

Urban thermal comfort: Mitigation of heat islands in the north-south corridor of 18th and 19th Streets, Pasto

Confort térmico urbano: Mitigación de islas de calor en el corredor norte-sur Calle 18 y 19, Pasto

Eduard Fernando León Getial¹  

¹Universidad CESMAG. Colombia.

Cite as

León Getial EF. Urban thermal comfort: Mitigation of heat islands in the north-south corridor of 18th and 19th Streets, Pasto. SAP Land and Architecture. 2025; 4:261. <https://doi.org/10.56294/la2025261>

Publication History

Submitted: 12-10-2024

Revised: 05-02-2025

Accepted: 28-08-2025

Published: 29-08-2025

Corresponding Author

Eduard Fernando León Getial 

ABSTRACT

The study analyzed the presence and magnitude of the urban heat island (UHI) phenomenon in the north-south road corridor of Pasto during the period 2013-2023. Historical records from urban and rural weather stations were used, complemented with direct measurements using a digital thermo-hygrometer at 45 strategic points in the study area. The results showed thermal differences of up to 3,9 °C between urban and rural areas, as well as internal contrasts of 3,7 °C over distances of less than one kilometer. These variations were related to building density, the predominant use of impervious surfaces and low vegetation cover. An upward trend in maximum temperatures and a decrease in minimum temperatures was identified, accompanied by a 24 % reduction in wind speed and a progressive increase in solar radiation. The inverse correlation between temperature and relative humidity, confirmed by a Pearson coefficient of -0,73, showed the importance of vegetation and permeable soils in microclimatic regulation. Sectors with more trees and shade showed cooler and more humid microclimates, while paved areas intensified thermal storage. The mitigation proposal included passive strategies such as strategic tree planting, five-story buildings with staggered morphology, and the use of high albedo and low thermal inertia materials in pavements and roofs. The implementation of these measures reduced the average temperature by 2,76 °C and increased relative humidity by 5,75 %. These interventions demonstrated that sustainable urban planning can improve thermal comfort, reduce areas of discomfort by up to 74 % and provide effective solutions to climate change.

Keywords: Urban Heat Islands; Thermal Comfort; Strategic Tree Planting; Urban Morphology; Reflective Materials.

RESUMEN

El estudio analizó la presencia y magnitud del fenómeno de islas de calor urbanas (ICU) en el corredor vial norte-sur de Pasto durante el periodo 2013-2023. Se emplearon registros históricos de estaciones meteorológicas urbanas y rurales, complementados con mediciones directas mediante un termo-higrómetro digital en 45 puntos estratégicos del área de estudio. Los resultados mostraron diferencias térmicas de hasta 3,9 °C entre zonas urbanas y rurales, así como contrastes internos de 3,7 °C en distancias menores a un kilómetro. Estas variaciones se relacionaron con la densidad edificatoria, el uso predominante de superficies impermeables y la escasa cobertura vegetal. Se identificó una tendencia ascendente en las temperaturas máximas y un descenso en las mínimas, acompañado por una reducción del 24 % en la velocidad del viento y un aumento progresivo de la radiación solar. La correlación inversa entre temperatura y humedad relativa, confirmada con un coeficiente de Pearson de -0,73, evidenció la importancia de la vegetación y los suelos permeables en la regulación microclimática. Sectores con mayor arborización y sombra mostraron microclimas más frescos y húmedos, mientras que áreas pavimentadas intensificaron el almacenamiento térmico. La propuesta de mitigación contempló estrategias pasivas como arborización estratégica, edificaciones de cinco pisos con morfología escalonada y el uso de materiales de alto albedo y baja inercia térmica en pavimentos y cubiertas. La implementación de estas medidas permitió reducir la temperatura promedio en 2,76 °C y aumentar la humedad relativa en 5,75 %. Estas intervenciones demostraron que la planificación urbana sostenible puede mejorar el confort térmico, reducir áreas de desconfort hasta en un 74 % y aportar soluciones efectivas frente al cambio climático.

Palabras clave: Islas de Calor Urbanas; Confort Térmico; Arborización Estratégica; Morfología Urbana; Materiales Reflectantes.

INTRODUCCIÓN

Godínez et al.⁽¹⁾ mencionan que Howard fue uno de los primeros en notar un exceso de calor artificial en las ciudades producto de los cambios antrópicos, la densidad edificatoria y la transformación del medio. Posteriormente se denominaría islas de calor urbanas (ICU), término considerado en la actualidad como uno de los fenómenos más preocupantes que afectan la habitabilidad y el confort térmico. Este fenómeno describe el aumento de temperatura en zonas urbanizadas respecto a sus entornos rurales cercanos, comprometiendo el uso de espacios públicos y la salud de los habitantes.

La comprensión del fenómeno de las ICU requiere un enfoque interdisciplinar que integre variables climáticas, morfología urbana, aspectos ecológicos y ambientales. Las estrategias de mitigación contemplan soluciones pasivas que aprovechan los recursos naturales y optimizan el diseño urbano para mejorar las condiciones ambientales sin depender de sistemas mecánicos y el uso de las edificaciones como componente de reducción de temperatura. Aquí, el diseño urbano adquiere un papel fundamental en la mitigación de las ICU.

En este sentido, el corredor vial norte-sur de Pasto, delimitado por las calles 18 y 19, representa un caso de estudio significativo. Su ubicación en los Andes tropicales a 2550 msnm, con topografía quebrada y una estructura urbana colonial que se entrelaza con dinámicas comerciales modernas, crea condiciones particulares para la formación de ICU. Este eje, con un área de 465 232 m² constituye un núcleo comercial y turístico dentro del centro histórico, caracterizado por alta densidad edificatoria y uso predominante de materiales que intensifican la acumulación térmica.

La información utilizada en este estudio se obtuvo mediante mediciones en campo con un termo-higrómetro digital, aplicando un protocolo de captura en puntos distribuidos sobre el corredor vial. A esto se sumaron datos secundarios tomados de estaciones meteorológicas urbanas y rurales.

Los datos fueron organizados y procesados con herramientas estadísticas y simulaciones en Rhino-Grasshopper (Ladybug), lo que permitió comparar variables como temperatura, humedad relativa y velocidad del viento frente a la configuración urbana. El análisis de la dinámica térmica del corredor urbano norte-sur de Pasto revela patrones significativos de variación climática y la presencia del fenómeno de islas de calor urbano (ICU).

Los datos recopilados durante una década (2013-2023) proporcionan una base para caracterizar estos cambios ambientales y su impacto en el entorno urbano.

