

Junio 2022

WP4-2022-005

N° de serie

DOCUMENTO DE TRABAJO

Índice de Vulnerabilidad a las Altas Temperaturas para la Población de Santiago de Cali

Autores

Diana Marcela Bahos Harvy Vivas Pacheco María Castillo-Valencia

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD A LAS ALTAS TEMPERATURAS PARA LA POBLACIÓN DE SANTIAGO DE CALI

Diana Marcela Bahos Mendoza¹

Harvy Vivas Pacheco²

María Castillo-Valencia³

RESUMEN

Las islas de calor urbanas son fenómenos de anomalía térmica presentados principalmente en el centro de la ciudad, que alteran la composición de los ecosistemas y afectan la salud humana. Este estudio identifica la localización de los grupos poblacionales vulnerables a las altas temperaturas en las 22 comunas, conformadas por 12778 manzanas de la zona urbana de Cali y presta especial atención a las 1014 manzanas en las que se agrupan los asentamientos informales y que deberían ser priorizados en las políticas de mejora de confort térmico. La investigación empírica se apoya en la estimación de los índices de vulnerabilidad y vulnerabilidad severa a las altas temperaturas con base en indicadores sociodemográficos y socioeconómicos. Los resultados muestran que las manzanas ubicadas en el oriente de la ciudad (exceptuando a la comuna 21), así como la comuna 14, presentan altas temperaturas superficiales y concentración de población vulnerable, lo que no ocurre en la ladera occidental, donde se concentra población de alta vulnerabilidad socioeconómica y demográfica, pero con temperaturas superficiales que no alcanzan valores elevados.

CLASIFICACIÓN JEL: Q54; I14; D63.

¹ Investigadora Universidad del Valle. Email: diana.bahos@correounivalle.edu.co

² Profesor titular Universidad del Valle. Email: harvy.vivas@correounivalle.edu.co

³ Profesora titular Universidad del Valle. Email: maría.d.castillo@correounivalle.edu.co

PALABRAS CLAVES: islas de calor urbanas, población vulnerable, confort térmico, índice de vulnerabilidad a las altas temperaturas, temperatura superficial.

ABSTRACT

Urban heat islands are thermal anomaly phenomena that occur mainly in the city center, which alter the composition of ecosystems and affect human health. This study identifies the location of the population groups vulnerable to high temperatures in the 22 communes, made up of 12778 city blocks in the urban area of Cali. It gives special attention to the 1014 city blocks in which the informal settlements are grouped and should be prioritized in the policies of thermal comfort improvement. The empirical research is supported by the estimation of vulnerability and severe vulnerability indices to high temperatures based on sociodemographic and socioeconomic indicators. The results show that the blocks located in the eastern part of the city (with the exception of commune 21), as well as commune 14, present high surface temperatures and a concentration of vulnerable population, which does not occur in the area located on the western slope, where there is a concentration of population with high socioeconomic and demographic vulnerability, but with surface temperatures that do not reach high values.

JEL CODES: Q54; I14; D63.

KEY WORDS: urban heat islands, vulnerable population, thermal comfort, index of vulnerability to high temperatures, land surface temperature.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa uno de los desafíos gubernamentales más importantes del siglo XXI. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático declaró

que la alteración del clima y la temperatura de la tierra, asociado de manera directa o indirecta a las acciones humanas, afectan la composición de la atmósfera y desencadenan efectos no deseables en los ecosistemas naturales, los sistemas socioeconómicos y la salud o el bienestar humano (ONU ,1992). Entre los eventos que pueden exacerbar sus impactos se destacan las islas de calor urbanas, entendidas como un fenómeno de origen térmico que suele presentarse en el centro de la ciudad como consecuencia de múltiples factores como el efecto invernadero, la escasez de vegetación y/o humedad del suelo, los materiales de construcción, la morfología urbana, entre otros, que generan altas temperaturas, alterando el flujo de calor sensible, la humedad del aire y los patrones de viento.

La presencia de las islas de calor urbanas afecta la salud de la población en los centros urbanos, ocasionando estrés térmico, malestar general, deshidratación, insolación, dificultad para respirar, cansancio y en algunos casos extremos, un golpe de calor puede producir la muerte con mayor probabilidad en ciertos grupos poblacionales. De hecho, las altas temperaturas no presentan el mismo impacto en toda la población. Estudios previos (Rosenthal, Kinney & Metzger, 2014; Díaz, Linares y García, 2005; Whitman et al.1997), han demostrado que características como la edad, el diagnóstico de comorbilidades, el origen, el ingreso per cápita y el estado civil, generan diferentes reacciones en el cuerpo humano, producto del calor.

Esta investigación centra su atención en Santiago de Cali, tercera ciudad en Colombia, que presenta disparidades socioeconómicas, geográficas y demográficas que suponen diferentes escenarios frente a los impactos a las altas temperaturas . Al occidente se encuentran los Farallones de Cali pertenecientes a la Cordillera Occidental de los Andes y al oriente el Jarillón del río Cauca, entre esos dos puntos cardinales se concentran poblaciones con

precarias condiciones socioeconómicas en sus zonas laderas, o en la periferia, reflejando así una marcada segregación residencial.

Esta investigación pretende identificar la localización de los grupos poblacionales vulnerables a las altas temperaturas en las 22 comunas de Cali, compuestas por 12778 manzanas de la zona urbana y 1014 manzanas de los Asentamiento Humanos de Desarrollo Incompleto (AHDI). Éstos últimos deberían ser priorizados en políticas que mejoren las condiciones de temperatura, humedad y movimiento de aire óptimas para el desarrollo de actividades humanas al interior de las viviendas, entendido como confort térmico.

Para desarrollar este objetivo, primero se analiza la composición biofísica del suelo mediante el cálculo de la temperatura superficial, el índice de vegetación de diferencia normalizada, el índice de área construida de diferencia normalizada y el índice de agua normalizada, obtenidos a través de métodos de teledetección desarrollados con imágenes ráster del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) para el 22 de enero de 2019.

Luego se estiman los umbrales de los índices de vulnerabilidad y vulnerabilidad severa, tomando los criterios propuestos por Sánchez, Nuñez y Neila (2017), teniendo en cuenta el cuartil tres y el decil nueve respectivamente, para los indicadores relacionados con las poblaciones de ancianos, niños, bajo nivel educativo, hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas y hogares unipersonales (expresados en proporciones calculadas con datos extraídos del Censo Nacional de Población y Vivienda de 2018).

De acuerdo con los criterios establecidos, se define la unidad espacial como vulnerable a las altas temperaturas si en al menos tres indicadores se superan los umbrales de vulnerabilidad. La vulnerabilidad severa, por su parte, corresponde a aquellas unidades que han sido

definidas previamente como vulnerables y que, además, superan en al menos dos indicadores los umbrales de vulnerabilidad severa. Las unidades de estudio con un alto riesgo al calor son identificadas mediante la superposición de los índices de vulnerabilidad a la temperatura superficial.

Los resultados muestran que las manzanas ubicadas en el oriente de la ciudad, principalmente en la comuna 14 y exceptuando la comuna 21, presentan altas temperaturas superficiales y concentración de población vulnerable, lo que no ocurre en la zona localizada en la ladera occidental, donde se concentra población con alta vulnerabilidad socioeconómica y demográfica, pero con temperaturas superficiales que no alcanzan valores elevados.

Este artículo se divide en cinco secciones: la primera corresponde a la introducción; la segunda a la revisión de literatura; la tercera a la metodología, donde se especifican los cálculos utilizados en la obtención de los índices de composición biofísica del suelo, así como la explicación de la pertinencia de cada indicador y el cálculo de los umbrales de vulnerabilidad; la cuarta expone los resultados para cada unidad espacial analizada, la quinta discute los resultados y la sexta sintetiza las conclusiones.

REVISIÓN DE LITERATURA

Las islas de calor se definen como episodios de anomalía térmica positiva que ocurren a menudo en el centro de la ciudad (Oke, 1973). Se cuantifican a través del cálculo de la diferencia de temperatura entre la zona más cálida de la ciudad y la zona no urbana o rural (Martín y Moreno, 2020). Para aproximarse a su medición se acude a estimaciones mediante métodos geoestadísticos como el *Kriging* que interpola y extrapola las temperaturas

obtenidas mediante el procesamiento de imágenes digitales extraídas de los satélites MODIS o LANDSAT.

Los factores que contribuyen al desarrollo de las islas de calor urbanas son el clima, el efecto invernadero, la ubicación geográfica de la ciudad, la cobertura y los usos del suelo (escasa vegetación), la topografía (eficacia de sistema de drenaje), la morfología (cañones urbanos que atrapan mayor radiación) y la demografía de la ciudad. También se destacan la temperatura, la estructura y la impermeabilidad del material de las superficies que favorecen el almacenamiento de calor dada la escasez de humedad y las condiciones meteorológicas como la radiación solar, la nubosidad, la velocidad del viento y las precipitaciones (Moreno, 2010; Martín, 2017; Steward y Oke, 2012; Gartland, 2008).

Existen dos tipos de islas de calor. Las primeras son las urbanas atmosféricas que se definen por las diferencias de temperatura del aire entre zonas urbanas y rurales y para las que se emplean mediciones directas como estaciones climatológicas o instrumentos móviles de medición. Las segundas son las urbanas superficiales captadas a través de las diferencias térmicas entre las superficies artificiales y las naturales, usando mediciones indirectas como las imágenes térmicas obtenidas de sensores remotos (Fernández y Martillo, 2012).

A nivel metodológico los estudios han abordado las islas de calor mediante umbrales, factores e indicadores meteorológicos que favorecen su aparición. Se han utilizado métodos como el factor meteorológico que combina los efectos de las nubes y la velocidad del viento sobre la fuerza de enfriamiento nocturno (Oke, 1998), el indicador de diagnóstico de la intensidad máxima de las islas de calor (Theeuwes, 2017) y el indicador de intensidad media con base en las diferencias de las temperaturas diarias mínimas entre el sector más cálido de la ciudad y la zona no urbana o rural (Martin y Moreno, 2020). Estos indicadores no sólo

demuestran una intensidad máxima de las islas de calor cuando la cobertura de las nubes y la velocidad del viento son bajas, sino que la frecuencia más alta se registra en horas de la noche (Yang, Chen, Peng, y Wang, 2020; Sheridan y Dolney, 2003), siendo otoño e invierno las estaciones con mayor intensidad y verano la de menor intensidad (Martín y Moreno, 2020; Sarricolea, Aliste, Castro, y Escobedo, 2008; Zhang et al., 2002; Song y Zhang, 2003).

El albedo, la emisividad y la capacidad térmica son propiedades físicas de los materiales que influyen en el balance de la radiación. Las superficies urbanas absorben la radiación solar y la re-emiten como radiación de onda larga. En este contexto, el albedo es el porcentaje de radiación que refleja una superficie, el cual puede tomar valores de 0 a 1, siendo 0 la mayor absorción de radiación solar (materiales oscuros) y 1 la menor (Cabras, 2014). La radiación solar es absorbida durante el día por techos y paredes dada la propiedad de Reflectancia Solar (RS) del revestimiento expuesto al exterior, y se transmite al interior mediante las ventanas (Lucero, 2016). Es preciso anotar, sin embargo, que si bien estas características contribuyen a la formación de las islas de calor, la vegetación urbana tiene una fuerte influencia en la disminución de la temperatura (Cabras, 2014).

La escasez de vegetación, captada por el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI), y las lejanas distancias a cuerpos de agua, han sido relacionadas espacialmente con las islas de calor urbanas. La baja humedad relativa y la poca reflectividad son dos atributos que dan vía libre a su aparición (Pérez, 2014; Sarricolea, Aliste, Castro, y Escobedo, 2008). Así mismo, las características morfológicas de las calles como los cañones urbanos (su geometría puede ser medida a través del factor de vista), guardan estrecha relación con la creación de microclimas e influyen en el balance energético al absorber una mayor cantidad de radiación solar en las paredes y los techos debido a la reflexión. Esta acción que es denominada

“atrapamiento radioactivo”, es una de las razones por las que las islas de calor se conservan en la noche (Cabras, 2014). En esa misma línea, otros estudios evidenciaron la existencia de una fuerte influencia de la radiación solar incidente y la absorptividad de la superficie en el aumento de la temperatura del pavimento de asfalto (Correa, Flores, y Lesino, 2003; Pérez, 2014).

Otra serie de investigaciones relaciona el tamaño de una ciudad, cuantificado por la población o las densidades poblacionales, y la intensidad de las islas de calor urbanas (Sarricolea, Aliste, Castro, y Escobedo, 2008; Oke, 1973; Velásquez, 2016). Oke (1973) realizó una extensión del modelo Summers que sostiene que la isla de calor es proporcional a la raíz cuarta de la población y encontró que su aumento genera un incremento mayor en la temperatura de una ciudad intermedia que en la de una gran ciudad, lo cual lleva a plantear que la urbanización intensiva de las grandes ciudades ha restringido las opciones de uso del suelo lo suficiente como para que los efectos del crecimiento urbano sean menos significativos climáticamente.

