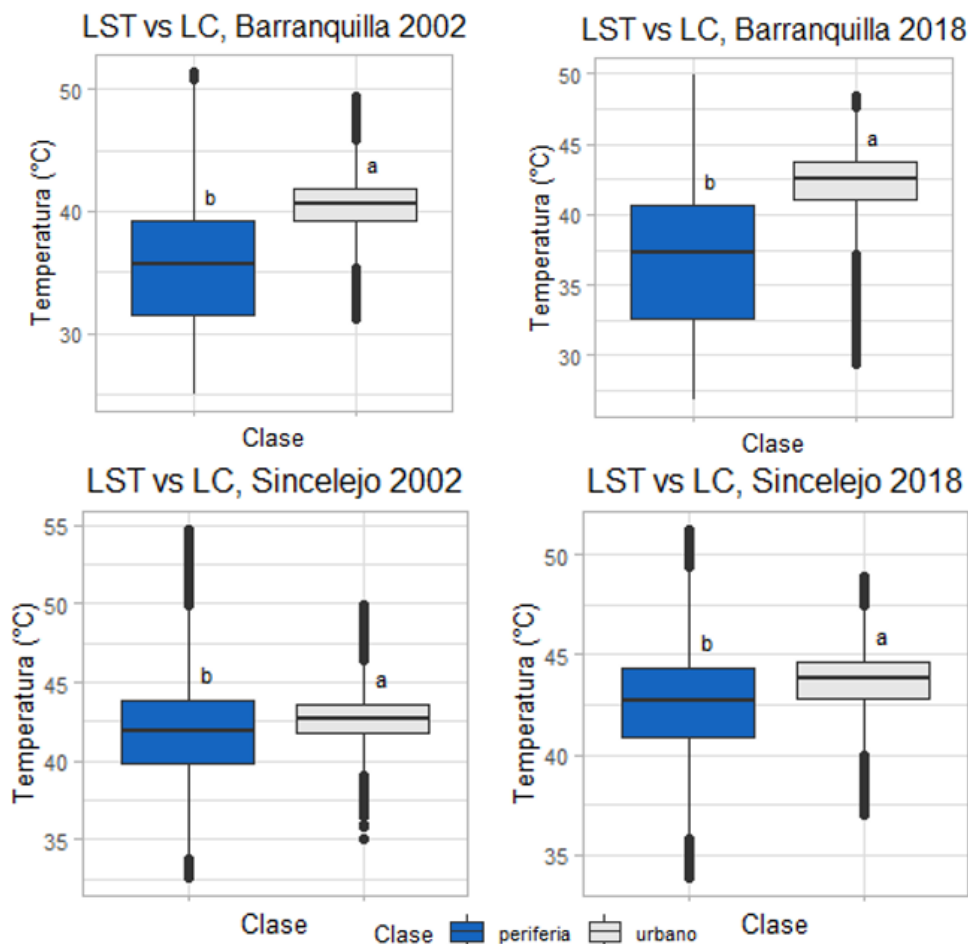


Figura 6. Boxplot de la temperatura comparando periferia vs zona urbana para Barranquilla y Sincelejo para los años 2002 y 2018. Las letras sobre las cajas indican la significancia estadística, letras iguales indican que no son diferentes estadísticamente. La significancia fue determinada mediante la prueba de Dunn usando un $\alpha = 0.05$.

Tabla 6. Resumen de las estadísticas de los boxplots de la figura 6. Los valores mínimos y máximos no incluyen los valores atípicos, definidos como aquellos valores que superan 1.5 veces el rango intercuartil y que están por fuera de los bigotes (Cano, 2020).

Estadística	Barranquilla				Sincelejo			
	2002		2018		2002		2018	
	Urbano	Periferia	Urbano	Periferia	Urbano	Periferia	Urbano	Periferia
Mínimo	35.36	25.02	37.22	26.84	39.0	33.75	39.98	35.76
Q1	39.28	31.54	41.10	32.57	41.77	39.82	42.77	40.88
Mediana	40.66	35.66	42.56	37.26	42.72	41.88	43.84	42.68
Q3	41.89	39.21	43.69	40.60	43.61	43.86	44.63	44.29
Máximo	45.81	50.63	47.53	49.94	46.37	49.93	47.42	49.39