La implementación de infraestructura verde contribuye significativamente a la reducción de la temperatura superficial y del aire, al tiempo que mejora la calidad del entorno urbano. Además, el uso de materiales de alta reflectancia (albedo elevado), la correcta orientación de las edificaciones y la ventilación cruzada en los diseños arquitectónicos permiten reducir la acumulación de calor en zonas densamente construidas; estrategias que se tendrán en cuenta en el planteamiento y propuesta para este corredor.

Análisis de las condiciones ambientales durante una década para el corredor, a partir de fuentes secundarias.

De acuerdo con Guzmán et al.⁽²⁾ el estudio de confort exterior aborda una mezcla compleja de relaciones entre parámetros altamente variables e incluyen grupos de usuarios, actividades y microclimas, es decir, afronta aspectos relacionados con la comodidad bioclimática y los efectos de adaptación a la modificación de condiciones del ambiente exterior. En esta línea, Escobar⁽³⁾ sugiere un método para la recolección de la información de las variables ambientales; este protocolo sirve como insumo a lo largo de esta investigación mediante una observación no participante, recopilación documental y cartografías que identifican el espacio urbano actual donde se desarrolla el estudio.

Los registros históricos meteorológicos del período 2013-2023 de la estación ubicada en la Universidad CESMAG sede centro se hicieron en mediciones tomadas cada 5 minutos lo que permitió una caracterización detallada de las variaciones climáticas a escala intermedia en el área urbana. La temperatura máxima más alta se registró en 2018 con un valor de 26,2°C mientras que la temperatura mínima más baja fue de 6°C en 2022.

El análisis de la tendencia térmica durante la década muestra un comportamiento divergente: mientras las temperaturas máximas presentan un patrón ascendente (con un incremento promedio de 0,15°C), las temperaturas mínimas siguen una tendencia descendente (al disminuir 0,21°C anualmente).

En cuanto a la humedad relativa, el año 2022 presentó el promedio más alto con 79,64 %, mientras que en 2016 se registró el promedio más bajo con 73,46 %. La humedad relativa máxima siempre alcanzó el 98 %, pero la mínima llegó a su valor más bajo (23 %) en 2016.

Un dato particularmente alarmante es la disminución continua en la velocidad promedio del viento durante el período estudiado. El año 2013 registró la velocidad más alta con 4,50 m/s, mientras que 2023 mostró la velocidad más baja con 3,40 m/s, lo que representa una reducción aproximada del 24 % en una década.

Esta tendencia descendente sugiere una menor renovación del aire, resultando en mayor acumulación de focos de temperatura que afectan negativamente el confort térmico de los usuarios en las áreas urbanas.

En relación con la radiación solar, los promedios anuales fluctuaron entre 6 y 7 kWh/m² día. El 2023 fue el año con el promedio más alto. Los valores diarios máximos, cercanos a 800 W/m² se alcanzaron al mediodía en los meses de febrero, julio y agosto, mientras que los mínimos (alrededor de 400 W/m²) se observaron en las tardes de abril, mayo y noviembre. La tendencia muestra un incremento constante en los niveles de radiación solar a lo largo de la década.

Para evaluar la existencia y magnitud del fenómeno de islas de calor, también se realizó un análisis comparativo entre la estación urbana de la Universidad CESMAG y una red de estaciones ubicadas en áreas rurales: Chimayoy (1°15'48.87"N, 77°17'2.64"O), Encano (1°9'34.68"N, 77°9'40.58"O), Botana (1°9'37.69"N, 77°16'44.39"O) y Obonuco (1°12'2.29"N, 77°18'1.63"O). Esta distribución espacial permitió una medición comparativa de la temperatura en diferentes entornos.

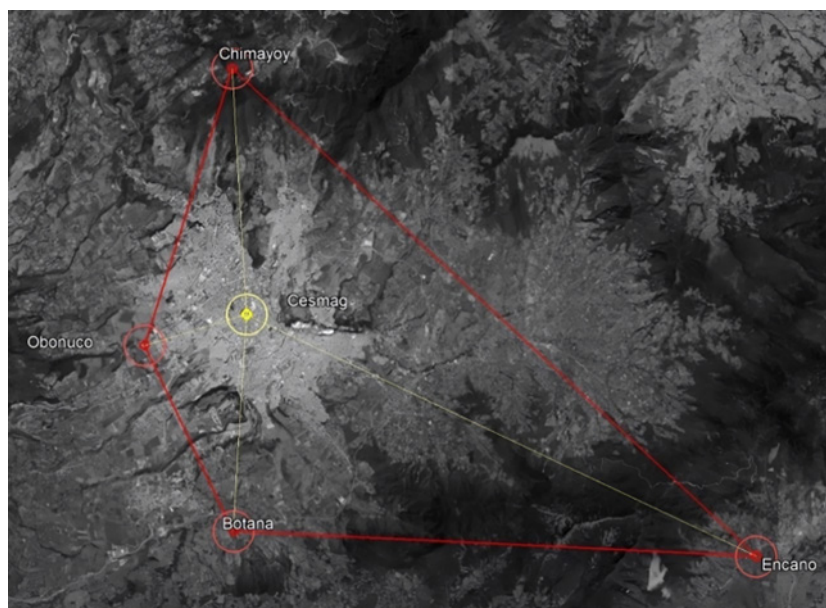


Figura 1. Red estaciones meteorológicas para comparación de datos ambientales

La comparación entre las zonas urbanas y rurales evidencia una diferencia térmica importante referente al fenómeno de islas de calor como componente clave en el aumento de temperaturas urbanas. La temperatura máxima promedio registrada en todas las estaciones rurales fue de $17,7^{\circ}\text{C}$ en 2013, mientras que la mínima promedio alcanzó los $8,4^{\circ}\text{C}$ en 2022. El promedio general de temperaturas en la red de estaciones rurales fue de $13,2^{\circ}\text{C}$ significativamente inferior al promedio urbano. La mayor diferencia se observó en 2016, cuando los promedios anuales mostraron un incremento de hasta $3,9^{\circ}\text{C}$ en las zonas urbanas comparadas con las rurales. El diferencial térmico demuestra que las áreas urbanas de Pasto presentan un aumento considerable de temperatura, con un impacto de mediano a alto en el clima local.