Martín y Moreno (2020) encontraron una disminución en la intensidad de las islas de calor en Barcelona desde los años 80 como consecuencia del estancamiento de la ciudad, mientras que Tan et al (2010) encontraron patrones similares en Shanghai, lo que significa que las regiones urbanas se estaban calentando a un ritmo más rápido que las áreas circundantes. En esa misma línea, Mehrotra, Bardhan y Ramamritham (2018) hallaron en Mumbai (ciudad de India) una relación entre las áreas donde se ubican los asentamientos informales y las islas de calor debido a la reducida altura de las viviendas con una alta densidad poblacional en los asentamientos informales, que combinado con las grandes superficies de techos de asbesto absorben una mayor cantidad de calor o radiación solar.

En paralelo, otros estudios que consideran el tamaño de la unidad de estudio evidencian que la intensidad de las islas de calor se incrementa con el aumento del área (Tan y Li, 2015). Ambas perspectivas (tamaño de la ciudad medida en kilómetros o población) guardan una estrecha relación con la generación de calor antropogénico ocasionado por la actividad humana y proveniente principalmente de procesos industriales, edificios, automóviles e incluso centros comerciales por su alta demanda de energía y además, con la escasez de vegetación producto de la expansión urbana (Cabras, 2014; Shahmohamadi, Che-Ani, Maulud, Tawil, y Abdullah, 2011; Sarricolea, Aliste, Castro, y Escobedo, 2008).

Harlan et al. (2007) encuentran mediante un modelo de regresión lineal bivariado, un Índice de Confort Térmico Humano (HTCI) y el coeficiente de correlación de Pearson que los patrones de uso de suelo en 634 distritos de la zona urbana de Phoenix, Arizona, para el año 2000, produjeron una distribución de temperatura heterogénea que estaba correlacionada con las características sociales de los barrios. Los blancos con mayores ingresos tenían mayor probabilidad de vivir en zonas con vegetación y menores temperatura que los latinos con bajos ingresos. En general, la población con más altos ingresos se ubicaba en la periferia urbana, mientras que la de bajos ingresos en el centro de la ciudad, lo cual obedece a los patrones de segregación residencial y socioespacial observados en muchas ciudades norteamericanas. Estos últimos tenían mayor exposición a riesgos de salud por la temperatura y además, menos recursos para mitigar el calor extremo, de hecho, por cada aumento de \$10.000 en el ingreso medio para un día de verano, la temperatura media disminuía $0,51^{\circ}\text{F}$, equivalente a $0,281^{\circ}\text{C}$.

Otros estudios han relacionado las islas de calor con su impacto en la salud. Rosenthal, Kinney & Metzger (2014) evalúan el riesgo de mortalidad por calor para Nueva York en el

período 1997-2006 mediante la razón de tasa de mortalidad por causas naturales para las personas de 65 años o más y modelos de rezago y error espacial, haciendo una comparación entre los días con calor extremo (100° F o más) y los días cálidos. Los autores encuentran una relación positiva entre los niveles de hipertensión del grupo poblacional en cuestión y variables como la pobreza, las malas condiciones de vivienda, bajas tasas de acceso a aire acondicionado, cobertura de suelo impermeable, temperaturas de la superficie agregadas al nivel del área.

Sabrin, Karimi y Nazari (2020) identifican las comunidades y zonas que requerían estrategias de respuesta y mitigación de riesgos específicas a eventos de calentamiento extremo y contaminación del aire en las zonas urbanas de Camden, en el estado de Nueva Jersey, mediante un modelo de regresión multivariado. Examinan los patrones de temperatura en función de la contaminación del aire, la proporción de vegetación, la altura de los edificios y la cobertura del suelo. Se consideró la vulnerabilidad y la mala calidad del aire con base en tres criterios: la alta densidad de población, la población menor de 5 y mayor de 65 años y la precariedad en los ingresos familiares. Los resultados muestran que en los vecindarios Lanning Square, Bergen Square, Central Waterfront, Gateway, Liberty Park y Parkside no sólo reside la población más vulnerable a las altas temperaturas, sino que también son zonas significativamente expuestas al calor y a la contaminación del aire.

Las olas de calor presentadas en el año 2003 en Europa motivaron diversos estudios sobre sus consecuencias en la salud humana. Díaz, Linares y García (2005) estudiaron los factores socioeconómicos que contribuyeron al exceso de morbimortalidad ocasionado por las temperaturas extremas en el centro de Europa y el norte y este de España. Los umbrales de calor consideraron los valores de temperatura en los que se presentaron excesos de

mortalidad, estos oscilaron entre los 26,2° C en La Coruña, hasta los 41,3° C en Córdoba (temperatura máxima diaria). Los resultados revelaron que las altas temperaturas afectan principalmente a la población de más de 65 años. Sin embargo, su participación fue menor en las grandes ciudades que en las zonas rurales y las ciudades intermedias o pequeñas, aspecto que redujo los efectos severos de la ola de calor para este grupo etario. A pesar de ello, la población catalogada como sana, presentó defunciones por practicar actividades físicas en horas con altas temperaturas. De igual forma, Culqui et al. (2013) encontró que la mortalidad ocasionada por la ola de calor de 2003 en Madrid, aumentó en un 22,39% por cada °C que excedió la temperatura umbral con una intensidad de 8,2°C.

Algunos autores han examinado los efectos de las altas temperaturas mediante la construcción de índices de vulnerabilidad. Johnson et al. (2012) desarrollaron uno para el calor extremo de Chicago en 1995 considerando características de la población como la edad (65 años o más y 5 años o menos), el origen, el ingreso per cápita, el nivel educativo, y características ambientales como el NDBI, el NDVI y la temperatura superficial. Los resultados muestran que las variables socioeconómicas explican en un 70% la varianza en la vulnerabilidad de Chicago, mientras que la temperatura superficial, el NDVI y el NDBI el 12%. El índice de vulnerabilidad explicó casi el 80% de la varianza para las variables que tenían una gran influencia en la mortalidad por calor y la salud.

Wolf y McGregor (2013) desarrollan un índice de Vulnerabilidad al Calor para Gran Londres, Reino Unido en 2003, calculado mediante un análisis de componentes principales que consideraba las muertes y hospitalizaciones asociadas a eventos de ola de calor y factores de riesgo como alta densidad poblacional, características de la vivienda, estado de salud, dependencia económica, edad, entre otros. Los resultados evidenciaron una concentración

espacial significativa de población vulnerable a las altas temperaturas en el centro y el este de la ciudad de Londres, zonas que también presentan exposición potencial al calor.

En esa misma línea, Jhonson y Wilson (2009) investigan la concentración de mortalidad asociada al calor y su relación con las islas de calor urbanas y la distribución espacial de las poblaciones vulnerables (65 años o más y 5 años o menos) para el evento de calor extremo registrado entre el 3 y 14 de julio de 1993 (las temperaturas diarias máximas oscilaron entre 35 y 38,3°C) en Filadelfia, Pensilvania. Encuentran que la distribución espacial de los pobres urbanos está directamente relacionada con las muertes por calor. Además, la población mayor o igual de 65 años, la población blanca y las zonas con temperatura superficial cercana a los 306° K presentaron similitudes espaciales, mientras que la población negra no presentó una distribución clara, localizándose en la dirección norte-sur, y entre mayor era la intensidad de la temperatura superficial, desde el oeste hasta el sur.

Whitman et al. (1997) estudian las muertes relacionadas con el calor mediante un análisis de regresión y encuentran que más del 70% de las muertes en la ola de calor de Illinois, Chicago en 1995 tenían 65 años o más. Schwartz (2005) realiza un estudio de caso en 1990 para las personas en el mismo rango de edad en Wayne, Michigan y encuentra que los pacientes con diabetes tienen mayor riesgo de morir en días calurosos que otros pacientes. De igual forma, la población no blanca tenía mayor riesgo de morir tanto en los días calurosos como en los fríos (se asocia a privaciones físicas y características sociales que limitan su adaptabilidad a temperaturas), por lo que las condiciones sociodemográficas y médicas podían aumentar su probabilidad de muerte asociada a las temperaturas.

Resultados similares se encuentran para los grupos sociodemográficos desfavorecidos en Hong Kong, el que tuvieron en cuenta características como grupos de edad de más de 60 años, nivel de educación secundaria, estado civil (viudos, divorciados y separados), ingresos medios y bajos, siendo éstas dos últimas variables más significativas para explicar los efectos desiguales de las islas de calor (Wong et al. 2016). También para la ciudad de Birmingham, Reino Unido en 2009, Tomlinson et al. (2011) encontraron que el centro de la ciudad presenta una isla de calor urbana con concentración de población con riesgo muy alto a las altas temperaturas (alta densidad poblacional, viviendas en situación de riesgo, ancianos o población con comorbilidades). Sidiqi, Tariq y Ng (2022) realizan un estudio similar para la ciudad de Greater Geelong, Australia, para 2020. Los resultados demuestran que los factores socioeconómicos, demográficos y de construcción influyen de manera significativa en la aparición de las islas de calor urbanas, aunque en conjunto, sólo explican el 28% de las variaciones en los patrones de ese fenómeno térmico. En contraste, se encuentra una relación directa para la antigüedad del edificio y la densidad poblacional, mientras que, para la altura de los edificios, las características socioeconómicas, la educación y la ocupación, y los recursos económicos, una relación inversa, de hecho, estas variables explican la variación de las islas de calor urbanas en 4,5%, 7% y 3% respectivamente.

Bajo el contexto de segregación racial, Hsu et al. (2021) plantean como hipótesis que la exposición al calor y otros factores de estrés ambiental se distribuyen de manera desigual entre los grupos poblacionales y lo demuestran mediante el cálculo del índice de desigualdad de Kolm-Pollak y combinaciones entre valores de islas de calor y datos demográficos. Los resultados muestran que un individuo afrodescendiente promedio, habita en tramos censales que poseen mayor intensidad de islas de calor que los blancos no hispanos, esto sucede en 6

de las 75 áreas urbanizadas de Estados Unidos. A este fenómeno lo llaman el *racismo climático* o *racismo ambiental*, donde señalaron que los afro-estadounidenses tenían una exposición de temperatura de 3.12°C adicional en vecindarios urbanos, mientras que la de los blancos era de 1.47°C adicionales, efecto que podía desencadenar insolación, golpes de calor, pérdida de productividad y problemas de aprendizaje (como se cita en McGrath, 1 de junio de 2021).

Si bien en Cali, de acuerdo con el Censo Nacional de Vivienda de 2018 (CNPV), el 14,54% de la población se reconoce como afrodescendiente y se concentra el 8% en el oriente de la ciudad, esta variable no es relevante como un indicador de vulnerabilidad. No es correcto afirmar que una persona afrodescendiente, sólo por su raza, es vulnerable a las altas temperaturas; de hecho, la concentración de melanina en su piel representa una ventaja en la medida en que actúa como una protección a los rayos ultravioleta y a la radiación solar directa. Reiterando, sin embargo, que ese pigmento natural no implica inmunidad frente a las múltiples consecuencias de las altas temperaturas en los seres humanos, tal y como se ha discutido en otros estudios (El Mundo, 2012; Urán y Cano, 2011)

METODOLOGÍA

Esta investigación identifica las manzanas (como unidades del marco muestral del CNPV, 2018) de Santiago de Cali que presentan vulnerabilidad a las altas temperaturas teniendo en cuenta las características sociodemográficas y socioeconómicas de la población. Primero se calculan indicadores obtenidos mediante teledetección y se realiza un análisis descriptivo para conocer la temperatura y las propiedades del suelo que pueden afectar la concentración de calor en distintas zonas de la ciudad.

Luego se calcula el índice de vulnerabilidad sugerido por Sánchez, Nuñez y Neila (2017) con cinco indicadores y se definen los umbrales de vulnerabilidad y vulnerabilidad severa considerando el cuartil 3 y el decil 9 respectivamente. Se define una unidad espacial como vulnerable a las altas temperaturas si supera al menos tres indicadores de vulnerabilidad el valor de los umbrales. El grado de vulnerabilidad aumenta cuando la unidad espacial definida anteriormente como vulnerable, supera al menos dos indicadores los umbrales de vulnerabilidad severa.

Indicadores obtenidos mediante teledetección

La temperatura superficial (TS), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de área construida de diferencia normalizada (NDBI) y el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) se calcularon procesando las imágenes del satélite LANDSAT 8 OLI/TIRS obtenidas de la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) para el 22 de enero de 2019 a las 3:18 pm. Es preciso anotar que la interacción entre el sensor y la atmósfera puede distorsionar las imágenes producto de los componentes intrusivos y los efectos de aerosoles (Arias, Zamora y Bolaños, 2014).