5.4 Cobertura del suelo y temperatura superficial

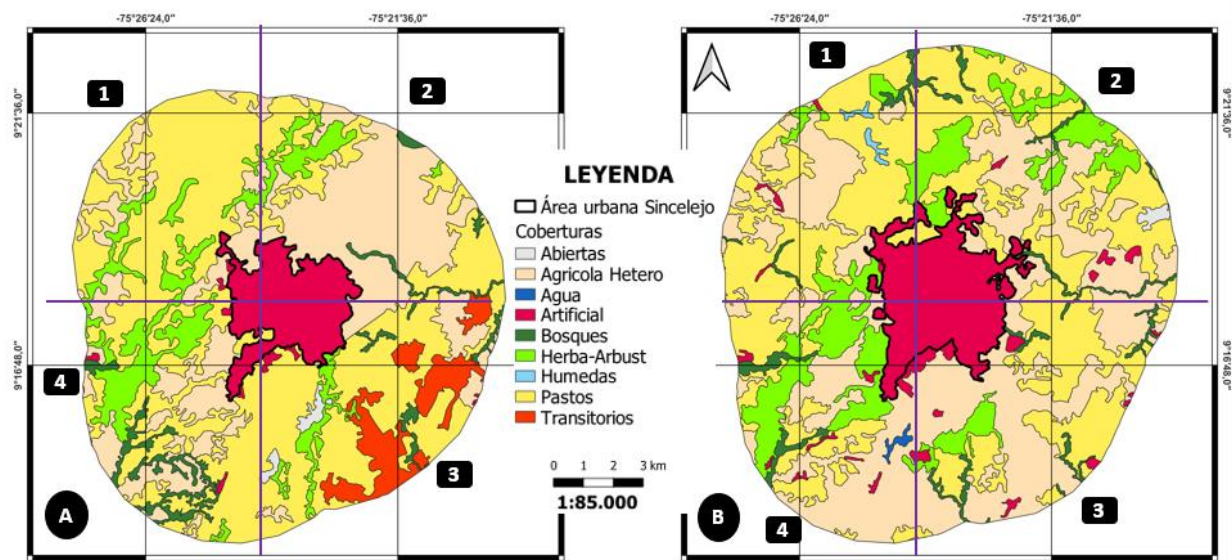


Figura 7. Mapa de las coberturas presentes en Sincelejo para el año 2002 (A) y 2018 (B). Polígono de borde negro corresponde a la zona urbana de la ciudad. Abiertas: Áreas abiertas, sin o con poca vegetación; Agrícola Hetero: Áreas agrícolas heterogéneas; Agua: Superficies de agua; Artificial: Territorios artificializados; Bosques: Bosques; Herba-Arbust: Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva; Húmedas: Áreas húmedas; Pastos: Pastos; Transitorios: Cultivos transitorios.

En Sincelejo, para ambos periodos la periferia presenta una mayor diversidad de coberturas que la zona urbana (Figura 7). Específicamente, la periferia incluye las clases de áreas abiertas, sin o con poca vegetación, áreas agrícolas heterogéneas, territorios artificializados, bosques, áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva, pastos y cultivos transitorios, agua (sólo para el 2018) y áreas húmedas (sólo para el 2018). En comparación, la zona urbana únicamente presenta la cobertura de territorios artificializados. Para 2002 (fig. 7A), los cuadrantes 1 y 3 presenta un dominio la cobertura de pastos, mientras que el cuadrante 2 es dominado por áreas agrícolas heterogéneas, siendo esas dos coberturas las más extensas en la periferia. En cambio, en 2018 (fig. 7B) el cuadrante 3 está dominado por las áreas agrícolas heterogéneas, mientras que en 1 y 2 se pierde la hegemonía de las coberturas dominantes de 2002, además surgen dos nuevas coberturas (superficies de agua y áreas húmedas) pero desaparecen los cultivos transitorios. Adicionalmente, en 2018 las áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva son más extensas, convirtiéndose en la tercera cobertura de mayor área para la zona de la periferia.

Para Barranquilla la distribución de la cobertura es variada sin presentar dominancia de una u otra clase. Por ejemplo, en 2002 hacia el este y norte del polígono urbano se encuentran

cuerpos de agua, mientras que al sur y al oeste el terreno se reparte en pastos, áreas agrícolas y vegetación herbácea y/o arbustiva. Para 2018, los cuadrantes 1 y 4 presentan variación en extensión de las coberturas, siendo más equitativo para la vegetación herbácea y/o arbustiva y artificial; hacia el este y norte la cobertura sigue siendo predominante para las superficies de agua y las áreas húmedas, mientras que el polígono central (área urbana) presenta crecimiento hacia el noroeste.