El análisis de los datos históricos y las mediciones in situ confirma la presencia del fenómeno de islas de calor urbanas en la conexión norte-sur de Pasto, con diferencias térmicas significativas entre zonas urbanas y rurales, así como entre áreas con diferente cobertura vegetal dentro del mismo corredor urbano. Es posible inferir que el fenómeno está relacionado con la reducción de la velocidad del viento, el aumento de la radiación solar, y la disminución de la humedad relativa, factores que demandan estrategias específicas de mitigación para mejorar el confort térmico y la calidad ambiental de la ciudad. Es importante señalar que, aunque las islas de calor son recurrentes; el entorno urbano y rural de Pasto, en conjunto, pueden generar procesos homeostáticos que permiten cierta regulación natural de la temperatura. Esto se debe a la influencia de la Estructura Ecológica Principal (EEP) sobre el microclima local, por eso la importancia de reverdecer la ciudad.

Análisis de las condiciones ambientales para el corredor, a partir de fuentes primarias de información.

Para complementar los datos históricos, se implementó un protocolo de medición directa. La metodología incluyó la utilización de un termo higrómetro digital (Ut333 de Unit-t) capaz de medir temperatura y humedad en un rango de 9 m^2 . Se seleccionaron 45 puntos estratégicos a lo largo del corredor vial de las calles 18 y 19. En cada punto se realizaron tres mediciones consecutivas por tramo de manzana, con un tiempo total de 5 minutos para cada conjunto, lo que permitió calcular promedios y suavizar fluctuaciones momentáneas.



Figura 2. Conexión Norte-Sur Pasto entre calles 18 y 19, entre las carreras 19 y 31c

Las mediciones se efectuaron entre las 12:30 y 13:30 horas para capturar el período de máxima exposición solar, a una altura estandarizada de un metro sobre el nivel del suelo. Se incluyeron tanto áreas expuestas como zonas bajo la influencia de sombra proporcionada por árboles, permitiendo comparar diferentes microclimas.

Durante el período de medición se obtuvieron 450 datos: 225 de temperatura y 225 de humedad relativa. Las temperaturas registradas oscilaron entre un mínimo de 21,3°C y un máximo de 24,5°C mientras que los valores de humedad relativa variaron entre un mínimo del 39,4 % y un máximo del 45,4 %, a partir de ello se identificaron los sectores más afectados por las ICU y que fueron clasificados en categorías de vulnerabilidad:

- Vulnerabilidad baja: sectores con temperaturas por debajo de la tendencia (entre 22,5°C y 23°C) que presentan mayor regulación térmica.
- Vulnerabilidad media: sectores con temperaturas en el rango de la tendencia, que muestran factores que contribuyen tanto a la existencia como a la mitigación del fenómeno.
- Vulnerabilidad alta: sectores con temperaturas por encima de la tendencia, los más vulnerables al aumento del fenómeno.

El sector 30 (calle 18 y 19, entre carrera 28) registró la temperatura más alta (25°C) y la humedad relativa más baja (39,45 %), mientras que el sector 41 (parque infantil) presentó la temperatura más baja (21,31°C) y la humedad relativa más alta (45,41 %). Este contraste de 3,69°C entre ambos puntos evidencia la relación entre la presencia de vegetación, la cobertura vegetal y la temperatura. Las zonas con mayor cobertura arbórea tienden a presentar microclimas más frescos y húmedos debido al efecto de sombreado y a los procesos de evapotranspiración, mientras que las áreas con menor vegetación y mayor proporción de superficies impermeables intensifican el almacenamiento de calor, lo cual incrementa la temperatura del aire y reduce la humedad relativa.

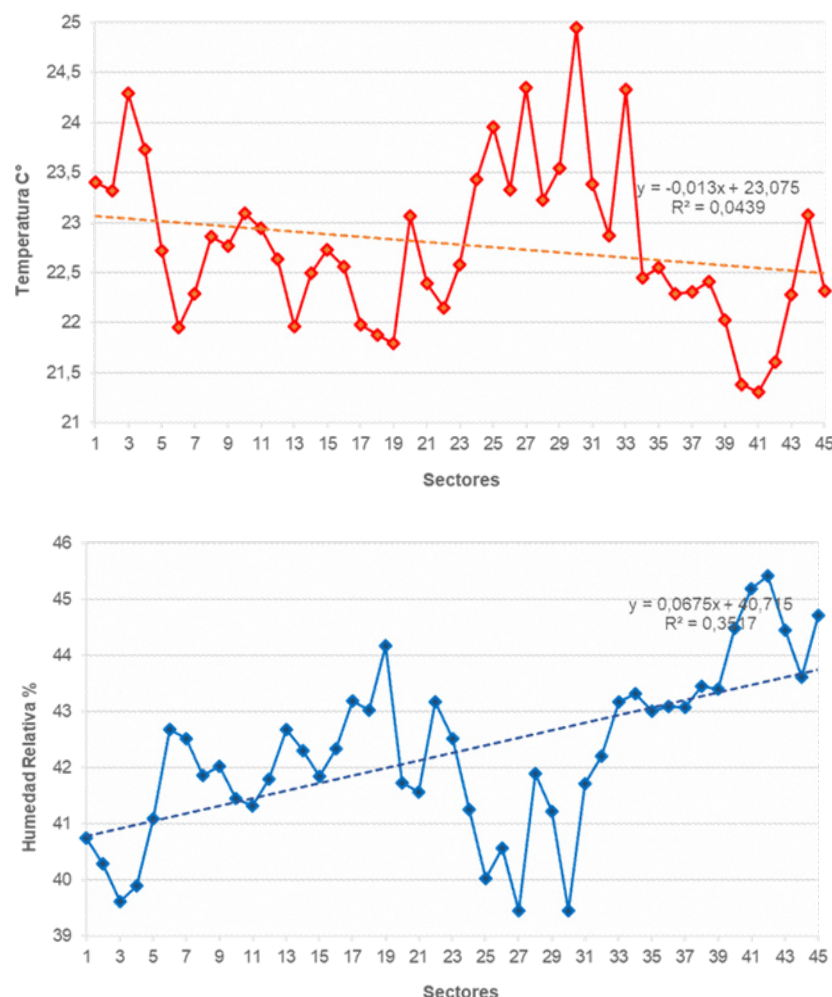


Figura 3. Datos de temperatura ambiental y humedad relativa sobre la conexión norte-sur, bajo protocolo de medición

Se detectaron cinco núcleos urbanos donde la temperatura excede los 24,5°C mientras la humedad relativa desciende por debajo del 40 %. Por otra parte, el análisis de contorno reveló ejes de propagación térmica que siguen las principales vías asfaltadas (calle 18 entre carreras 26-29), donde el efecto cañón urbano amplifica el fenómeno de isla de calor. Existen zonas de confort relativo en torno a espacios con vegetación significativa, la temperatura puede descender hasta 3,7°C respecto a zonas cercanas pavimentadas.

