

Confort térmico y caminabilidad: ¿cómo la vegetación urbana propicia la movilidad activa en ciudades tropicales? Estudio de caso Medellín (Colombia)

*Thermal Comfort and Walkability: How does Urban
Vegetation promote Active Mobility in Tropical
Cities? A case study of Medellín (Colombia)*

*Conforto térmico e caminhabilidade: de que maneira a vegetação
urbana contribui para a promoção da mobilidade ativa em
cidades tropicais? Estudo de caso Medellín (Colômbia)*

Luis Sebastián Bravo Chacón*
Julieth Natalia Castaño Hincapié**
Andrés Camilo Patiño González***
María Fernanda Cárdenas Agudelo****

Recibido: 17 de febrero de 2025

Aprobado: 22 de julio de 2025

<https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.15288>

Para citar este artículo

Bravo Chacón, L. S., Castaño Hincapié, J. N., Patiño González, A. C., & Cárdenas Agudelo, M. F. (2026). Confort térmico y caminabilidad: ¿cómo la vegetación urbana propicia la movilidad activa en ciudades tropicales? Estudio de caso Medellín (Colombia). *Territorios*, (54 Especial), 1-26. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.15288>

* Ingeniero Forestal,
Universidad Nacional de
Colombia, sede Medellín.
Correo electrónico: lsbravoc@unal.edu.co ORCID:
<https://orcid.org/0000-0002-2869-365X>

** Ingeniera Forestal,
Universidad Nacional
de Colombia, sede Medellín. Correo electrónico:
jncastanob@unal.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2743-1796>

*** Arquitecto, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Correo electrónico: acpatinog@unal.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9592-5796>

⇒

Palabras clave

Arbolado urbano; servicios ecosistémicos; espacios verdes urbanos; confort térmico; isla de calor; pavimento urbano.

Keywords

Urban tree canopy; ecosystem services; urban green infrastructure; thermal comfort; urban heat island effect; impervious surfaces.

Palavras-chave

Arborização urbana; serviços ecossistêmicos; infraestrutura verde urbana; conforto térmico; efeito de ilha de calor urbana; superfícies impermeáveis.

RESUMEN

En el contexto del cambio climático, las ciudades deben adaptar su movilidad para ser más resilientes, promoviendo transportes sostenibles como la caminabilidad. En ciudades tropicales, su clima cálido y la alta incidencia de la radiación solar, el tráfico y fenómenos como las islas de calor urbano, entre otros, afectan el confort del peatón. Este estudio evalúa la influencia de la arborización urbana en la temperatura a lo largo de tres rutas que se enlazan al sistema integrado de transporte del Valle de Aburrá: Hospital, Robledo y Poblado, midiendo la temperatura del aire y del suelo en tres momentos del día (9 a. m., 12 m. y 3 p. m.). Se observó que la densidad y distribución de los árboles influyen en la reducción de la temperatura, especialmente en áreas con mayor sombra. La temperatura del aire disminuye entre 0,45 °C y 1,54 °C, mientras que la temperatura del suelo se reduce entre 3,1 °C y 7,6 °C. Los peatones prefieren rutas con más sombra, destacando la importancia de los espacios verdes urbanos para promover formas de movilidad sostenible.

ABSTRACT

In the context of climate change, cities must adapt their mobility to become more resilient by promoting sustainable transport options such as walkability. In tropical cities, with warm climate, high incidence of solar radiation, traffic, and phenomena like heat islands, among other variables, affect pedestrian comfort. This study evaluates the influence of urban trees on temperature along three routes connected to the Integrated Transport System of the Aburrá Valley: Hospital, Robledo, and Poblado; measuring air and ground temperatures at three different times of the day (9 a. m., 12 m. y 3 p. m.). It was observed that tree density and distribution influence temperature reduction, especially in areas with more shade. Air temperature decreases between 0,45 °C and 1,54 °C, while ground temperature decreases between 3,1 °C and 7,6 °C. Pedestrians prefer routes with greater shade coverage, highlighting the importance of green spaces to promote sustainable modes of mobility.