Esta calidad visual puede ser mejorada mediante el uso de la corrección atmosférica Dark Object Subtraction (DOS) al suponer píxeles con efecto bruma y escasos elementos de la superficie terrestre de color negro absoluto, de manera que para calibrar la imagen y hallar el valor de reflectancia aparente se considere la dispersión atmosférica (Chavez, 1988; 1989). Para realizar esta corrección atmosférica DOS se hace uso del Semi Automatic Classification Plugin (SCP) del software QGIS 3.12 mediante la opción preprocesamiento LANDSAT 8, la importación de los archivos del USGS y la selección de las opciones “Temperatura de brillo en Celsius” y “Aplicar la corrección atmosférica DOS1” obteniendo nuevas bandas de ráster

con reflectancia mejorada, a través de la conversión de los Números Digitales (ND) de cada banda a radiancia y posteriormente a valores de reflectividad en el techo de la atmósfera, TOA, cabe destacar que para las bandas 10 y 11 se hace la conversión de los ND a temperatura de brillo (BT), arrojando valores en Celsius.

Las imágenes satelitales resultantes de la corrección anterior se procesaron en el software ArcGis 10.8 para obtener el NDVI, la TS, el NDBI y el NDWI mediante los pasos que se detallan en el recuadro 1.

Recuadro 1. Indicadores de teledetección

1. Se calcula el NDVI

$$NDVI = \frac{Banda\ 5 - Banda\ 4}{Banda\ 5 + Banda\ 4} \quad (3)$$

Donde:

Banda 5: banda de infrarrojo cercano

Banda 4: banda del rojo visible

2. Se calcula la proporción de vegetación (P_V)

$$P_V = \left(\frac{NDVI - NDVI_{mín}}{NDVI_{máx} - NDVI_{mín}} \right)^2 \quad (4)$$

3. Se calcula a emisividad (ε)

$$\varepsilon = 0.004 * P_V + 0.986 \quad (5)$$

Donde:

0.004 y 0.986 son valores de constantes de corrección para LANDSAT-8.

4. Se calcula la temperatura superficial de la tierra (*LST*) teniendo la BT obtenida de la corrección DOS de la banda 10

$$TS = \left(\frac{BT}{1 + \left(0.00115 * \frac{BT}{1.4388} \right)} \right) * Ln(\varepsilon) \quad (6)$$

Donde:

0.00115: longitud de onda de la radiancia emitida

$1.4388 = h * \frac{c}{s}$; siendo h la constante de Planck, c la velocidad de la luz y s la constante de Boltzmann.

5. Se estima el NDBI

$$NDBI = \frac{Banda\ 6 - Banda\ 5}{Banda\ 6 + Banda\ 5}$$

Donde:

Banda 5: banda de infrarrojo cercano

Banda 6: banda de infrarrojo medio

6. Se estima el NDWI

$$NDWI = \frac{Banda\ 5 - Banda\ 6}{Banda\ 5 + Banda\ 6}$$

INDICADORES DE VULNERABILIDAD

En el contexto de calentamiento global, los indicadores sociodemográficos y socioeconómicos brindan una idea clave sobre los grupos poblacionales que tienden a ser más vulnerables al cambio climático, entendiendo esta situación como un problema de salud pública. Para este estudio se han considerado cinco indicadores obtenidos de la base de datos del Censo Nacional de Población y Vivienda de 2018 para las manzanas de los AHDI y la zona urbana y las comunas como división administrativa de Santiago de Cali. Los indicadores seleccionados se definen como fracciones en el recuadro 2.

Recuadro 2. Indicadores de vulnerabilidad socioeconómica y demográfica

- **Ancianos (%):** proporción de población con 65 años de edad o más. Los adultos mayores presentan altas tasas de prevalencia de enfermedades crónicas como la insuficiencia cardíaca congestiva, la diabetes y otras morbilidades sensibles al calor.

- **Niños (%):** proporción de población con 4 años de edad o menos. Los niños pueden verse afectados por deshidratación, insolación, problemas de respiración agudizados si sufren de asma y el desarrollo de infecciones como la enfermedad de Lyme, la diarrea, los parásitos y otras enfermedades ocasionadas por la transmisión de patógenos que han sido favorecidas por el cambio climático.
- **Población con bajo nivel educativo (%):** proporción de población entre los 25 y los 64 años con niveles de codificación 0, 1 y 2 en la Clasificación internacional normalizada de la educación (CINE) 2011 asociados a educación de primera infancia, primaria y secundaria baja respectivamente, se considera este rango de edad dado que pertenece a la población adulta en edad de trabajar que a los 25 años de edad ya debe haber culminado al menos el nivel universitario (DANE, 2012). Este indicador guarda estrecha relación con la teoría del capital humano; los individuos que poseen alta escolaridad tienen mayor probabilidad de obtener empleos con mejor remuneración que los que tienen baja escolaridad, por lo que pueden elevar su calidad de vida y habitar viviendas y zonas con características que permiten hacer frente desde una mejor posición a las altas temperaturas. Desde esta perspectiva, los obstáculos son mayores para aquellos que poseen bajo nivel educativo.
- **Hogares con NBI (%):** proporción de hogares con al menos una necesidad básica insatisfecha. El NBI comprende cinco dimensiones: vivienda inadecuada, servicios públicos básicos inadecuados, hacinamiento crítico, inasistencia escolar y alta

dependencia económica. Los hogares con precariedad socioeconómica presentan mayores dificultades para hacer frente a los efectos desencadenados por las altas temperaturas, desde los materiales de construcción de la vivienda y los escasos sistemas de ventilación que potencian la concentración de calor, hasta la incorrecta recolección de residuos sólidos que favorece la proliferación de vectores.

- **Hogares Unipersonales (%):** proporción de hogares formados por una sola persona. La población que vive sola es vulnerable a trastornos como el agotamiento por calor, la insolación y el golpe de calor, este último es producido por el exceso de calor en el cuerpo (40° C o más) dada la exposición a altas temperaturas, si este evento no es tratado a tiempo, puede ocasionar graves complicaciones en órganos como el cerebro, los riñones y el corazón, y puede, incluso, causar la muerte (Mayo Clinic, 2020).

Estos cinco indicadores de vulnerabilidad fueron evaluados para 1014 manzanas de los AHDI, 12778 manzanas de la zona urbana y a nivel agregado, para las 22 comunas que configuran la cabecera urbana de la ciudad. Los umbrales de vulnerabilidad y vulnerabilidad severa se establecieron por el cuartil 3 y el decil 9 respectivamente (*Tabla 1*), por lo que las unidades de estudio presentaban vulnerabilidad en cada indicador si superaba el umbral calculado para cada uno.

--	--

Indicadores*	Umbral de vulnerabilidad (Q3)		Umbral de vulnerabilidad severa (D9)	
	Comunas	Manzanas	Comunas	Manzanas
Ancianos	0.1406	0.1548	0.1752	0.2143
Niños	0.0592	0.0702	0.0716	0.0909
Población con baja educación	0.1915	0.2209	0.2223	0.2688
Hogares con NBI	0.0522	0.0405	0.0662	0.0909
Hogares unipersonales	0.0769	0.0828	0.1022	0.1333

*Se expresan en proporciones

Fuente: elaboración propia

Tabla 1. Umbrales de vulnerabilidad y vulnerabilidad para los cinco indicadores seleccionados.

RESULTADOS

La tabla 2 muestra el promedio y la desviación estándar de los indicadores de vulnerabilidad al calor y de la composición biofísica del suelo. Como era de esperarse, se evidencia que las manzanas localizadas en los AHDI presentan valores más altos que las manzanas de la zona urbana en las variables hogares con NBI (17,8% frente a 4%) y población con baja educación (25,2% frente a 15,6%), aspectos asociados a su precariedad socioeconómica. Pese a ello, se destaca la baja proporción de ancianos en estas zonas respecto al resto de la ciudad, lo que se asocia a las tipologías de hogar y a los perfiles relativamente jóvenes de los hogares (7,4% frente a 12,1%); mientras que la proporción de niños no toma valores relevantes (6,9% frente a 5,3%), reflejando la prominencia de población joven.

La composición biofísica del suelo suministra información sobre la concentración de calor y las características del suelo que favorecen su absorción. La temperatura superficial presentada por las manzanas de los AHDI fue menor a la evidenciada en la zona urbana (28,44°C frente a 29,67°C), mientras que el NDVI presentó un valor levemente mayor (0,265 frente a 0,211), el NDBI tuvo valores más bajos (0,035 frente a 0,086) y el NDWI un valor mayor (-0,035 frente a -0,086). Los valores de estos índices reflejan las características de la localización de los AHDI en la ciudad, que suele ser en zonas periféricas con vasta vegetación (como las comunas 1, 18 y 20), fuentes hídricas (como el río Meléndez en el sector de la Choclona en la comuna 18 y la ribera del río Cauca en la comuna 21) y en algunos casos, la escasez de construcciones, dada su realidad en el mercado del suelo informal que hace estas zonas poco deseables para el mercado de suelo y vivienda formal, considerando en primer orden, la ubicación en zonas de alto riesgo.

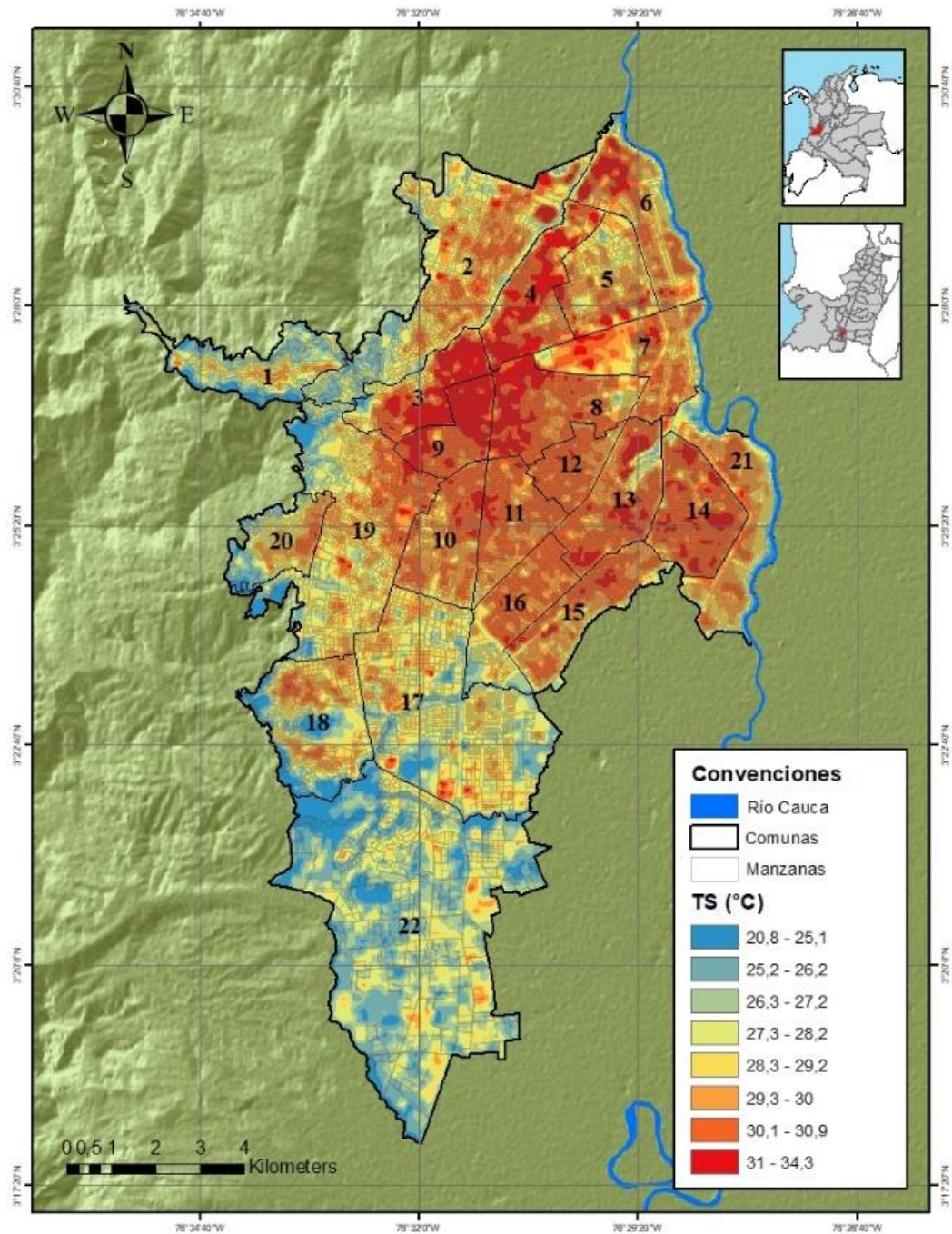
	COMUNAS		MANZANAS		AHDI	
Variable	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
NBI	3,8%	1,9%	4%	9,4%	17,8%	21,7%
Ancianos	12,1%	3,5%	12,1%	7,3%	7,4%	4,5%
Niños	5,2%	1,1%	5,3%	3%	6,9%	3,6%
Población con baja educación	14,8%	6%	15,6%	8,9%	25,2%	7%
Hogares unipersonales	6,8%	2,5%	7,1%	7%	6,2%	5,9%
Temperatura superficial	29,223	1,206	29,671	1,162	28,445	1,366
NDVI	0,301	0,098	0,211	0,093	0,265	0,128
NDBI	0,017	0,062	0,086	0,067	0,035	0,089
NDWI	-0,017	0,062	-0,086	0,067	-0,035	0,033

Fuente: elaboración propia

Tabla 2. Promedio y desviación estándar de los indicadores de vulnerabilidad al calor y de composición biofísica del suelo.