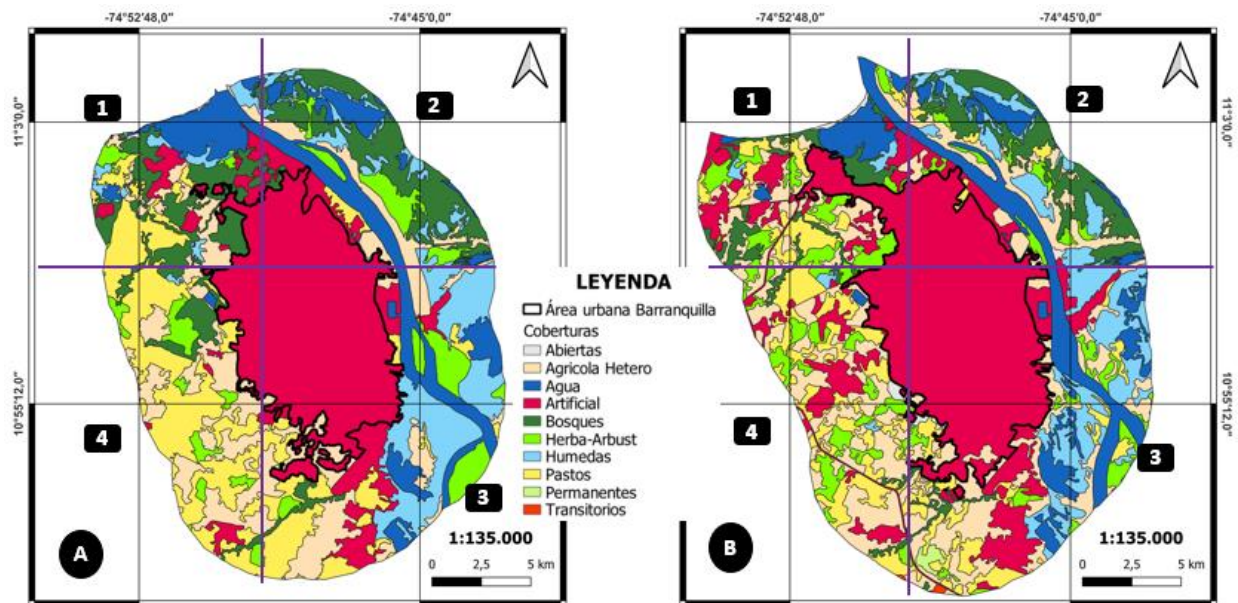


Figura 8. Mapa de las coberturas presentes en Barranquilla para el año 2002 (A) y 2018 (B). Polígono de borde negro corresponde a la zona urbana de la ciudad. Abiertas: Áreas abiertas, sin o con poca vegetación; Agrícola Hetero: Áreas agrícolas heterogéneas; Agua: Superficies de agua; Artificial: Territorios artificializados; Bosques: Bosques; Herba-Arbust: Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva; Húmedas: Áreas húmedas; Pastos: Pastos; Permanentes: Cultivos permanentes; Transitorios: Cultivos transitorios.

Las diferencias de temperatura superficial por cobertura se presentan en la figura 9. Para 2002 y 2018, las áreas abiertas son la cobertura con la mayor temperatura, por el contrario, las áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva son las de menor temperatura. En 2002, las coberturas con temperaturas superficiales intermedias incluyen los territorios artificializados, pastos y cultivos transitorios; estas dos últimas no son significativamente diferentes. Para 2018, los territorios artificializados y los pastos no presentan diferencias significativas en su temperatura superficial, igual que las superficies de agua y áreas agrícolas heterogéneas.