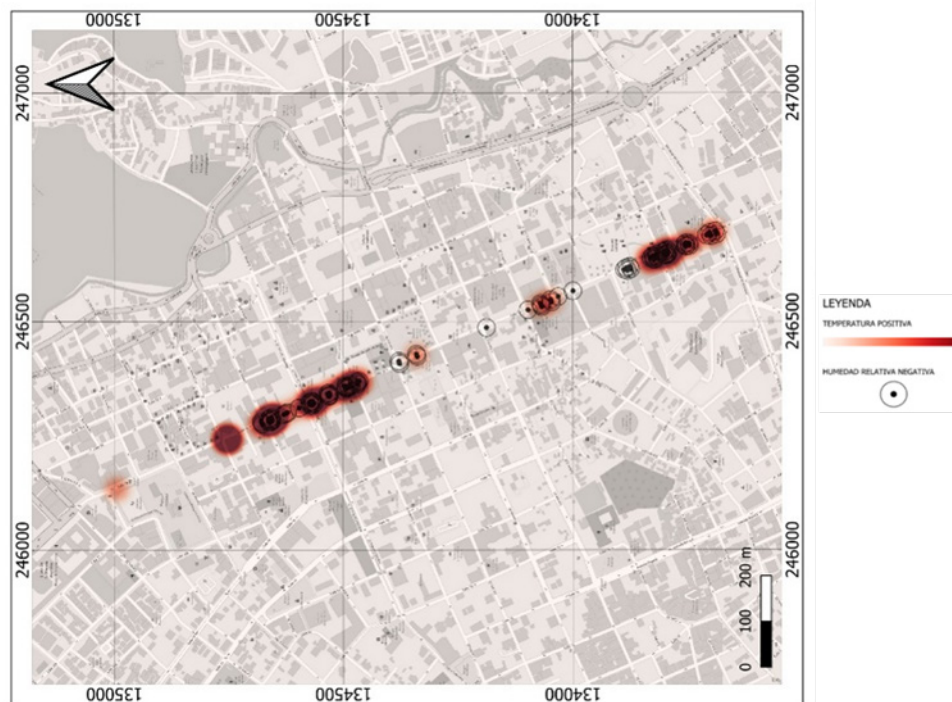


Figura 4. Mapa de calor de temperatura elevada y humedad relativa baja

Los datos inferen una relación inversamente proporcional entre temperatura y humedad relativa: cuando la temperatura aumenta, la humedad relativa disminuye, y viceversa. La línea de tendencia de la temperatura a lo largo de los 45 sectores muestra una ligera disminución ($y = -0,013x + 23\ 075$), mientras que la humedad relativa presenta un incremento gradual ($y = 0,0675x + 40\ 715$). La correlación inversa entre temperatura y humedad relativa está estadísticamente validada mediante un coeficiente de Pearson $r = -0,73$ ($p < 0,001$), lo que confirma la hipótesis de que ambas variables mantienen una relación inversamente proporcional. En otras palabras, esto demuestra la importancia de abordar las bajas humedades para reducir la temperatura como parte de las estrategias de mitigación de las islas de calor urbanas, principalmente mediante la adición de componentes arbóreos y suelos permeables.

Las superficies impermeables, que ocupan el 60,24 % del área estudiada, funcionan como acumuladores de calor. El asfalto, con una inercia térmica de $1294\text{ J/m}^2\text{K}$, almacena seis veces más calor que los suelos permeables. El concreto pigmentado ($1122\text{ J/m}^2\text{K}$) y el zinc ($1329\text{ J/m}^2\text{K}$), predominantes en fachadas y cubiertas, reflejan solo 25-35 % de la radiación incidente, frente al 60 % que reflejan los techos fríos experimentales.

La traza colonial con manzanas de $100 \times 100\text{ m}$ y fachadas continuas crea cañones urbanos que alteran la dinámica de ventilación. Las simulaciones 3D demostraron que los edificios de 5 pisos en el sector PEMP proyectan apenas 2,41 % de sombra útil al mediodía, mientras que en áreas no reguladas, la combinación de alturas irregulares genera turbulencias que estancan masas de aire caliente.

El desnivel topográfico (15 m en 500 m de longitud) crea un efecto donde las zonas bajas (2519 msnm) acumulan $1,7^\circ\text{C}$ más que las altas (2534 msnm) debido al drenaje nocturno de aire frío. Este fenómeno se intensifica con la actividad comercial (hornos, vehículos), que aporta $0,8^\circ\text{C}$ adicionales en horarios pico.

La distribución normal (campana de Gauss) arrojó como resultados que existe una probabilidad del 14,94 % de que la temperatura supere los límites establecidos para el rango de confort según el modelo de Olgyay. Esta aproximación probabilística permitió categorizar los sectores analizados según su nivel de riesgo térmico. Se destacan sectores con riesgo térmico severo ubicados en el tramo de la calle 18 entre carreras 27 y 29, caracterizado por superficies de alta inercia térmica y escasa vegetación con probabilidades de áreas de confort de 30,56 %, 30,77 % y 25,45 %.

Los sectores con riesgo térmico moderado tienen de 10-25 % de probabilidad y donde la combinación de factores urbanísticos genera condiciones de discomfort ocasional. También se encuentran los sectores con bajo riesgo térmico (menores al 10 % de probabilidad) caracterizados por la presencia de elementos vegetales que contribuyen a mantener condiciones más próximas al confort térmico. Esta segmentación probabilística permite priorizar intervenciones urbanas según el nivel de riesgo térmico de cada sector, optimizando la asignación de recursos para estrategias de mitigación. Las áreas con alta temperatura y baja humedad incrementan significativamente el estrés térmico en espacios públicos. Además, la correlación espacial entre ambas variables se clasificó según su comportamiento bioclimático combinado, aplicando el principio de confort termodinámico de Olgyay. El análisis del diagrama de Olgyay revela que el 37,8 % de los espacios urbanos evaluados se encuentra fuera de la zona de confort durante el periodo crítico del día, por lo que requieren estrategias específicas de mitigación. El análisis espacial de la distribución térmica en el área de estudio permitió identificar sectores críticos con mayores niveles de estrés térmico, asociados principalmente a la escasa cobertura vegetal, alta densidad de superficies impermeables y ausencia de elementos de sombra, estrategias pasivas que serán tenidas en cuenta para la mitigación de las ICU. En este contexto, se hace necesaria la formulación de estrategias que integren soluciones y criterios de diseño urbano orientados a reducir temperaturas elevadas y mejorar las condiciones ambientales locales.