La figura 1 muestra la distribución de la temperatura superficial de la zona urbana de Santiago de Cali, encontrando que los valores más altos (30,1 - 34,3° C) se localizan en el centro de la ciudad (comunas 3⁴, 4, 8 y 9), tal como lo señala la teoría, y en su defecto, la zona oriente, producto de la concentración de población y por ende, de edificaciones. Las zonas occidental y sur presentan temperaturas entre los 20,8 y 29,2° C, resultados que evidencian las características y la composición biofísica del suelo, como lo exhibe la figura 2 mediante la distribución del NDVI, el NDBI y el NDWI en la zona urbana de Santiago de Cali.

⁴ En la comuna 3 se ubica el centro histórico de Cali, donde se destacan las construcciones más antiguas y la concentración del comercio de la ciudad, a la vez que concentra la mayor proporción del trabajo formal e informal de la ciudad.



Fuente: elaboración propia

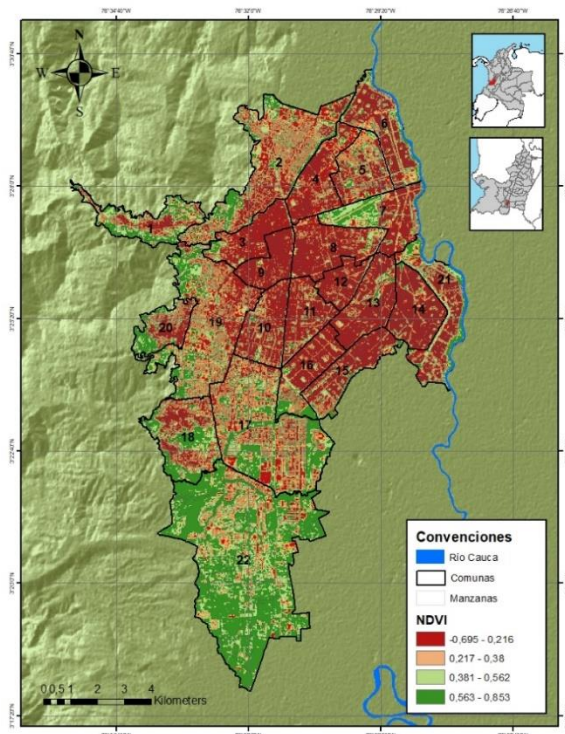
Figura 1. Distribución de la temperatura superficial (TS °C) en la zona urbana en Santiago de Cali.

El NDVI (figura 2a), que estima la calidad y cantidad de vegetación, arrojó los valores más altos en zonas ubicadas en las comunas 2, 17 y 22, y en general, en el occidente de la ciudad, áreas caracterizadas por la localización de amenidades, elementos ambientales y zonas verdes como el parque La Flora en la comuna 2, los parques La Hacienda y El Ingenio en la comuna 17 y áreas verdes privadas en barrios como Urbanización Ciudad Jardín, además de Parcelación Pance, como zona rural en proceso de urbanización en la comuna 22, como algunos ejemplos. Lo mismo ocurrió con el NDWI (figura 2b), que calcula la saturación de humedad del suelo o de la cantidad de agua que posee la vegetación, destacándose el río Cali localizado en el área occidental de la comuna 2, los ríos Meléndez y Lili en la comuna 17 y el río Pance en la comuna 22.

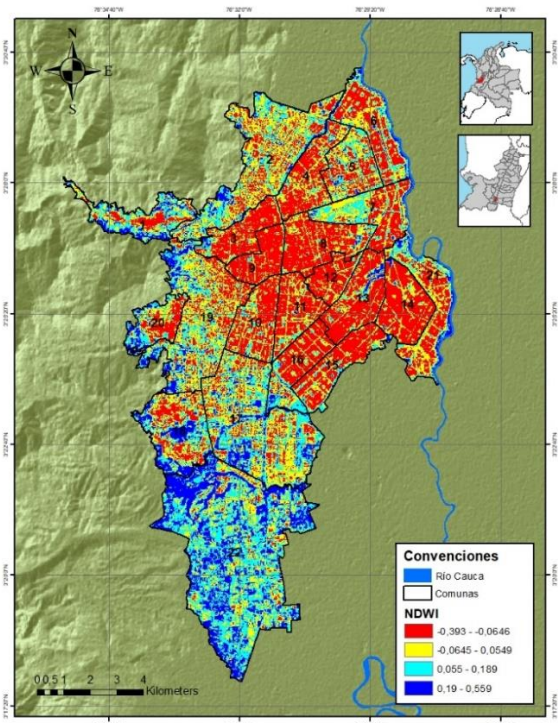
En esa misma línea, el NDBI (figura 2c), que estima las zonas con superficies edificadas, presentó los valores más bajos para estas mismas zonas y más altos para el centro y oriente de la ciudad. Estos resultados son coherentes con la distribución de zonas verdes y de escasa urbanización, frente a las zonas con alta habitabilidad, de hecho, el índice de espacio público efectivo que considera los metros cuadrados correspondientes a las zonas verdes, parques, plazas y plazoletas en una unidad espacial por habitante, amplía la perspectiva del contexto urbano de Cali.

Según el Expediente Municipal (2014), para el año 2012, las comunas 3, 4, 8 y 9 ubicadas en el centro de la ciudad, presentaron un índice de espacio público efectivo de 4,33; 1,53; 0,72 y 0,54 $m^2/hab.$ respectivamente, mientras que para las comunas 13, 14, 15 y 21, localizadas en el oriente, el índice tomó valores de 1,69; 1,69; 1,77 y 3,81 $m^2/hab.$ respectivamente. En contraste, el informe destaca el elevado índice de espacio público efectivo para las comunas 17 y 22, con valores de 8,58 y 30,35 $m^2/hab.$ respectivamente.

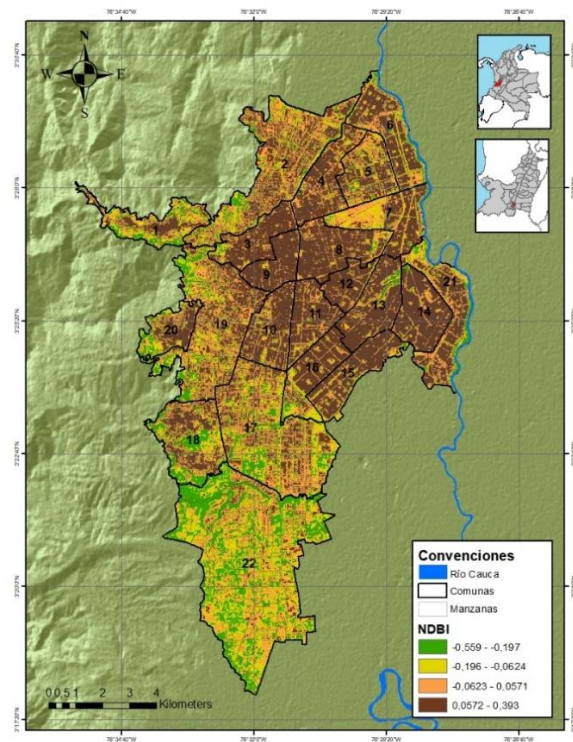
a)



b)



c)



Fuente: elaboración propia

Figura 2. Distribución del NDVI (a), NDWI (b) y NDBI (c) en la zona urbana en Santiago de Cali.

La figura 3 expone mediante un mapa de cuantiles, la temperatura superficial promedio para las comunas de Cali contrastado con aquellas identificadas como vulnerables a las altas temperaturas. Las comunas 1 y 22 presentaron los menores valores de temperatura superficial, ubicándose entre los 26,57 y 26,93° C. Las comunas 2, 17, 18, 19, 20 y 21 arrojaron valores entre los 26,94 y 28,63° C, mientras que las comunas 5, 6, 7, 15 y 16 se ubicaron entre los 28,64 y 29,71° C. En complemento, las comunas 3, 10, 11, 12 y 13 presentaron valores promedio de temperatura superficial entre los 29,72 y 30,25° C y las comunas 4, 8, 9 y 14, entre los 30,26 y 30,97° C.

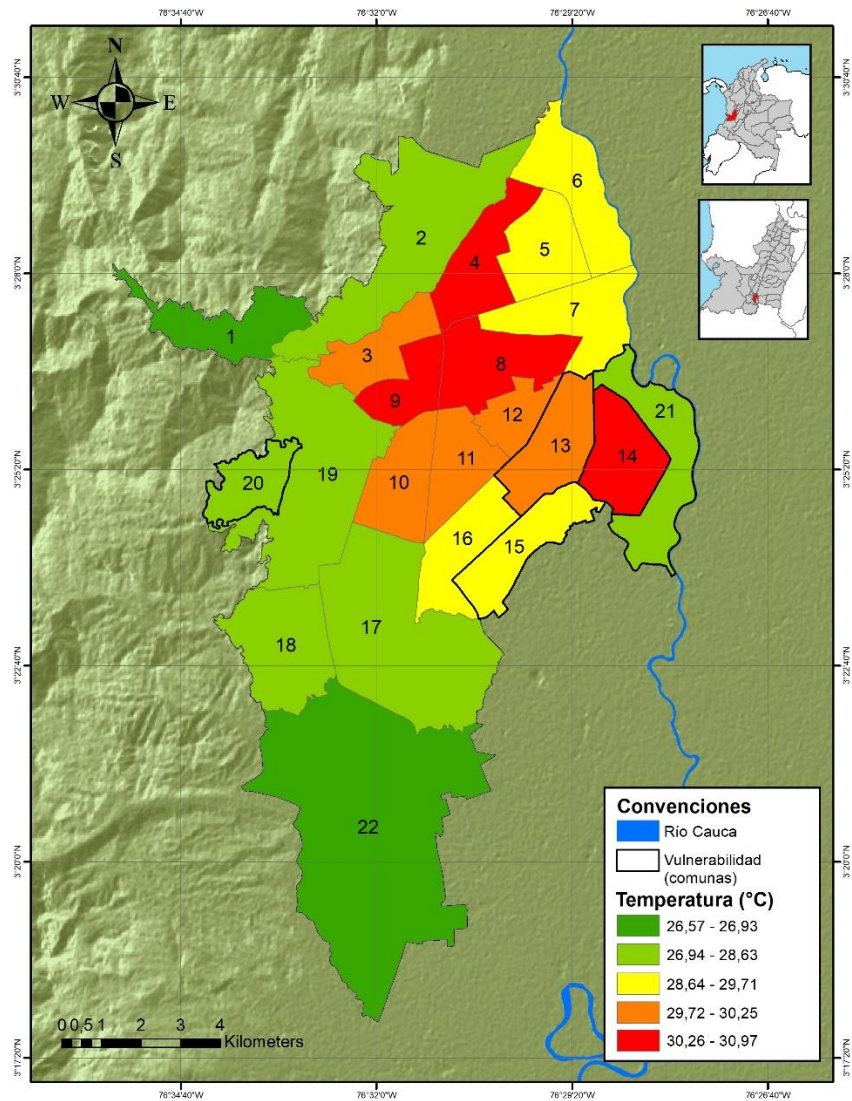
Ahora bien, las comunas 13, 14, 15, 20 y 21, delimitadas en la figura 3, superaron en al menos tres umbrales los indicadores de vulnerabilidad, es decir, el 22,73% de las comunas presentaron mayor concentración de población y hogares vulnerables a las altas temperaturas.

La figura 4 muestra que estas cinco comunas presentaron vulnerabilidad para los indicadores proporción de hogares con NBI, niños y población con baja educación. Como se observa en la figura 3, cuatro de las cinco comunas delimitadas como vulnerables al calor se localizan en el oriente de la ciudad⁵, zona que se caracteriza por su precariedad socioeconómica y que, además, pese a estas vulnerabilidades, exceptuando la comuna 21, exhiben altos valores de

⁵La restante es la comuna 20, constituye barrios como Siloé y Belén el occidente de la ciudad y pese al bajo nivel socioeconómico de su población, no presenta altas temperaturas dada su localización entre los Farallones de Cali, la Avenida de los Cerros, el cerro Cristo Rey y el cerro Bataclán.