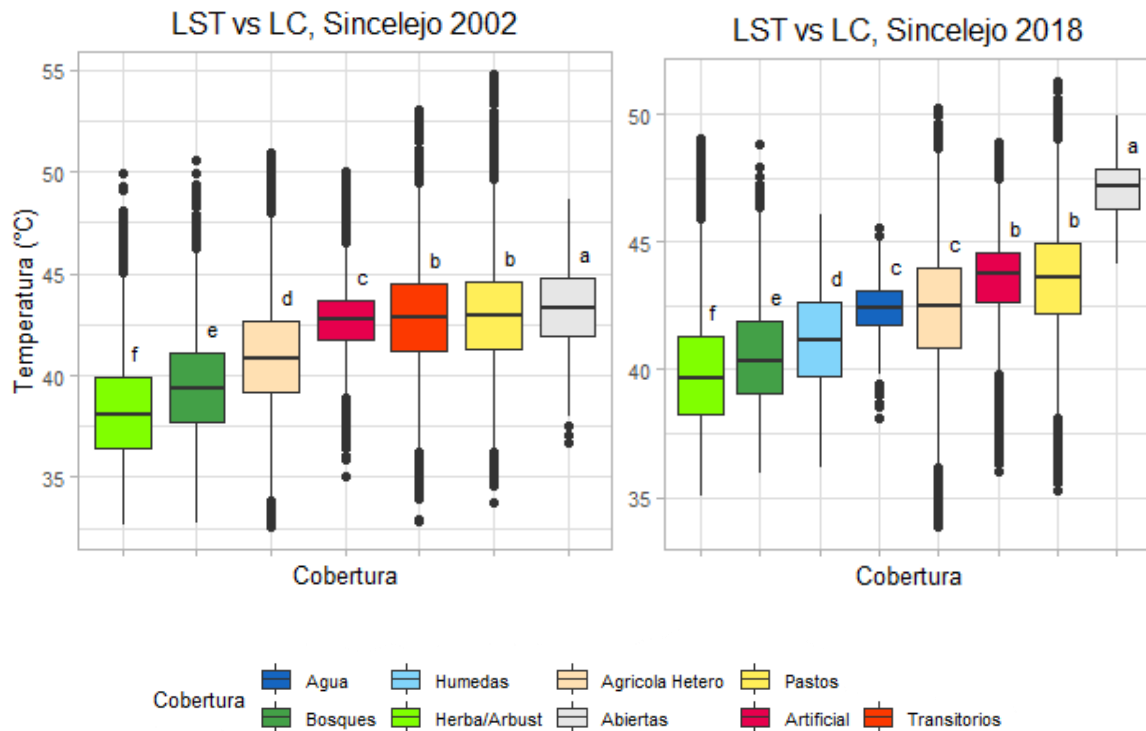


Figura 9. Distribución de la temperatura por cobertura para Sincelajo para 2002 y 2018. Las letras sobre las cajas indican la significancia estadística, letras iguales indican igualdad estadísticamente. La significancia fue determinada mediante la prueba de Dunn usando un $\alpha = 0.05$.

La distribución de la temperatura por cobertura para Barranquilla se presenta en la figura 10. Para 2002, las superficies de agua son la cobertura con la menor temperatura, mientras que, los territorios artificializados son la cobertura más cálida, en la parte intermedia encontramos a las áreas húmedas y las áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva. En 2018, la cobertura “agua” sigue manteniéndose como la menos cálida y los cultivos transitorios se convierten en la de mayor temperatura superficial. Para 2002 todas las coberturas son diferentes estadísticamente, pero en 2018 los territorios artificializados y los cultivos permanentes son iguales estadísticamente.