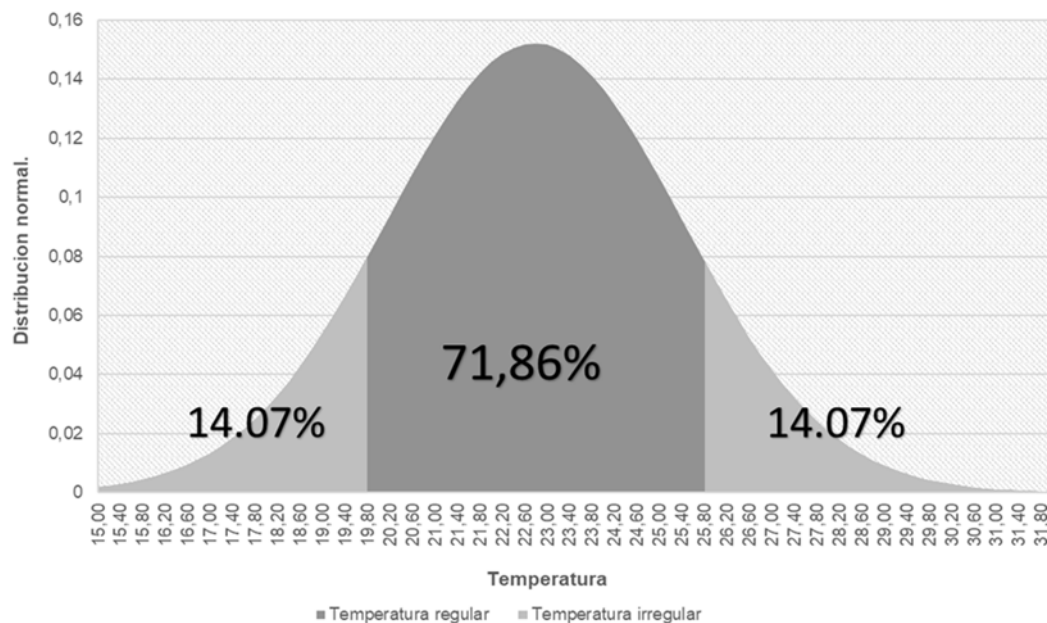


Figura 5. Campana de Gauss, probabilidad áreas de confort o desconfort para la temperatura

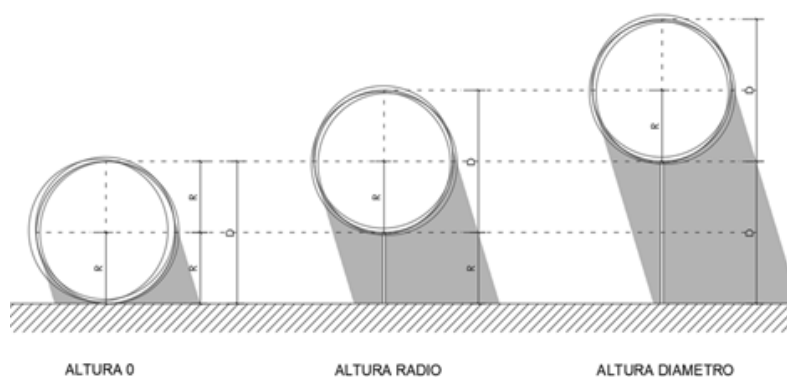
Con la implementación integrada de estrategias, se pudo determinar que la reducción de temperatura se da hasta en 4,2°C en los sectores más críticos para la regulación térmica urbana que desplaza la distribución probabilística hacia rangos de mayor confort térmico y reduce el porcentaje de áreas fuera del confort del 14,94 % actual a un estimado de 3,8 %. Las estrategias proyectadas son:

Arborización estratégica

Los árboles desempeñan un papel fundamental en la modificación de las corrientes de aire urbano. La disposición lineal de árboles a lo largo de calles y andenes actúa como barrera parcial al flujo de aire, generando turbulencias que mejoran la dispersión de contaminantes y contribuyen al enfriamiento de la superficie mediante la sombra proyectada. En plazas y parques, las masas arbóreas crean microclimas diferenciados con velocidades de viento reducidas y áreas de calma relativa, las cuales mejoran la mezcla del aire y elevan la humedad ambiental. La evapotranspiración de los árboles añade vapor de agua al aire circundante que incrementan la humedad relativa y reducen la temperatura perceptible, con efecto refrigerante natural que se extiende a las áreas adyacentes, especialmente durante la noche. En su investigación sobre el impacto de la arborización en Barranquilla, Colombia, Zuluaga Gómez et al.⁽⁴⁾ demostró que la plantación de árboles en espacios públicos puede reducir drásticamente las temperaturas operativas, lo cual permite mitigar el efecto de las islas de calor en un 63 % con la inclusión de 50 árboles a lo largo de la vía.

También la eficiencia de la altura de la copa constituye un factor determinante en la arborización urbana. Los árboles con copa baja (altura de tronco nula) son 47,45 % más efectivos que aquellos de copa media y 50,57 % más efectivos que los de copa alta en términos de proyección de sombra y reducción térmica.

La aplicación práctica en entornos urbanos exige considerar la funcionalidad de los espacios en aceras y vías peatonales. Los resultados de la investigación sugieren mantener una altura mínima del tronco superior a 2,6 metros para garantizar la circulación fluida de peatones y no obstaculizar el campo visual de los transeúntes. Esta configuración permite alcanzar reducciones de temperatura de hasta 4°C mediante la proyección de sombra efectiva. Respecto a la densidad arbórea óptima, las simulaciones realizadas demostraron la distribución más eficiente con una ocupación del 25 % con árboles de 64 m² de área y copa baja; 38,93 % más eficaz que la configuración arbórea con copa media y 44,95 % más eficaz que aquella con copa alta. Con la distribución propuesta se optimizan los recursos disponibles y se evita la saturación visual en espacios urbanos, al mantener un equilibrio entre la intervención arbórea y la funcionalidad de los espacios.