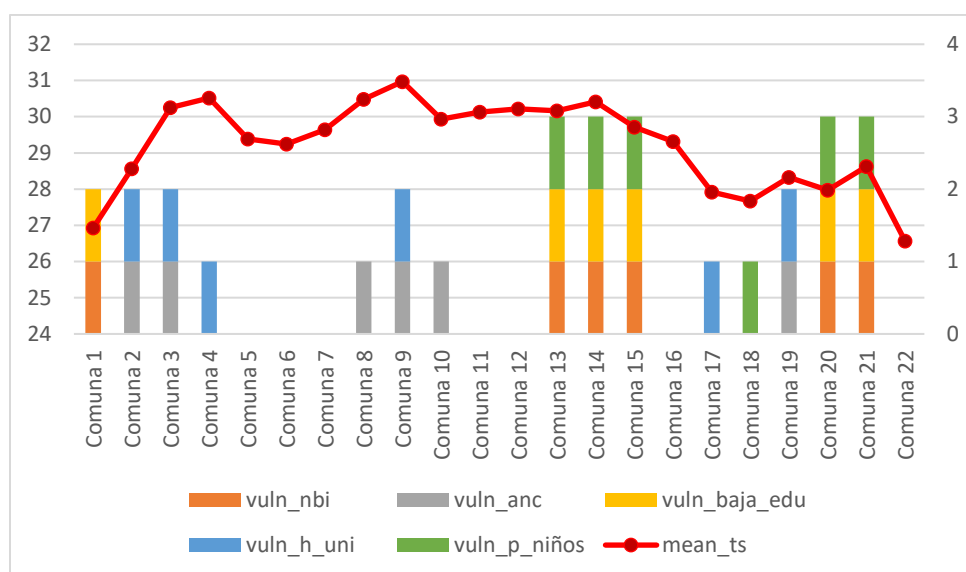
temperatura superficial, asociados a su ubicación geográfica, las edificaciones y la alta densidad poblacional.

De igual forma, la temperatura superficial promedio de las comunas localizadas en el oriente se distribuyó de la siguiente manera: 30,16° C para la comuna 13, 30,41° C para la comuna 14, 29,71° C para la comuna 15 y 28,63° C para la comuna 21, esta última presentando un menor valor dada su ubicación geográfica y las masas de agua que la rodean. La comuna 20 presentó una temperatura superficial promedio de 27,97° C. Dados los resultados anteriores, para este caso se considera que las comunas 13, 14 y 15 son las que presentan riesgo de vulnerabilidad a las altas temperaturas.



Fuente: elaboración propia

Figura 3. Mapa de cuantiles de la temperatura superficial (°C) con delimitación de comunas vulnerables al calor en Santiago de Cali.



Fuente: elaboración propia

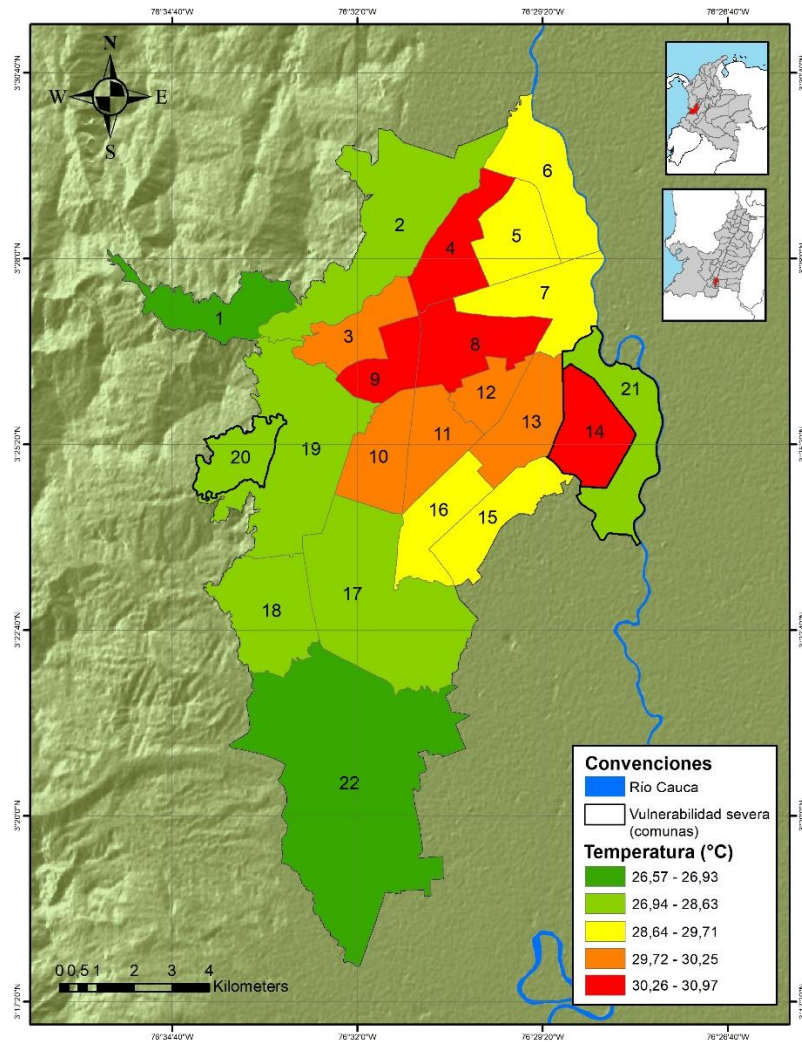
Figura 4. Indicadores de vulnerabilidad que han superado los umbrales definidos en contraste con la temperatura superficial (°C) obtenida por cada comuna de Santiago de Cali.

La figura 5 presenta un mapa de cuantiles para la temperatura superficial delimitado por el 13,64% de las comunas que presentan población con vulnerabilidad y, además, superan en al menos dos indicadores los umbrales de vulnerabilidad severa a las altas temperaturas. La figura 6 especifica los indicadores que han excedido dichos umbrales en cada comuna. Las comunas 14, 20 y 21 presentaron vulnerabilidad severa⁶, la primera excedió los límites en los indicadores de proporción de niños y población con baja educación, mientras que la segunda en la proporción de hogares con NBI y la población con baja educación y finalmente

⁶ La comuna 19 superó en dos indicadores los umbrales de vulnerabilidad severa, sin embargo, no sobrepasó los umbrales de vulnerabilidad en al menos tres indicadores.

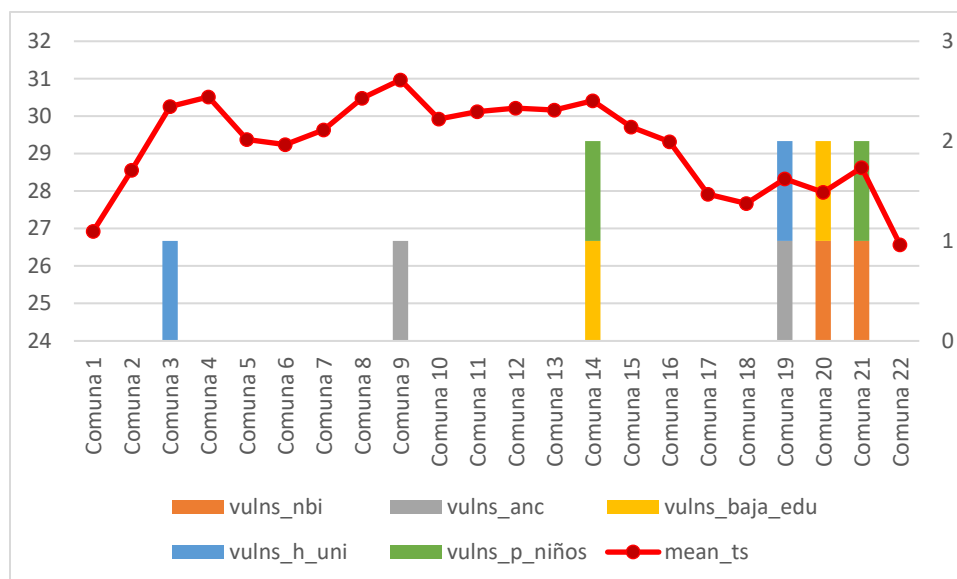
la tercera en la proporción de niños y hogares con NBI. Estos aspectos reflejan la prominencia de población joven con bajo nivel socioeconómico y capital humano.

Valga anotar que este resultado enfoca la lupa en la comuna 14, localizada en una de las zonas de oriente de mayor pobreza y condiciones adversas, como aquella que concentra población con riesgo de sufrir efectos drásticos de salud, dada su vulnerabilidad severa a las altas temperaturas superficiales y a las características biofísicas del suelo.



Fuente: elaboración propia

Figura 5. Mapa de cuantiles de la temperatura superficial (°C) con delimitación de comunas con vulnerabilidad severa al calor en Santiago de Cali.



Fuente: elaboración propia

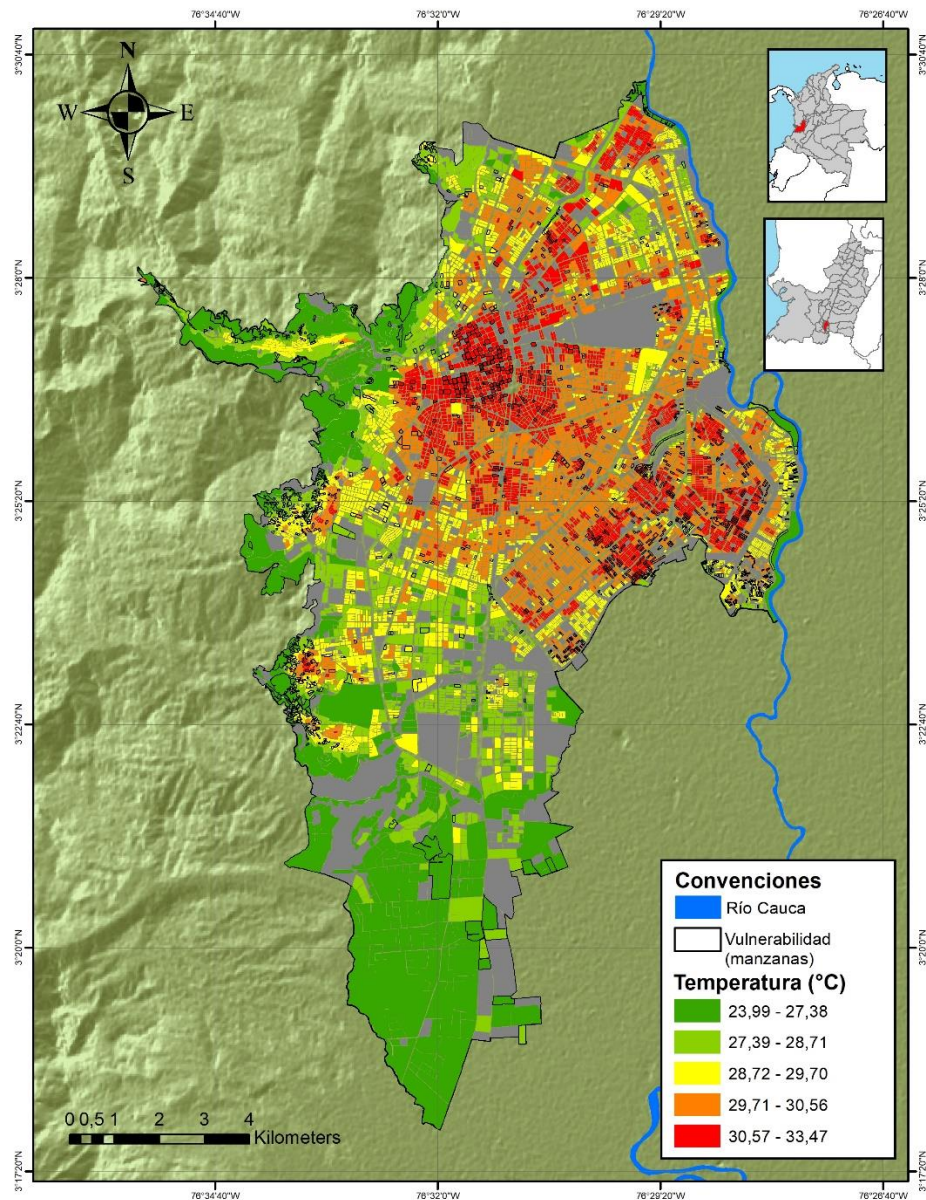
Figura 6. Indicadores de vulnerabilidad severa que han superado los umbrales definidos en contraste con la temperatura superficial (°C) obtenida por cada comuna de Santiago de Cali.

La figura 7 expone los cuantiles del promedio por manzana para la temperatura superficial en la ciudad y la delimitación del 17.73% de las manzanas que presentan vulnerabilidad. En la primera se observa que las manzanas localizadas en las comunas 3 y 9 del centro de la ciudad, presentan temperaturas entre los 30,57 y 33,47° C, confirmando la teoría y los resultados encontrados en párrafos anteriores. Sumado a ello, concentran una población que supera en al menos tres umbrales los indicadores de vulnerabilidad, lo que refleja un riesgo a insolación, golpes de calor y enfermedades agudizadas por las altas temperaturas.

De igual forma, se observan prominentes agrupaciones de manzanas identificadas como vulnerables en la zona occidental, principalmente aquellas ubicadas en las comunas 18 y 20.

Pese a ello, la mayoría de estas manzanas presentan temperaturas superficiales promedio entre los 23,99 y los 29,70° C, por lo que, si bien concentran población vulnerable, no presentan valores elevados de temperaturas superficiales.