RESUMO

No contexto das mudanças climáticas, as cidades precisam adaptar sua mobilidade para se tornarem mais resilientes, promovendo opções de transporte sustentáveis, como a caminhabilidade. Em cidades tropicais, o clima quente e a alta incidência de radiação solar, o tráfego e fenômenos como as ilhas de calor urbanas, entre outros, afetam o conforto dos pedestres. Este estudo avalia a influência da cobertura arbórea urbana na temperatura ao longo de três rotas que se conectam ao sistema integrado de transporte do Vale do Aburrá: Hospital, Robledo e Poblado, medindo a temperatura do ar e do solo em três horários do dia (9h, 12h e 15h). Observou-se que a densidade e a distribuição das árvores influenciam a redução da temperatura, principalmente em áreas com maior sombreamento. A temperatura do ar diminui entre 0,45 °C e 1,54 °C, enquanto a temperatura do solo é reduzida entre 3,1 °C e 7,6 °C. Os pedestres preferem rotas com mais sombra, destacando a importância dos espaços verdes urbanos na promoção da mobilidade sustentável.

Introducción

La planificación de las ciudades contemporáneas en su diseño y construcción continua se enfrenta a la necesidad de desarrollar acciones y estrategias que permitan minimizar las afectaciones causadas por la crisis climática (ONU, 2018) y la degradación del ambiente provocada por el aumento de la temperatura global, entre otras causas. Estas medidas buscan mitigar los efectos directos sobre los servicios que proveen las ciudades y, en consecuencia, el bienestar de los habitantes (Marín *et al.*, 2021). Sin embargo, la proyección actual de las ciudades sigue enfocada en grandes infraestructuras que promueven la industrialización y paradigmas de consumo constante, lo cual se traduce en una movilidad centrada en vehículos privados que dependen de combustibles fósiles (Speck, 2012; Gehl, 2010; Mesa, 2020).

La movilidad dentro de las ciudades tiene un impacto significativo en su desarrollo sostenible (ONU, 2018). El uso de vehículos de combustibles fósiles, ligado a las dinámicas urbanas, está directamente relacionado con la crisis climática debido a la emisión de gases de efecto invernadero. Estos gases son catalizadores en la disminución de la calidad del aire y el aumento de la temperatura, entre otros efectos indirectos que afectan la salud (Jiménez, 2021).

En ese sentido, en los últimos años se han presentado con mayor frecuencia



**** Profesora asociada, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Correo electrónico: mfcarden@unal.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1804-6280>

problemas ambientales relacionados con una mala calidad del aire debido a material contaminante, problemas de movilidad por el alto flujo vehicular de la ciudad y altos niveles de ruido, entre otras causalidades que generan afectación y costos en materia ambiental y de salud pública (Santa & Henao, 2019; Rojas *et al.*, 2019).

En ese orden de ideas, es necesario buscar alternativas para mejorar la movilidad de las ciudades, enfocándose en garantizar los desplazamientos de las personas, el acceso al espacio urbano y, por lo tanto, la posibilidad de disfrutar de espacios públicos de calidad, seguros, inclusivos y accesibles (ONU, 2016). De esta forma, se minimiza el uso de combustibles fósiles, los problemas ambientales asociados y se brindan oportunidades para el encuentro y la recreación.

La ciudad de Medellín se planifica hacia un modelo de ciudad resiliente y sostenible, como se menciona en el Plan de Acción Climática (2020). Sin embargo, enfrenta retos significativos con respecto a la movilidad, puesto que la singularidad del valle donde está situada, sumado a una planificación más orientada a modelos institucionales que al contexto de los ciudadanos, hace necesario entender qué características fomentan y generan la oportunidad de movilizarse de manera alternativa. Borja y Muxí (2001) y Gehl (2010) afirman que las ciudades deben ser más humanas y garantizar la movilidad, la accesibilidad y la diversidad, recalcando

la importancia de los espacios públicos como centros de encuentro, interacción y desarrollo humano, así como la construcción del tejido social.