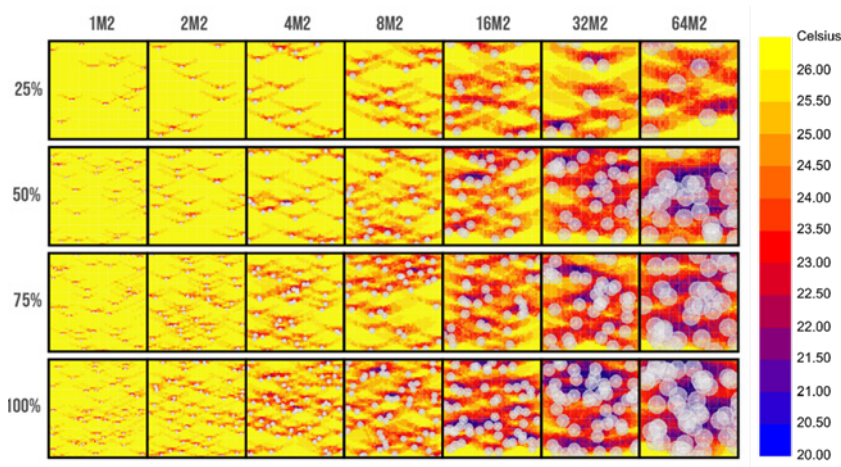


Figura 6. Alturas del material vegetal y eficacia de cobertura vegetal sobre proyección de sombra vs densidad arborea

La distancia óptima entre árboles corresponde al radio de su copa, creando una disposición alineada que maximiza la eficiencia de la sombra proyectada. Con esta configuración, la copa baja demostró ser 56 % más efectiva que la copa media y 58 % más efectiva que la copa alta en términos de reducción térmica acumulativa. Una simulación específica en el sector 3 del área de estudio evidenció que la implementación de 95 árboles adicionales, dispuestos estratégicamente según estos criterios, generó una reducción significativa de temperatura, que mejoran sustancialmente el confort térmico del espacio público.

En calles, tramos peatonales y andenes, donde la circulación y visibilidad son prioritarias, se recomienda mantener una altura mínima del tronco superior a 2,6 metros con un diámetro de copa inferior a 2,6 metros, mientras que en tramos peatonales la copa puede extenderse hasta 3,19 metros. En contraposición, para plazas, parques y plazoletas, donde existe mayor disponibilidad espacial, se sugiere un diámetro de copa de hasta 8,99 metros, medidas que aprovechan al máximo la capacidad de proyección de sombra sin comprometer la funcionalidad del espacio público.

Tabla 1. Matriz de relaciones por función entre dimensiones por diámetro, área y las distintas secciones urbanas

Diámetro (m)	Compatibilidad de Diámetro de árbol en relación con el espacio urbano							Area-M2
	Calles	T. Peatonal	Andenes	Antejardín	Plazoletas	Plazas	Parques	
1,13	X	X	X	X	X	X	X	1
1,6	X	X	X	X	X	X	X	2
2,26	X	X	X	X	X	X	X	4
3,19	--	X	--	--	X	X	X	8
4,51	--	--	--	--	X	X	X	16
6,38	--	--	--	--	--	X	X	32
8,99	--	--	--	--	--	X	X	64

Optimización de la morfología urbana

El análisis morfológico de las edificaciones reveló que aquellas morfologías de 5 pisos (aproximadamente 15 metros de altura) logran un equilibrio óptimo en la generación de sombra eficiente sobre los espacios urbanos. Esta configuración demostró una superioridad de hasta un 15 % en eficacia de reducción térmica comparada con otras alturas evaluadas. Las estructuras de esta altura generan patrones de sombreado dinámicos que cubren aproximadamente el 64 % de las áreas peatonales adyacentes sin bloquear completamente las corrientes de viento necesarias para la ventilación natural, lo que resulta en una mejora integral del confort térmico urbano.

Se acompaña de una configuración volumétrica optimizada donde el primer piso se mantiene alineado con el paramento, el segundo piso presenta un retroceso de un metro, el tercer piso incorpora un voladizo de 0,5 metros, el cuarto piso vuelve a retroceder un metro, y el quinto piso retoma un voladizo de 0,5 metros. La variación volumétrica estratégica demostró ser hasta un 25 % más eficiente en términos de reducción térmica que las configuraciones tradicionales de edificación.

La incorporación complementaria de elementos arquitectónicos específicos o vegetación integrada en las fachadas potencia estos beneficios y reducen la ineficiencia térmica hasta en un 30 %, lo que equivale a una reducción significativa de temperatura de 3,2°C en el microclima inmediato. Los voladizos y retranqueos estratégicos no solo proyectan sombra, sino que también generan corrientes convectivas que mejoran los flujos de aire a nivel peatonal, y que contribuyen decisivamente al confort térmico global del espacio urbano.

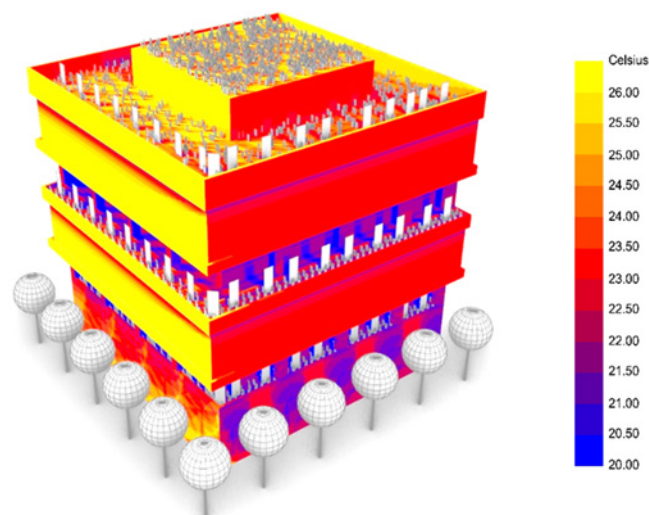


Figura 7. Modelo volumétrico más eficiente en proyección de sombra sobre sí mismo

Materiales con alto albedo y baja inercia térmica

Galvez Salinas⁽⁵⁾ determina una estrecha correlación del tipo de material y sus propiedades físicas. Concluye que la isla de calor urbana es un fenómeno que se produce en las áreas urbanas y suburbanas como consecuencia de la utilización de materiales con una alta capacidad de absorción y retención del calor solar (albedo), muy superiores a las de los materiales naturales o de las áreas rurales menos desarrolladas.