En contraste, las manzanas localizadas en las comunas 13, 14, 15, 16 y 21 revelan altas concentraciones de población vulnerable a las altas temperaturas, y el riesgo se evidencia al presentar temperaturas superficiales entre los 29,71 y los 33,47° C, en este grupo se excluye la comuna 21 que exhibe la mayoría de las manzanas entre los 28,72 y 29,70° C.

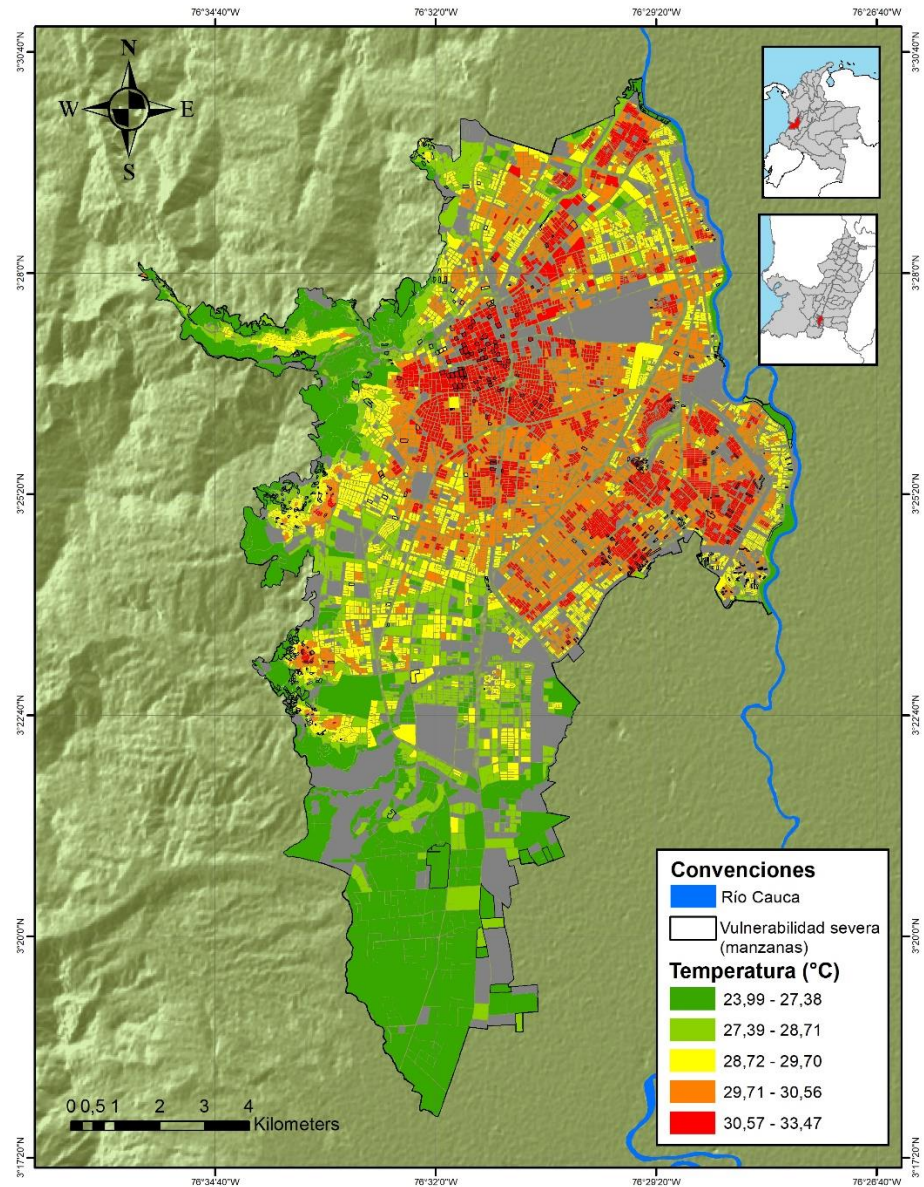


Fuente: elaboración propia

Figura 7. Mapa de cuantiles de la temperatura superficial (°C) con delimitación de manzanas vulnerables al calor en Santiago de Cali.

La figura 8 permite apreciar los cuantiles del promedio por manzana para la temperatura superficial en la ciudad, delimitados por el 7.92% de las que presentaron vulnerabilidad severa. Al igual que en la figura 7, se observan manzanas delimitadas principalmente en las

comunas 3, 9, 14, 15, 20 y 21. Ahora bien, al sobreponer las manzanas a la clasificación por temperatura superficial, se encuentra que el riesgo se concentra principalmente en la población que habita las manzanas de barrios como San Nicolás en la comuna 3, Sucre y Obrero en la comuna 9, Manuela Beltrán y Promociones Populares en la comuna 14 y los comuneros en la comuna 15, teniendo en cuenta que presentan temperaturas entre los 29,71 y 33,47° C. Pese a identificar concentración de población con vulnerabilidad severa a las altas temperaturas en las manzanas de las comunas 20 y 21, no se consideran directamente en riesgo al tener prevalencia de temperaturas superficiales entre los 23,99 y 29,70° C.



Fuente: elaboración propia

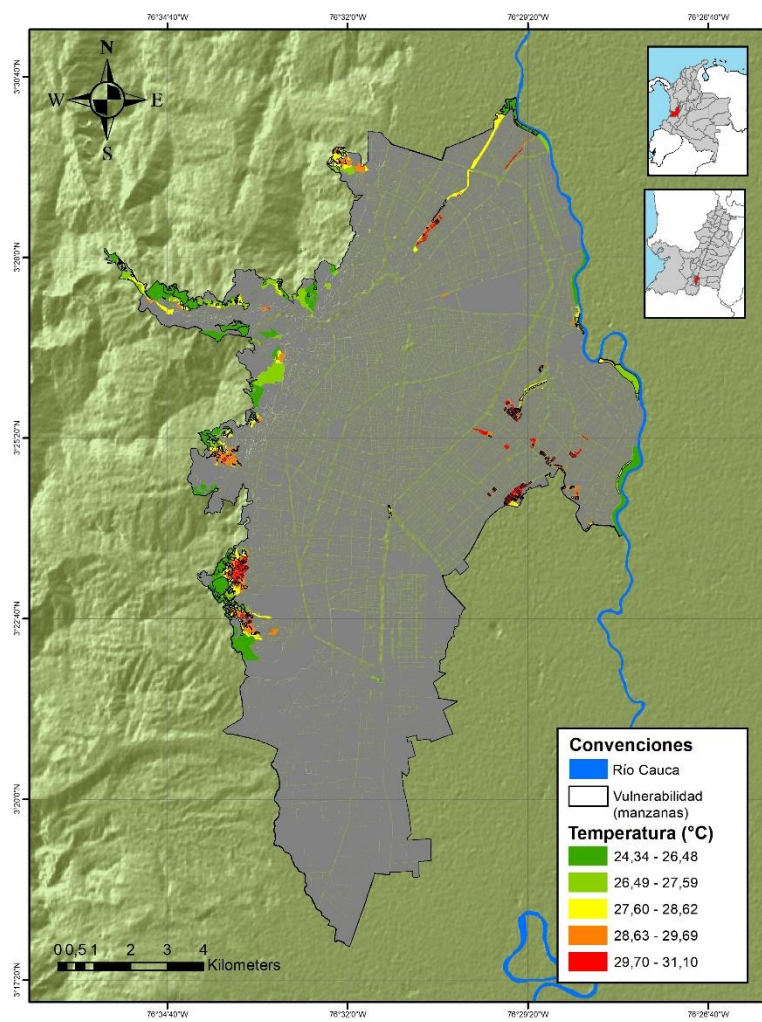
Figura 8. Mapa de cuantiles de la temperatura superficial (°C) con delimitación de manzanas con vulnerabilidad severa al calor en Santiago de Cali.

Ahora bien, la figura 9 agrupa seis mapas, cinco de ellos establecen un acercamiento a la temperatura superficial y las manzanas de los AHDl en diferentes zonas y/o comunas de Cali donde se ha identificado una concentración de población vulnerable a las altas temperaturas

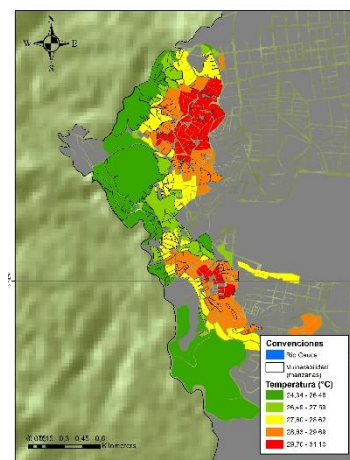
(43,29% de las manzanas). Al sobreponer las manzanas definidas como vulnerables a la clasificación por cuantiles de la temperatura superficial, se evidencia un claro riesgo en aquellas ubicadas en AHDI con temperaturas superficiales entre los 28,63 y 31,10° C, tal es el caso de asentamientos como Altos de los Chorros, las Minas y la Esperanza al norte de la comuna 18, y Las Palmas I, Brisas de las Palmas y Pampas del Mirador al sur de la misma(figura 9b).

De igual forma, las manzanas asociadas a AHDI en el oriente de la ciudad presentaron prevalencia de temperaturas superficiales entre los 28.63 y 31,10° C para los AHDI como La Florida, Nueva Florida, Polo, el Jazmín, Playa Alta, Playa Baja, entre otros ubicados en los alrededores de la laguna de El Pondaje y/o el centro de la comuna 13, además de Cinta Navarro y Tayrona El Pilar al sur de la comuna 14 y Haití, Brisas de las Palmas y Brisas de Comuneros al nororiente de la comuna 15 (figura 9f). Pese a presentar AHDI, las manzanas localizadas en las comunas 1 (figura 9d), 2 (figura 9e) y 20 (figura 9c) no revelan la combinación de altas temperaturas superficiales y la concentración de población vulnerable a esta misma característica biofísica del suelo.

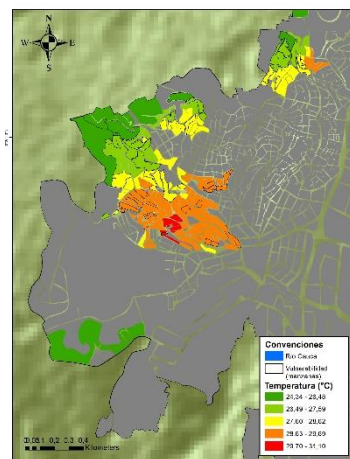
a)

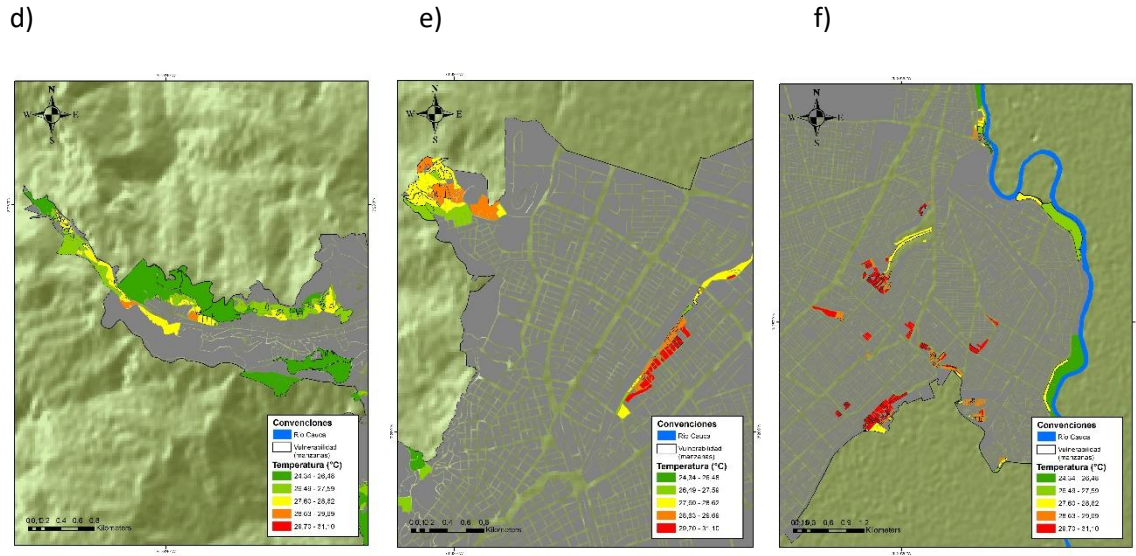


b)



c)