Alternativas de transporte no motorizados o de movilidad activa, como la bicicleta, patineta o caminar, han sido consideradas como soluciones a los medios de transporte tradicionales (Bezerra & Tapia, 2004; Mesa, 2020) debido a que pueden ser una opción clave para afrontar los retos ambientales, sociales y estructurales que enfrentan las ciudades, gracias a los beneficios significativos en salud pública y medioambiental que ofrecen. El concepto de caminabilidad, específicamente, se refiere a una medida de la efectividad del diseño comunitario en la promoción de caminar como alternativa a conducir automóviles para llegar a tiendas, escuelas y otros destinos comunes (Rattan *et al.*, 2012).

Sin embargo, la definición puede variar según el contexto, la perspectiva y la disciplina que la busque definir. Particularmente, la caminabilidad puede mejorar la salud pública al aumentar la actividad física; la sostenibilidad ambiental y energética al consumir menos combustible y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero; la seguridad al haber más personas en las calles; y la economía al estimular el comercio y el consumo (Bezerra & Tapia, 2004, p. 94). También hace referencia al potencial para caminar, derivado de la presencia o ausencia de

ciertos factores en el entorno circundante, y se puede llegar a traducir como el atractivo de una ciudad, según lo definen Dörrzapf *et al.* (2019), y, así mismo, se puede pensar en cómo el entorno físico, con sus características percibidas, puede generar atracción y emoción en los diferentes usuarios.

En este sentido, la demanda de espacios verdes urbanos (EVU) en las ciudades, como impulsores de servicios ecosistémicos (SE) y del fomento de la recreación activa (caminar, trotar, practicar deportes, andar en bicicleta), hace de estas áreas puntos focales para la satisfacción de las necesidades de los diversos residentes que habitan las urbes, por lo tanto, su provisión debe ser segura, estar bien mantenidos, diseñados y construidos (Boulton *et al.*, 2018).

Además, requiere soluciones que permitan superar los posibles problemas de justicia ambiental, en las que los planificadores, formuladores de políticas y administradores urbanos puedan mejorar la sostenibilidad urbana cultivando la naturaleza accesible en todos los paisajes urbanos, particularmente en vecindarios desatendidos, y, al mismo tiempo, minimizar la gentrificación verde (Talal & Gruntman, 2023, p. 6), de manera que la provisión de EVU sea equitativa (distancia a los residentes, calidad de los espacios, instalaciones y servicios) (Boulton *et al.*, 2018, p. 83).

Servicios ecosistémicos, vegetación arbórea y pavimentos urbanos

Servicios ecosistémicos

Los SE son las características, funciones o procesos ecológicos que directa o indirectamente contribuyen al bienestar, es decir, los beneficios que las personas obtienen del funcionamiento de los ecosistemas (Costanza *et al.*, 2017, p. 3), que van desde los que prestan los jardines comunitarios, árboles individuales, así como también los grandes remanentes de la naturaleza como ríos y humedales (Hase, 2019).

Estos se clasifican en cuatro tipos: servicios de provisión, que se combinan con capital construido, humano y social para producir alimentos, madera, fibra u otros beneficios; servicios de regulación, que junto con los otros tipos de SE aportan al control de inundaciones, protección contra tormentas y regulación del agua, así como el mantenimiento de la calidad del aire, la polinización, control de plagas y del clima; servicios culturales, se combinan con el capital construido, humano y social para producir recreación, identidad estética, cultural, sentido de lugar, producción de conocimiento, entre otros; y servicios de soporte, que describen los procesos básicos del ecosistema, como la formación del suelo, la productividad primaria, la biogeoquímica, el ciclo de

nutrientes y el suministro de hábitat (Costanza *et al.*, 2017, p. 5).

La gestión integral de la biodiversidad urbana corresponde al proceso por el cual se planifican, ejecutan y monitorean acciones a escala urbana encaminadas a la conservación de la biodiversidad y los SE en las ciudades, de manera que contribuyan a la protección del medio ambiente urbano y mejoren la calidad de vida de todos sus habitantes. Su aplicación implica abordar conjuntamente acciones encaminadas a su conocimiento, preservación, restauración y uso sostenible (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Instituto de Investigación Alexander von Humboldt, 2017).