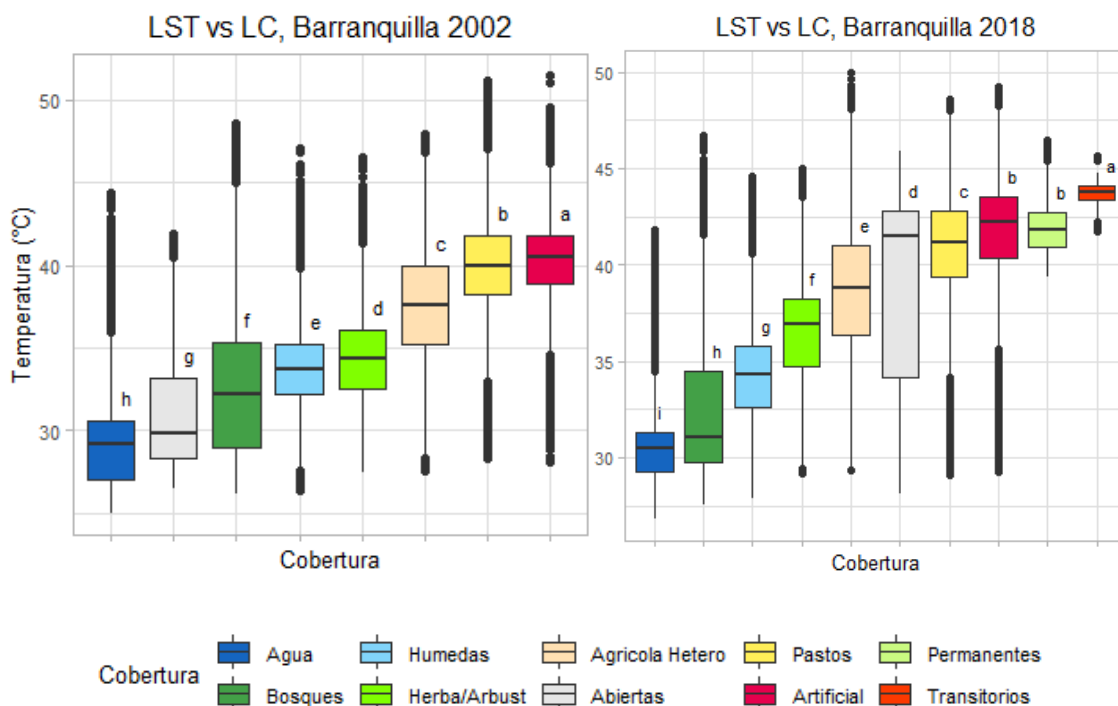


Figura 10. Distribución de la temperatura por cobertura para Barranquilla. Las letras sobre las cajas indican la significancia estadística, letras iguales indican igualdad estadísticamente. La significancia fue determinada mediante la prueba de Dunn usando un $\alpha = 0.05$.

Por último, si calculamos el promedio de todos los píxeles de temperatura dentro de la zona urbana y de la periferia para las dos ciudades y periodos (tabla 7) encontramos que para Barranquilla existe una diferencia de 5.12 °C entre esas dos zonas para 2002, y en 2018 la diferencia aumenta hasta 5.52 °C. En cambio, en Sincelejo la diferencia está más atenuada, puesto que a 2002 le corresponde una diferencia de 0.87 °C y para 2018 la diferencia incrementa hasta 1.12 °C.

Tabla 7. Valor promedio de temperatura para la zona urbana y la periferia.

* *	Barranquilla (°C)			Sincelejo (°C)		
	Urbano	Periferia	Diferencia	Urbano	Periferia	Diferencia
2002	40.56	35.44	5.12	42.70	41.83	0.87
2018	42.27	36.75	5.52	43.65	42.53	1.12

6. Discusiones

Los resultados de esta investigación corroboran lo encontrado por otros estudios (EPA, 2022; Taha, 2004; Amado, 2022) que muestran que la temperatura superficial es mayor en la zona urbana en comparación con su periferia, sin embargo, los resultados del presente estudio indican que esta diferencia puede ser sutil (~ 1 °C) como en el caso de Sincelejo, o marcada (~ 5 °C) como lo muestra Barranquilla. Estas diferencias pueden explicarse por múltiples factores tales como la cobertura vegetal, el contexto geográfico (costa vs. interior) y la elevación. Asimismo, podemos establecer relaciones entre algunas coberturas y la temperatura, por ejemplo, los bosques, las áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva, las superficies de agua y las áreas húmedas son los tipos de coberturas que presentan los menores valores de temperatura superficial, en su contraparte, los territorios artificializados y los pastos son las coberturas con valores de temperatura más elevados. Lo anterior es consistente con la premisa de que el albedo, el grado de impermeabilidad, la cantidad y el tipo de cobertura influyen en la temperatura (Arellano & Roca, 2018). Además, la presencia/abundancia de vegetación disminuye las temperaturas de la zona circundante (Ochoa, 1999) que para el caso de la zona urbana la vegetación es poca o nula.