La composición superficial del corredor mostró que el 60,24 % corresponde a superficies impermeables, principalmente asfalto y concreto. Estos materiales, con alta inercia térmica funcionan como eficientes acumuladores de calor diurno y emisores nocturnos, y contribuyen al ciclo térmico desfavorable.⁽⁶⁾

El asfalto, como material principal, almacena aproximadamente seis veces más calor que los suelos permeables naturales. Por ejemplo, esto se hace evidente al comparar el Parque Infantil, con 31,7 % de cobertura arbórea, que mantuvo temperaturas de 21,3°C, frente a los 25°C registrados en el sector de la carrera 28, caracterizado por superficies continuas de concreto y asfalto. La diferencia de 3,7°C en apenas 800 metros lineales confirma el impacto de los materiales en la formación de microclimas diferenciados. Cada incremento del 10 % en superficie impermeable se asocia con un aumento de 0,8°C en la temperatura ambiental.⁽⁷⁾

Tabla 2. Materiales propuestos para la reducción de temperatura en el corredor

Material Propuesto	Inercia Térmica	% Albedo	Reducción Temperatura
Uso sobre espacios urbanos			
Concreto rígido pigmentado con aditivos de aumento de reflectancia	22 000	45	2,5
Asfalto permeable	1200	25	1,5
Adoquines colores claros	2000	35	1,5
Zona verde	400	20	3,5
Adoquín color blancos	2000	45	2
Concreto permeable	1800	35	2
Uso sobre techos de edificaciones			
Concreto con colores claros y reflectante	2200	45	2
Techos verdes	800	25	3
Techo frio (cool roofs)	1000	60	3,5
Teja con aditivo sobre superficie reflectante	1400	45	3
Techos verdes	800	25	3,5
Techos verdes	800	25	3,5
Concretos permeables	1800	35	2
Zona verde	400	20	3,5

La selección estratégica de materiales para espacios urbanos constituye un pilar fundamental en la mitigación efectiva de islas de calor. Las áreas verdes con pasto de mediana altura demostraron excelentes propiedades térmicas, ofreciendo alta evapotranspiración, baja inercia térmica (valor de 400) y albedo moderado (20 %), con esto se logra una reducción de temperatura de 3,5°C. Los

adoquines de colores claros, con una inercia térmica media (2000) y albedo de 35 % consiguen una reducción térmica de 1,5°C.⁽⁸⁾ El concreto permeable, caracterizado por una inercia térmica de 1800 y albedo de 35 % reduce la temperatura ambiental en 2°C. El concreto rígido pigmentado con aditivos específicos para aumentar la reflectancia mostró la mayor reducción térmica entre los pavimentos analizados (2,5°C), y que se destaca como una alternativa eficiente para áreas de alto tránsito.⁽⁹⁾

Para las cubiertas de edificaciones, donde la exposición solar es máxima, los techos fríos (coolroofs) con inercia térmica relativamente baja (000) y albedo excepcionalmente alto (60 %) logran una significativa reducción de 3,5°C. Los techos verdes, caracterizados por una inercia térmica baja (800) y albedo moderado (25 %), reducen la temperatura en 3°C y aportan beneficios ecosistémicos como retención de agua pluvial y mejora de la biodiversidad urbana. La sustitución estratégica de materiales convencionales en cubiertas logró reducciones térmicas de hasta 3,5°C, particularmente notables en áreas ubicadas fuera del PEMP (Plan Especial de Manejo y Protección), donde las restricciones patrimoniales son menos estrictas y permiten intervenciones más profundas.

La transición hacia materiales con menor capacidad de absorción térmica y mayor permeabilidad en las cubiertas edificatorias resultó en una reducción importante de la temperatura acumulada, especialmente notable en sectores con alta exposición solar. En las áreas públicas, las medidas propuestas estuvieron orientadas en adoquines hexagonales con césped en plazas y pavimentos permeables en calles, mientras que los andenes incorporaron adoquines altamente reflectantes complementados con arborización estratégica, que forman un sistema integrado de mitigación térmica que optimiza el comportamiento térmico del conjunto urbano.

La propuesta coordinada e integral de estas estrategias de mitigación pasivas logró reducir la temperatura promedio de 22,78°C a 20,02°C a lo largo de la conexión norte-sur que representan una disminución general de 2,76°C. La reducción se logró mediante la combinación estratégica de aproximadamente 1533 árboles ubicados según criterios de máxima eficiencia térmica y la implementación generalizada de materiales caracterizados por alto albedo y baja inercia térmica en pavimentos y cubiertas edificatorias.

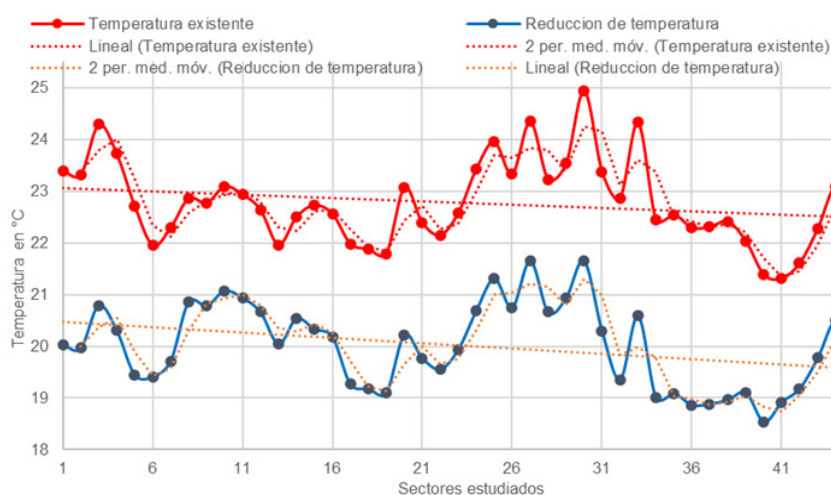


Figura 8. Relación de temperatura medida en campo, y reducción a través de estrategias de mitigación pasiva

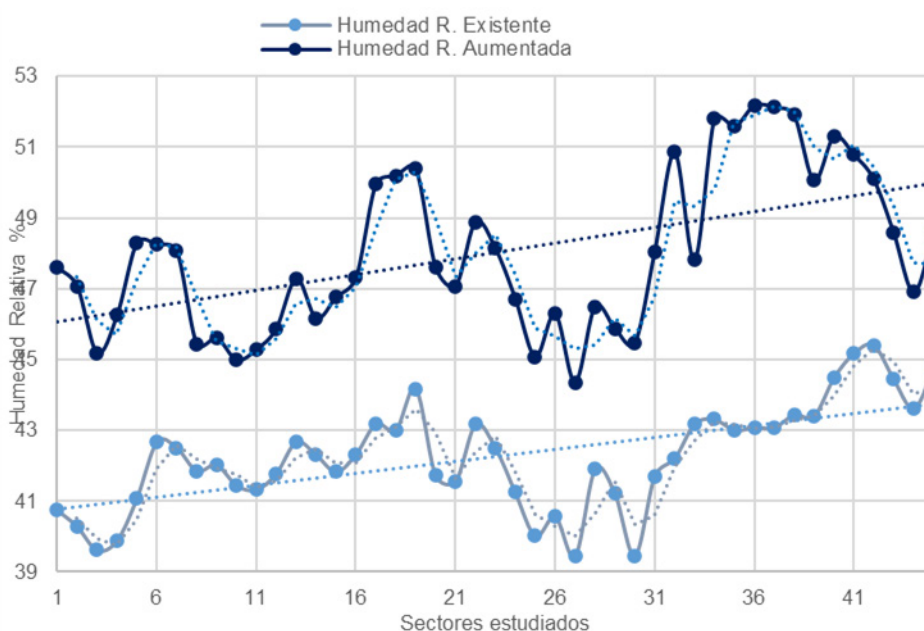


Figura 9. Relación de humedad relativa medida en campo, y aumento a través de estrategias de mitigación pasiva