Fuente: elaboración propia

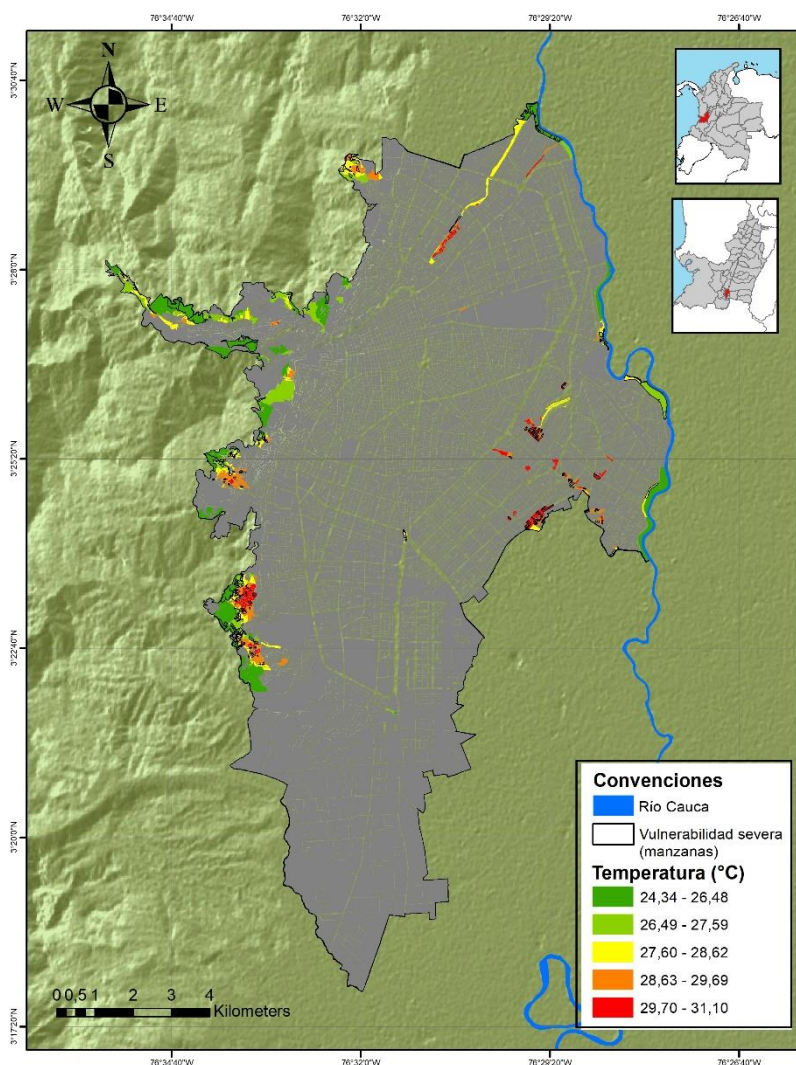
Figura 9. Mapa de cuantiles de la temperatura superficial (°C) con delimitación de manzanas pertenecientes a AHDI con vulnerabilidad al calor localizadas a lo largo de la ciudad (a), en la comuna 18 (b), la comuna 20 (c), la comuna 1 (d), la comuna 2 (e) y las comunas del oriente (f).

Al igual que la figura 9, la figura 10 muestra un acercamiento a la temperatura superficial y las manzanas de los AHDI en diferentes zonas y/o comunas de Cali donde se ha identificado una concentración de población con vulnerabilidad severa a las altas temperaturas (29,78% de las manzanas).

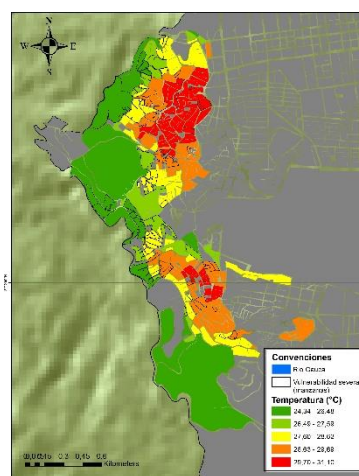
Cuando se sobreponen las manzanas con vulnerabilidad severa a la clasificación por cuantiles de la temperatura superficial, se identifica un alto riesgo en las manzanas ubicadas en AHDI como Altos de los Chorros y Paleteros al norte de la comuna 18, donde prevalecen temperaturas entre los 29,70 y 31,10° C, y al sur, Las Palmas I y Pampas del Mirador, presentando temperaturas entre los 28,63 y 29,69° C (figura 10b). En esa misma línea, se observa que la mayoría de las manzanas pertenecientes a AHDI en el oriente definidas

anteriormente como vulnerables, también presentaron concentración de población con vulnerabilidad severa a las altas temperaturas; aquellas ubicadas en el centro de las comunas 13 y 15 presentaron temperaturas superficiales entre los 29,70 y 31,10° C, mientras que las localizadas en la comuna 14 presentan valores entre los 28.63 y 31,10° C (figura 10f).

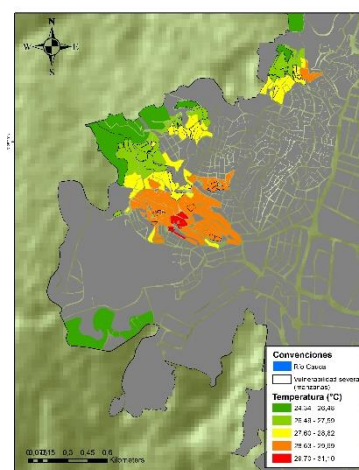
a)

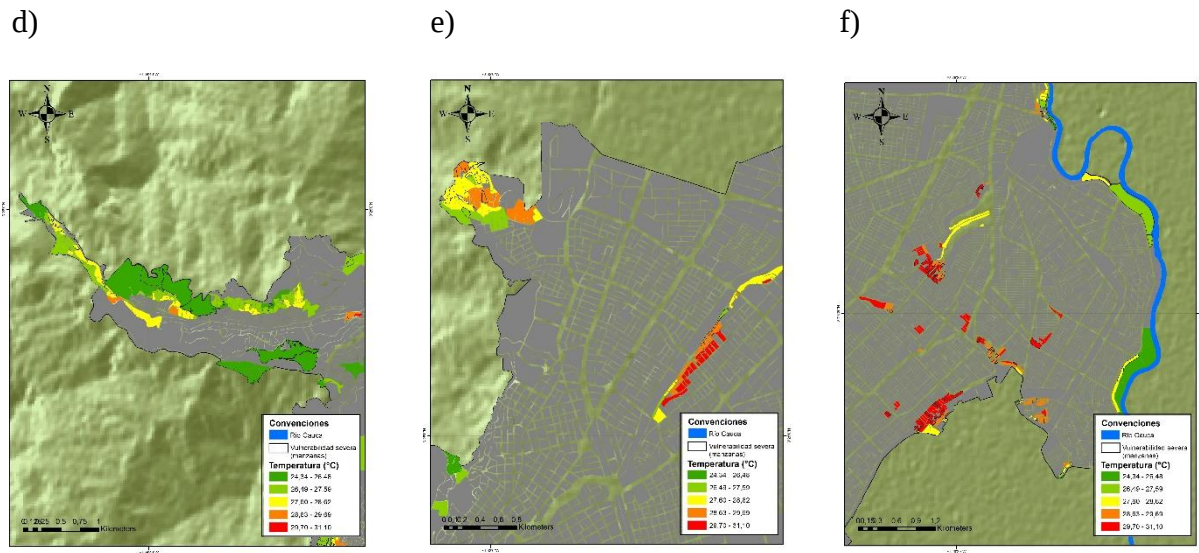


b)



c)





Fuente: elaboración propia

Figura 10. Mapa de cuantiles de la temperatura superficial (°C) con delimitación de manzanas pertenecientes a AHDI con vulnerabilidad severa localizadas a lo largo de la ciudad (a), en la comuna 18 (b), la comuna 20 (c), la comuna 1 (d), la comuna 2 (e) y las comunas del oriente (f).

DISCUSIÓN

Las características topográficas de la ciudad de Cali y sus dinámicas de ocupación del suelo producen variaciones singulares en la distribución intraurbana de la población vulnerable a las altas temperaturas, cuando se compara con estudios previos realizados en otras ciudades del mundo.

Si bien las manzanas ubicadas en el centro de la ciudad (comunidades 3 y 9) presentaron altas temperaturas y concentración de población que superaba, en al menos tres umbrales, los indicadores de vulnerabilidad (resultado que confirma la teoría), la ocurrencia de ambos eventos no es homogénea a lo largo de la ciudad: en la zona oriente las manzanas localizadas

en las comunas 13, 14, 15 presentan altas temperaturas, y a su vez concentran población vulnerable, mientras que en la ladera del río Cauca, donde se ubican las manzanas de comuna 21, las temperaturas son bajas y la población es vulnerable, eventos que ocurren también en las comunas 18 y 20 localizadas en la zona occidental de la ciudad.

Los puntos de encuentro y divergencia del estudio frente a investigaciones se pueden enumerar a continuación:

(i) De acuerdo con el estudio de Sánchez, Nuñez y Neila (2017) los barrios ubicados en el centro de Madrid concentraban altas temperaturas y mayores tasas de ancianos vulnerables al calor, mientras que los niños se localizaban en zonas periféricas con mejores condiciones térmicas (ambos resultados son consistentes con este estudio en la escala de manzanas), pese a ello, el sur de la ciudad concentraba altas temperaturas y población con renta baja, además de migrantes, es decir, la población vulnerable, a excepción de los niños, se localizó en zonas con desconfort térmico.

Resultados similares son expuestos por Harlan et al. (2007) en Phoenix, Arizona y Tomlinson et al. (2011) en Birmingham, Reino Unido, al encontrar que la población con más altos ingresos se ubicaba en la periferia urbana, mientras que la de bajos ingresos en el centro de la ciudad. En esa misma línea, Sabrin, Karimi y Nazari (2020) encuentran en Camden, Nueva Jersey que los vecindarios vulnerables a las altas temperaturas, estaban significativamente expuestos al calor y la contaminación del aire, mientras que los hallazgos de Jhonson y Wilson (2009) en Filadelfia, Pensilvania, sugieren que la mortalidad producida por el calor estaba directamente relacionada con la distribución espacial de los pobres urbanos, es decir, sus zonas de residencia presentaban altas temperaturas. En esa misma línea, Wolf y McGregor (2013) encuentran para la Gran Londres, Reino Unido en 2003, una concentración

espacial significativa de población vulnerable a las altas temperaturas (asociada a factores de riesgo como la alta densidad poblacional, las características de la vivienda, el estado de salud, la dependencia económica, la edad, entre otros) en el centro y el este de la ciudad de Londres, zonas que también presentan exposición potencial al calor.

(ii) Ahora bien, las dinámicas de ocupación del suelo en Cali explican la inconsistencia en la ocurrencia de los dos eventos mencionados a lo largo del estudio: las altas temperaturas y la concentración de población vulnerable, centrando el análisis en las características socioeconómicas y las dinámicas migratorias de la ciudad y teniendo en cuenta que la literatura asocia el desconfort térmico a los bajos niveles socioeconómicos, evento que no es lineal en este caso.

El latente conflicto entre actores armados en Colombia produjo desplazamientos forzados internos, principalmente en la costa pacífica. Desde finales de los cuarenta, Cali se convirtió en un centro de refugio para las víctimas del conflicto armado; migrantes afrodescendientes provenientes de la región pacífica se asentaron en la zona oriente de la ciudad, mientras que los desplazados de Antioquia y el Viejo Caldas lo hicieron en las laderas de la cordillera occidental, zonas donde tomó importancia el paisanaje y lograron fortalecer sus redes familiares al recibir población en la misma situación. Estas dinámicas de ocupación tuvieron su origen en el marco del conflicto social ocasionado por la continua demanda de suelo para residir en sectores populares, utilizando mecanismos de presión como las invasiones al monopolio de suelo de la élite caleña. Asentarse era la única opción con limitados recursos económicos que dificultaban su inserción urbana (Barbary, 2004; Barbary, Ramírez y Urrea, 1999).

En este contexto, aunque los habitantes de las laderas del oriente y occidente de la ciudad residan en áreas con vasta vegetación (comunas 18, 20 y 21) y en teoría presenten “confort térmico”, estas zonas son altamente riesgosas dada su exposición a inundaciones y derrumbamiento, por lo que no suponen un privilegio para su población, contrario a lo que ocurre en Phoenix, Arizona y Birmingham, Reino Unido, reseñado en párrafos anteriores, donde la población que reside en la periferia disfruta de las mejores condiciones ambientales y de suelo sin riesgos colaterales.

CONCLUSIONES

Esta investigación permitió identificar en las escalas de comuna y manzana (zona urbana y AHDI), las unidades espaciales que presentaban concentración de población con vulnerabilidad a las altas temperaturas. Ejercicio que resulta de gran relevancia cuando se clasifica la temperatura superficial para examinar las subdivisiones administrativas que deben ser priorizadas en una política municipal de mejora del confort térmico que reduzca el riesgo de sufrir o exacerbar las consecuencias del calor en la salud humana.

Los resultados permiten ver que las comunas 13, 14 y 15 presentan vulnerabilidad a las altas temperaturas al superar los umbrales de los indicadores proporción de hogares con NBI, niños y población con baja educación, lo cual refleja la precariedad socioeconómica en la que habitan y la demografía de la población infantil. Además de que afrontan rangos de temperatura entre los 28,64 y 30,97° C. El análisis de los indicadores muestra que la comuna 14, localizada en la zona oriental de la ciudad, presenta un mayor riesgo frente a las dos comunas identificadas como vulnerables, lo cual resulta de una temperatura superficial promedio de 30,41° C que excede los umbrales de vulnerabilidad severa para la proporción de niños y para la población con desventajas en educación.