Otra consideración para tener en cuenta es la distribución de la temperatura en Barranquilla y Sincelejo. En Barranquilla (ver fig. 5 y 8) hacia el este tenemos una conjunción de coberturas “frías”, luego se encuentra el área urbana que es cálida y al oeste la temperatura vuelve a decaer, este comportamiento es el descrito en la literatura (EPA, 2022) y corresponde con el fenómeno de isla de calor superficial. No obstante, para Sincelejo dicho comportamiento no es evidente (ver fig. 4 y 7) pues el decaimiento de la variable se presenta de sureste a noroeste sin indicar que existe una diferencia concisa entre lo urbano y lo rural y que esta sirva para identificar la isla de calor. Siendo más preciso, la variación en la temperatura entre lo urbano y lo rural para Sincelejo es de alrededor de 1 °C (ver tabla 7) y debido a que las coberturas que predominan son cálidas (pastos y áreas agrícolas) y estadísticamente similares a la cobertura de la zona urbana, la distribución de la temperatura en Sincelejo se convierte en un mosaico cálido interrumpido por coberturas “frías”.

Un resultado contraintuitivo es el relacionado a las áreas abiertas, sin o con poca vegetación para Barranquilla, en particular para el periodo 2002, donde es contrario a lo esperado pues es una de las coberturas menos cálidas y en 2018 exhibe gran dispersión en los datos y asimetría negativa. La explicación de este fenómeno puede estar relacionada con la poca extensión de esta cobertura, y con la influencia de las coberturas circundantes (Figura 8,

cuadrante 1), ya que para 2002 esta cobertura está localizada entre la ciénaga de Mallorquín y el mar Caribe (es una barra de arena) y como se mencionó las superficies de agua son coberturas que presentan bajas temperaturas. Para 2018 debemos notar que esta cobertura está rodeada por cuerpos de agua y por la zona urbana (Figura 8), y debido a que estas dos coberturas son opuestas en temperaturas se entiende la dispersión en los datos de las áreas abiertas. *A priori* sabemos que el calor específico del agua es mayor que el calor específico de la tierra y el del concreto (4.18, ~1 y 0.84 J/g °C, respectivamente. Young & Freedman, 2013), lo anterior nos dice que se necesita más energía para cambiar la temperatura del agua que la temperatura de la tierra o del concreto, y por lo tanto explica que los cuerpos de agua presenten temperaturas superficiales menores durante el día (la hora de toma de las imágenes es ~10 am), así como menos dispersión de datos. Es de aclarar que el anterior comportamiento es aplicable para cuerpos de agua profundos, puesto que en el caso de Sincelejo 2018 (Figura 7 y 9) las coberturas acuosas son someras. Los resultados de esta investigación indican que las coberturas acuosas pueden modificar o influir en la temperatura hasta el punto de generar zonas “frías” dentro de la ciudad (Figura 5, cuadrante 2 en la zona urbana).

Por último, otro punto para discutir es la relación entre elevación y temperatura, para el caso de Sincelejo el coeficiente de Spearman indica que la relación entre elevación y temperatura es despreciable. En cambio, para Barranquilla el coeficiente indica que existe una influencia moderada de la elevación sobre la temperatura, en otras palabras, si aumenta la altura, la temperatura también. Según Müller & Weiss (2019) el gradiente térmico es de -0.65°C/100m para la troposfera, en otras palabras, cada 100 m la temperatura disminuye en un factor constante de 0.65 °C, teniendo presente esta consigna los resultados para Barranquilla serían opuestos. Para descifrar dicho comportamiento, se aplica un modelo de regresión lineal que indica que estas dos variables tienen significancia estadística, pero el modelo no puede explicar la mayoría de los datos debido a la alta dispersión. Además, debemos tener en cuenta la distribución de las coberturas, en las zonas bajas la temperatura es menor por las coberturas acuosas y vegetadas, en las zonas de mayor elevación la temperatura es alta por la dominancia de la cobertura artificial y patos, lo cual explica porque la temperatura aumenta con la elevación.

7. Conclusiones

Según los resultados obtenidos y los análisis realizados, se presentan las siguientes conclusiones sobre la temperatura y la cobertura para Barranquilla y Sincelejo:

- Para Barranquilla el fenómeno de isla de calor superficial es muy notable, con alrededor de 5 °C de diferencia entre la zona urbana y la zona de periferia. Para Sincelejo, este fenómeno es más débil con ~1 °C de diferencia entre lo urbano y la periferia.
- Para los dos años estudiados se aprecia un cambio en la temperatura, siendo 2018 el periodo más cálido para ambas ciudades. Además, en promedio Sincelejo es más caliente que Barranquilla tanto en la zona urbana como en la periferia en ambos periodos.
- Se estableció que la temperatura es menor en coberturas acuosas o frondosas, mientras que en coberturas poco vegetadas como los pastos o las áreas agrícolas y las zonas urbanas/artificiales se presentan los valores más altos de temperatura.
- Se determinó que la proximidad a la costa y por tanto a cuerpos de agua puede influenciar disminuyendo la temperatura de las coberturas adyacentes. Sincelejo es una ciudad lejos de la costa (26.5 km) mientras que Barranquilla está en la desembocadura del río Magdalena, por tal razón Sincelejo es más cálida.
- Para el caso de Sincelejo la elevación no es un factor que influye sobre la temperatura, pero en Barranquilla la discusión queda abierta, puesto que no todos los valores de temperatura se relacionan linealmente con la elevación.

8. Recomendaciones

El presente estudio realizó un análisis para establecer la relación entre la cobertura y la temperatura, pero quedaron por fuera otros factores que pueden influir en los resultados, como la densidad urbanística, el desarrollo industrial o la densidad de la vegetación, por ello se recomienda tener presente estos y otros factores para futuros análisis sobre islas de calor. Además, se debe tener en cuenta que es un análisis basado en imágenes satelitales donde la disponibilidad juega un papel fundamental, para nuestro caso disponemos de 191 imágenes de la colección de Landsat. Si se pretende aumentar ese valor tendríamos que ampliar el filtro de nubosidad, pero se comprometería los resultados de la temperatura. Por último, se justificó que el análisis fue realizado para la temporada seca, sería oportuno llevar a cabo un análisis que involucre la temporada húmeda y aun mejor un análisis intermensual para estas dos ciudades, ya sea con imágenes satélites, con datos de termografía o de estaciones meteorológicas.

9. Bibliografía

Alcaldía. (2023). Información del municipio. Alcaldía de Sincelejo. <https://www.alcaldiadesincelejo.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>

Amado, C. (2022). Análisis de las temperaturas superficiales y su relación con factores socioeconómicos en Cartagena de Indias, Colombia. <http://hdl.handle.net/10584/11466>

AMB. (2017). Barranquilla - Área Metropolitana De Barranquilla. Área Metropolitana De Barranquilla. <https://www.ambq.gov.co/barranquilla/>

Arellano, B., & Roca, J. (2018). Áreas verdes e isla de calor urbana. Libro de proceedings, CTV 2018: XII Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual: “Ciudades y Territorios Inteligentes”: UNCuyo, Mendoza, 5-7 septiembre 2018 (pp. 417–432). doi:10.5821/ctv.8255

Cano, E. (2020). Boxplots y atípicos. Rpubs by RStudio. <https://rpubs.com/emilopezcano/atipicosbp>

Da Cunha, J. (2009). Crecimiento urbano y movilidad en América Latina. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5349606>

DANE. (2023). Demografía y Población. DANE. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion>

Dai, Y., & Liu, T. (2022). Spatiotemporal mechanism of urban heat island effects on human health—Evidence from Tianjin City of China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.1010400>

EPA. (2022). Learn About Heat Islands. US EPA. <https://www.epa.gov/heatislands/learn-about-heat-islands>

EEA. (2023). Land cover. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/land-cover>

Garzón, J., Molina, I., Velasco, J., & Calabria, A. (2021). A remote sensing approach for surface urban heat island modeling in a tropical Colombian city using regression analysis and machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 13(21), 4256. <https://doi.org/10.3390/rs13214256>

Heaviside, C., Macintyre, H., & Vardoulakis, S. (2017). The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing environment. *Current Environmental Health Reports*, 4(3), 296-305. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>

IDEAM. (2010a). Atlas climatológico de Colombia. Atlas IDEAM. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>

IDEAM. (2010b). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p.