Las estrategias de mitigación pasiva respetan íntegramente la estructura y funcionalidad urbana preexistente, al conservar las dimensiones originales de espacios públicos, andenes y calles, lo que facilita su implementación sin afectar la movilidad o los usos consolidados. La arborización estratégica no solo proyecta sombra efectiva sobre las superficies más expuestas, sino que también favorece la biodiversidad urbana, mejora la calidad del aire mediante la captación de partículas contaminantes, y genera espacios de estancia más atractivos que fomentan la interacción social y el uso activo del espacio público.

Las intervenciones basadas en principios bioclimáticos para el confort térmico urbano, combinados con la selección científicamente fundamentada de materiales urbanos, pueden generar impactos positivos medibles en el microclima sin comprometer la funcionalidad esencial de los espacios urbanos existentes, y establece un precedente para la planificación urbana sostenible. En cuanto a la temperatura, la propuesta genera una reducción térmica promedio de 3 °C respecto a las condiciones actuales, lo cual demuestra su efectividad para mitigar el efecto de calor en los sectores evaluados. La temperatura con la propuesta de reducción se mantiene entre 18,5 °C y 21,5 °C, con una media cercana a 20 °C.

Se observó además un fenómeno complementario de gran relevancia para el confort térmico urbano: el aumento promedio del 5,75 % en la humedad relativa (al incrementarse de 42,27 % a 48,01 %), consecuencia directa de la mayor evapotranspiración generada por la vegetación introducida y los materiales permeables implementados. Esta elevación de la humedad relativa contribuye significativamente al confort térmico percibido, ya que actúa como regulador natural de la sensación térmica en espacios urbanos abiertos.

CONCLUSIONES

El fenómeno de islas de calor urbanas (ICU) en el corredor norte-sur de la ciudad de Pasto presenta diferencias térmicas con contrastes de hasta 3,9 °C entre zonas urbanas y rurales, y variaciones internas de hasta 3,7 °C en distancias inferiores a 800 metros. Está marcada heterogeneidad térmica pone en evidencia la incidencia determinante de la morfología urbana y la composición superficial -como el tipo de cobertura, la densidad edificatoria y la presencia de vegetación- sobre el comportamiento térmico del espacio construido.

En respuesta a esta problemática, se propuso una intervención basada en estrategias pasivas de mitigación climática, las cuales demuestran un impacto significativo en la reducción de la temperatura media y el aumento de la humedad relativa, sin comprometer la funcionalidad urbana. La combinación de arborización estratégica (25 % de densidad arbórea), edificaciones de cinco pisos con volumetría escalonada, y el uso de materiales de alto albedo y baja inercia térmica, permitió reducir en un 74 % el área urbana expuesta a condiciones de desconfort térmico.

Desde el punto de vista microclimático, los datos muestran una reducción promedio de temperatura cercana a los 3 °C en los sectores intervenidos, respecto a los valores existentes antes de la propuesta. Este descenso térmico se acompaña de un aumento de la humedad relativa, cuya correlación inversa con la temperatura confirma la efectividad de las estrategias que priorizan el enfriamiento evaporativo y la retención de humedad ambiental. Los resultados son relevantes en contextos de altura como el de Pasto, donde las condiciones ecuatoriales potencian la sensibilidad térmica del entorno construido.

En conjunto, la aplicación de soluciones pasivas integradas no solo mitiga el fenómeno de las ICU, también mejora el confort térmico y la habitabilidad urbana, y aporta herramientas validadas para la planificación urbana sostenible frente a los desafíos del cambio climático.

FINANCIACIÓN

Los autores no recibieron financiación para el desarrollo de la presente investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Eduard Fernando León Getial.

Curación de datos: Eduard Fernando León Getial.

Análisis formal: Eduard Fernando León Getial.

Redacción – borrador original: Eduard Fernando León Getial.

Redacción – revisión y edición: Eduard Fernando León Getial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Escobar Insuasti TP. Modelo de intervención para mitigar islas de calor urbanas en la conexión oriente-occidente de san Juan de Pasto, cra.27, cra.24, Cujacal, Mijitayo. Universidad Cesmag; 2020.
2. Godínez Tovar AG, López Gutiérrez M. Dinámica de la isla de calor urbana y su efecto en la distribución espacio-temporal de la lluvia en las ciudades de Querétaro y San Juan del Río. 2018.
3. Guzmán MHF, Ochoa JM. Confort térmico en los espacios públicos urbanos. Clima cálido y frío semi-seco. Rev Hábitat Sustentable. 2014;4(2):52-63.

4. Zuluaga Gómez SC, Londoño Arango F, Parra Correa E, Arango Díaz L, Salazar Trujillo JH. El impacto de la arborización como estrategia de mitigación de la isla de calor urbana en el Caribe colombiano. *Rev Científ Architect Urban*. 2023;44(2):34-41. <https://rau.cujae.edu.cu/index.php/revistaau/article/view/778>
5. Gálvez Salinas JA. Criterios para la planificación y diseño de los corredores fluviales urbanos para la mitigación de la isla de calor. Universidad de Granada; 2014.
6. Hoyos Gómez LS. Forecasting global solar radiation in Nariño. Universidad Nacional de Colombia; 2021. P. 65-66.
7. Maldonado LM. Mitigación y adaptación al efecto de isla de calor urbana de clima cálido seco. El caso de Hermosillo, Sonora. *Viv Comunid Sustent*. 2022;11:85-110.
8. Navarro Muriel KA. La concepción de hábitat, una ciudad proyectada desde la biodiversidad. Universidad Cesmag; 2020. P. 23-24.
9. Salinas JAGC. Criterios para la planificación y diseño de los corredores fluviales urbanos para la mitigación de la isla de calor.