Entre los hallazgos también se destaca que las manzanas de las comunas 3 y 9 concentran población vulnerable que afronta temperaturas superficiales promedio entre los 30,57 y 33,47° C. Esto aporta evidencia a favor de la teoría sobre las islas de calor en el centro de la ciudad.

De igual forma, los resultados también arrojaron vulnerabilidad a las altas temperaturas para la población localizada en las manzanas de las comunas 13, 14, 15 y 16 que presentan temperaturas superficiales promedio entre los 29,71 y los 33,47° C. Las manzanas que concentran un alto riesgo a las altas temperaturas dada su habitabilidad de población con vulnerabilidad severa y su composición biofísica del suelo, se localizan en las comunas 3, 9, 14 y 15, presentando temperaturas superficiales promedio entre los 29,71 y 33,47° C.

Finalmente, los AHDI como La Florida, Nueva Florida, Polo, el Jazmín, Playa Alta, Playa Baja localizados en las manzanas de la comuna 13 y en los alrededores de la laguna del Pondaje, así como Cinta Navarro y Tayrona El Pilar, al sur de la comuna 14, Haití, Brisas de las Palmas y Brisas de Comuneros al nororiente de la comuna 15 y Altos de los Chorros, las Minas y la Esperanza al norte de la comuna 18, y Las Palmas I, Brisas de las Palmas y Pampas del Mirador al sur de la misma, presentaron concentración de población vulnerable a las altas temperaturas. Además de que cuentan con distribuciones de temperaturas promedio en los rangos de 28,63 y 31,10° C.

Finalmente, los resultados muestran que las manzanas de los AHDI —en los que prevalece la concentración de población con vulnerabilidad severa a las altas temperaturas— se redujeron levemente, respecto a las que arrojaron vulnerabilidad en las zonas de ladera, tal y como es el caso de la comuna 18, mientras que en las localizadas del oriente la vulnerabilidad severa a las altas temperaturas fue persistente. Las manzanas de AHDI localizadas en las comunas

1 y 20 no se consideraron vulnerables, teniendo en cuenta que presentaron bajas temperaturas superficiales promedio producto de su ubicación geográfica en las zonas de ladera.

Los hallazgos de esta investigación muestran, para la ciudad de Cali, la existencia de zonas con importante presencia de población vulnerable en lo socioeconómico que están expuestas a los efectos de las islas de calor. En la discusión de las consecuencias del cambio climático se hace fundamental para los gobiernos la identificación de estas zonas y sus distintos grados de vulnerabilidad que conlleve al diseño de una estrategia de intervención directa para mitigar los impactos en salud que produce la prevalencia del fenómeno térmico. Reconocer las zonas donde habita la población sin capacidad para responder ante los eventos de calor extremo, bien sea por la mala calidad de las viviendas o por la falta de zonas verdes o adecuados sistemas de climatización y establecer los cambios en la temperatura y sus efectos en la escala urbana, son elementos fundamentales a tener en cuenta en el proceso de toma de decisiones referentes a la planificación y mejora de los barrios que conforman la ciudad.

AGRADECIMIENTOS

Este documento de trabajo es financiado por el programa “Inclusión productiva y social: programas y políticas para la promoción de una economía formal”, código 60185, que conforma Colombia Científica-Alianza EFI, bajo el Contrato de Recuperación Contingente No.FP44842-220-2018.

REFERENCIAS

- Arias, H. A., Zamora, R. M., & Bolaños, C. V. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, RapidEye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo FLAASH del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53), 39-59.
- Barbary, O. (2004). El componente socio-racial de la segregación residencial en Cali. En O. Barbary & F. Urrea (eds.), *Gente negra en Colombia* (pp. 157-194).
- Barbary, O., Ramirez, H. F., & Urrea, F. (1999). Población afrocolombiana y no afrocolombiana en Cali: segregación, diferenciales sociodemográficos y de condiciones de vida». En F. Cubides & C. Domínguez (eds.), *Desplazados, migraciones internas y reestructuraciones territoriales*. Centro de Estudios Sociales.
- Cabras, E. (2014). *Efectos de la morfología de las calles en el fenómeno de la isla de calor urbana en la ciudad de Barcelona: estudio del comportamiento térmico de calles urbanas con diferente relación de aspecto (h/w) y orientación en dos barrios de Barcelona* (Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Catalunya). Repositorio Académico de la Universidad Politécnica de Catalunya <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/23641>
- Chavez, P. S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment*, 24(3), 459-479.
- Chavez, P. S. (1989). Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 55(9), 1285-1294.
- Correa, É. N., Flores, S., y Lesino, G. (2003). Isla de calor urbana: Efecto de los pavimentos. Informe de avance. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 7.

Culqui, D. R., Díaz, J., Simón, F., & Linares, C. (2013). Análisis del impacto de las olas de calor sobre la mortalidad de la ciudad de Madrid durante el período 1990-2009. *Revista Española de Salud Pública*, 87(3), 277-282.

Cunha, J., Nóbrega, R. L., Rufino, I., Erasmi, S., Galvão, C., & Valente, F. (2020). Surface albedo as a proxy for land-cover clearing in seasonally dry forests: evidence from the Brazilian Caatinga. *Remote Sensing of Environment*, 238, 111250.

DANE. (2012). Asistencia Escolar. *Atlas Estadístico Tomo II Social*. Recuperado de: https://geoportal.dane.gov.co/servicios/atlas-estadistico/src/Tomo_II_Social/phone/3.2.7.-poblaci%C3%B3n-de-25-a-64-a%C3%B1os-de-edad-que-alcanz%C3%B3-el-nivel-educativo-primaria.html

El Mundo. (2012). Diferente piel, cuidados distintos. Recuperado de: <https://www.elmundo.es/elmundosalud/2012/08/17/pielsana/1345219952.html>

Expediente Municipal. (2014). Seguimiento y evaluación al Plan de Ordenamiento Territorial. Recuperado de: https://planeacion.cali.gov.co/pot_adoptado/20141201_Expediente%20Municipal%20Cali.pdf

Fernández, F. Martilli, A. (2012). El clima urbano: aspectos generales y su aplicación en el área de Madrid. *Revista Índice* 50:21–24. Recuperado de <http://bit.ly/1PjyRxT>

Harlan, S. L., Brazel, A. J., Jenerette, G. D., Jones, N. S., Larsen, L., Prashad, L., & Stefanov, W. L. (2007). In the shade of affluence: The inequitable distribution of the urban heat island. In *Equity and the Environment*. Emerald Group Publishing Limited.

- Hsu, A., Sheriff, G., Chakraborty, T., & Manya, D. (2021). Disproportionate exposure to urban heat island intensity across major US cities. *Nature communications*, 12(1), 1-11.
- Johnson, D. P., Stanforth, A., Lulla, V., & Lubert, G. (2012). Developing an applied extreme heat vulnerability index utilizing socioeconomic and environmental data. *Applied Geography*, 35(1-2), 23-31.
- Johnson, D. P., & Wilson, J. S. (2009). The socio-spatial dynamics of extreme urban heat events: The case of heat-related deaths in Philadelphia. *Applied geography*, 29(3), 419-434.
- Lucero, Á. (2016). *Estudio comparativo de recubrimientos para techos y el efecto sobre el confort humano y uso de energía en México* (Tesis de posgrado). Centro de Investigación en Materiales Avanzados. Chihuahua.
- Mayo Clinic. (2020). Golpe de calor. Recuperado de <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/heat-stroke/symptoms-causes/syc-20353581>
- Martin, J., & Moreno, M. C. (2020). Probability values for the intensity of Barcelona's urban heat island (Spain). *Atmospheric Research*, 104877.
- McGrath, M. (1 de junio de 2021). El estudio que muestra el impacto del "racismo climático" en Estados Unidos. *BBC*. Recuperado de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-57284630>
- Oke, T. R. (1998). An algorithmic scheme to estimate hourly heat island magnitude. *Preprints of the Second Urban Environment Symposium*, 80-83.

ONU. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
Recuperado de <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>

Preciado Vargas, M. y Aldana Olave, A. (2011). Análisis de presencia de islas de calor en Santiago de Cali empleando técnicas de teledetección. En: *Ventana Informática*. No. 24 (ene-jun., 2011). Manizales (Colombia): Universidad de Manizales. p. 95-114.

Lenis, D. (2004). *Comportamiento de la transferencia de calor en paredes* (Tesis de pregrado). Universidad de los Andes, Bogotá D.C..

Pérez, C. A. F. (2014). Urban heat islands in Tampico, Mexico. Impact of microclimate on the habitat quality. *Nova Scientia*, 7(13), 495-515.

Rosenthal, J. K., Kinney, P. L., & Metzger, K. B. (2014). Intra-urban vulnerability to heat-related mortality in New York City, 1997–2006. *Health & place*, 30, 45-60.

Sabrin, S., Karimi, M., & Nazari, R. (2020). Developing vulnerability index to quantify urban heat islands effects coupled with air pollution: a case study of Camden, NJ. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(6), 349.

Sánchez, C., Nuñez, M., & Neila, F. J. (2017). Isla de calor urbana y población vulnerable. El caso de Madrid. In *Proceedings of the 3rd International Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions*. (2017), p 545-556. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura.

Shahmohamadi, P., Che-Ani, A. I., Maulud, K. N. A., Tawil, N. M., & Abdullah, N. A. G. (2011). The impact of anthropogenic heat on formation of urban heat island and energy consumption balance. *Urban Studies Research*, 2011.

- Sheridan, S. C., & Dolney, T. J. (2003). Heat, mortality, and level of urbanization: measuring vulnerability across Ohio, USA. *Climate Research*, 24(3), 255-265.
- Song, Y. L., & Zhang, S. Y. (2003). The study on heat island effect in Beijing during last 40 years. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 11(4), 126-129.
- Schwartz, J. (2005). ¿Quién es sensible a las temperaturas extremas? Un análisis de solo caso. *Epidemiología*, 67-72.
- Sidiqui, P., Tariq, M. A. U. R., & Ng, A. W. (2022). An Investigation to Identify the Effectiveness of Socioeconomic, Demographic, and Buildings' Characteristics on Surface Urban Heat Island Patterns. *Sustainability*, 14(5), 2777.
- Tan, M., & Li, X. (2015). Quantifying the effects of settlement size on urban heat islands in fairly uniform geographic areas. *Habitat International*, 49, 100-106.
- Theeuwes, N. E., Steeneveld, G. J., Ronda, R. J., & Holtslag, A. A. (2017). A diagnostic equation for the daily maximum urban heat island effect for cities in northwestern Europe. *International Journal of Climatology*, 37(1), 443-454.
- Tomlinson, C. J., Chapman, L., Thornes, J. E., & Baker, C. J. (2011). Including the urban heat island in spatial heat health risk assessment strategies: a case study for Birmingham, UK. *International journal of health geographics*, 10(1), 1-14.
- Urán, M. E., & Cano, L. E. (2011). Melanina: implicaciones en la patogénesis de algunas enfermedades y su capacidad de evadir la respuesta inmune del hospedero. *Infectio*, 12(2).

- Whitman, S., Good, G., Donoghue, E. R., Benbow, N., Shou, W., & Mou, S. (1997). Mortality in Chicago attributed to the July 1995 heat wave. *American Journal of public health*, 87(9), 1515-1518.
- Wolf, T., & McGregor, G. (2013). The development of a heat wave vulnerability index for London, United Kingdom. *Weather and Climate Extremes*, 1, 59-68.
- Wong, M. S., Peng, F., Zou, B., Shi, W. Z., & Wilson, G. J. (2016). Spatially analyzing the inequity of the Hong Kong urban heat island by socio-demographic characteristics. *International journal of environmental research and public health*, 13(3), 317.
- Yang, X., Chen, Y., Peng, L. L., & Wang, Q. (2020). Quantitative methods for identifying meteorological conditions conducive to the development of urban heat islands. *Building and Environment*, 106953.
- Zhang, G. Z., Xu, X. D., Wang, J. Z., & Yang, Y. Q. (2002). A study of characteristics and evolution of urban heat island over Beijing and its surrounding area. *Journal of Applied Meteorological Science*, 13(1), 43-50.

Agradecimientos

Esta serie de documentos de trabajo es financiada por el programa "Inclusión productiva y social: programas y políticas para la promoción de una economía formal", código 60185, que conforma Colombia Científica-Alianza EFI, bajo el Contrato de Recuperación Contingente No.FP44842-220-2018.

Acknowledgments

This working paper series is funded by the Colombia Científica-Alianza EFI Research Program, with code 60185 and contract number FP44842-220-2018, funded by The World Bank through the call Scientific Ecosystems, managed by the Colombian Ministry of Science, Technology and Innovation.