IDEAM. (2012). Mapa de cobertura de la tierra Corine land cover para el periodo 2000-2002. Geoportal. <http://www.ideam.gov.co/capas-geo>

IDEAM. (2021). Mapa de cobertura de la tierra Corine land cover para el periodo 2018. Geoportal. <http://www.ideam.gov.co/capas-geo>

IPCC. (2022). Global warming of 1.5°C. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>

Laaidi, K., Zeghnoun, A., Dousset, B., Bretin, P., Vandentorren, S., Giraudet, E., & Beaudou, P. (2012). The impact of heat islands on mortality in Paris during the August 2003 heat wave. *Environmental Health Perspectives*, 120(2), 254-259. <https://doi.org/10.1289/ehp.1103532>

Lai, J., Zhan, W., Huang, F., Voogt, J. A., Bechtel, B., Allen, M., Peng, S., Hong, F., Liu, Y., & Du, P. (2018). Identification of typical diurnal patterns for Clear-Sky climatology of surface urban heat islands. *Remote Sensing of Environment*, 217, 203-220. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.021>

Li, K., Chen, Y., Wang, M., & Gong, A. (2019). Spatial-temporal variations of surface urban heat island intensity induced by different definitions of rural extents in China. *Science of The Total Environment*, 669, 229-247. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.100>

Moffett, K. B., Makido, Y., & Shandas, V. (2019). Urban-Rural surface temperature deviation and Intra-Urban variations contained by an urban growth boundary. *Remote Sensing*, 11(22), 2683. <https://doi.org/10.3390/rs11222683>

Müller, I., & Weiss, W. (2019). On the temperature gradient in the standard troposphere. *En Advanced structured materials*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13307-8_24

NASA. (2023). Land surface temperature. Earth Observatory. https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MOD_LSTD_M

NASA JPL. (2020). NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2020-12-30 from [doi:10.5067/MEaSURES/NASADEM/NASADEM_HGT.001](https://doi.org/10.5067/MEaSURES/NASADEM/NASADEM_HGT.001)

Ochoa, J. (1999). La vegetación como instrumento para el control microclimático. <https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-93436>

Palme, M., & Carrasco, C. (2022). Urban heat island in Latin American cities. En Elsevier eBooks (pp. 251-267). <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85539-6.00014-7>

Ramírez-Aguilar, E., & De Souza, L. (2019). Urban form and population density: Influences on urban heat island intensities in Bogotá, Colombia. *urban climate*, 29, 100497. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100497>

Roncancio, D. (2013). Study Of Heat Island Phenomenon In Andean Colombian Tropical City, Case Of Studio: Manizales-Caldas Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/21371>

Soto-Estrada, E. (2019). ESTIMACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA EN MEDELLÍN, COLOMBIA. *Revista Internacional De Contaminacion Ambiental*, 35(2), 421-434. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.02.13>

Shen, C., Hou, H., Zheng, Y., Murayama, Y., Wang, R., & Hu, T. (2022). Prediction of the future urban heat island intensity and distribution based on landscape composition and configuration: a case study in Hangzhou. *Sustainable Cities and Society*, 83, 103992. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103992>

Taha, H. (2004). Heat islands and energy. En Elsevier eBooks (pp. 133-143). <https://doi.org/10.1016/b0-12-176480-x/00394-6>

Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Zhang, L., Song, G., Zhen, X., Dong, Y., Kalkstein, A. J., Feng, L., & Chen, H. T. (2009). The Urban Heat Island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International Journal of Biometeorology*, 54(1), 75-84. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0256-x>

Thanvisitthapon, N., Nakburee, A., Khamchiangta, D., & Saguansap, V. (2023). Climate change-induced urban heat island trend projection and land surface temperature: A case study

of Thailand's Bangkok Metropolitan. urban climate, 49, 101484.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101484>

USGS. (2023a). Landsat 8. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>

USGS. (2023b). Landsat Collection 2 Level-2 Science Products. Landsat Missions.
<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>

Villamil-Almeida, H. J., Blanco-Mantilla, K. A., Salah-García, O. Y., & Sánchez, C. E. G. (2019). Characterization of the urban heat island at Bucaramanga, Colombia, using real-time temperature monitoring. *Revista Facultad de Ingenieria Universidad de Antioquia*.
<https://doi.org/10.17533/udea.redin.20191260>

Yang, X., Peng, L. L., Jiang, Z., Yuan, C., Yao, L., He, Y., & Xu, T. (2020). Impact of urban heat island on energy demand in buildings: Local climate zones in Nanjing. *Applied Energy*, 260, 114279. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114279>

Young, H. & Freedman, R. (2013). *Sears - Zemansky física universitaria volume 1 (13a ed.)*. Pearson Educación de México.

Zhang, C., La Sorte, F., Chen, Y., & Wu, J. (2023). The urban heat island effect decreases bird diversity in Chinese cities. *Science of The Total Environment*, 902, 166200.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166200>