De acuerdo con Elmqvist *et al.* (2015), la inversión en EVU en las ciudades y la restauración y rehabilitación ecológica de ecosistemas en áreas urbanas pueden no solo ser sostenibles y socialmente deseables, sino también, muy a menudo, económicamente ventajosas. Dichas inversiones generan simultáneamente muchos otros servicios que mejoran el bienestar humano y tienen un papel crucial en el aumento de la capacidad de adaptación para hacer frente al cambio climático.

De igual importancia es el análisis de los SE para su posterior imitación (Zari, 2015), lo que da lugar a lo que Cole (2012) denomina “diseño urbano regenerativo” (“urban regenerative design”), con el cual se busca abordar la degradación

continua de los ecosistemas mediante el desarrollo del entorno construido para restaurar la capacidad de los ecosistemas de funcionar con una salud óptima para el beneficio mutuo de las vidas humanas y no humanas. Un enfoque basado en sistemas es crucial para el diseño regenerativo, ya que, en lugar de concebirse como objetos independientes, los edificios se consideran nodos de un sistema, de la misma manera que los organismos forman parte de un ecosistema.

La intención es que pueda permitir que se produzcan interacciones complejas y mutuamente beneficiosas entre el entorno construido, el mundo vivo y los habitantes humanos (Zari, 2015), en las que los EVU funcionen como un elemento estratégico para promover la salud de los residentes y la equidad social en áreas complejas y desfavorecidas. De hecho, en varios países desarrollados, la provisión de EVU es un proyecto de apoyo público estratégico en el proceso de regeneración urbana (Lee *et al.*, 2017, p. 870).

El arbolado urbano y la temperatura

Las ciudades modernas enfrentan grandes retos en el contexto del cambio climático. Estos desafíos ambientales pueden tener un impacto negativo en la salud y el bienestar humano, y su mitigación puede resultar costosa (ONU, 2018). Uno de los fenómenos que se presenta con mayor

frecuencia en las ciudades son las islas de calor (ICU). Este fenómeno conlleva una mayor exposición al estrés por las altas temperaturas y posibles golpes de calor, así como un aumento en el uso de energía para la refrigeración de los edificios (Morales *et al.*, 2007).

El conocimiento del efecto de la sombra de los árboles en el intercambio de calor (radiación) de las superficies urbanas es fundamental a fin de comprender la eficacia de los bosques dentro de la ciudad para la reducción de la temperatura y la mitigación de las ICU. Los árboles urbanos y los bosques en su conjunto pueden ser gestionados estratégicamente para influir en los ciclos del agua, la temperatura, el carbono y la contaminación (Livesley *et al.*, 2016).

A pesar de esto, es importante reconocer que los árboles urbanos no serán valorados por los mismos SE en todas las ciudades y pueblos, ya que cada localidad presenta su propio contexto topográfico, climático, cultural e industrial. Sin embargo, la planificación y gestión adecuada de los EVU pueden mejorar el funcionamiento de los ecosistemas urbanos en todos los climas, circunstancias socioculturales y ubicaciones geográficas (McPherson *et al.*, 2011).

Al optimizar la gestión de los bosques urbanos, podemos aprovechar SE como la conservación de energía, el almacenamiento de carbono, la reducción del

escurrimiento de aguas pluviales, la mejora de la calidad del aire y el aumento de la salud y el bienestar humano (McPherson, 2003).

Pisos o pavimentos urbanos

Materiales del pavimento urbano e inercia térmica

La inercia térmica (IT) se define como la capacidad de un material para almacenar y liberar energía térmica de manera gradual (Vega, 2020, p. 16). En el ámbito de la construcción, se busca lograr el confort térmico en el interior de las edificaciones (espacio habitado). Los materiales de construcción derivados de rocas naturales (pétreos) como el granito y los materiales artificiales aglomerados como la mezcla de concreto y los cerámicos vitrificados tienen composiciones que ofrecen una alta eficiencia térmica al minimizar la transferencia de calor desde el exterior hacia el interior de la edificación (Vera, 2021); sin embargo, su capacidad para almacenar el calor en las caras expuestas al sol para luego liberarlo gradualmente hace que esas superficies mantengan temperaturas elevadas durante largos períodos. Este fenómeno también se presenta en pavimentos urbanos, en especial asfálticos (derivados del petróleo), que debido a su composición acumulan calor superficialmente y lo liberan lentamente.

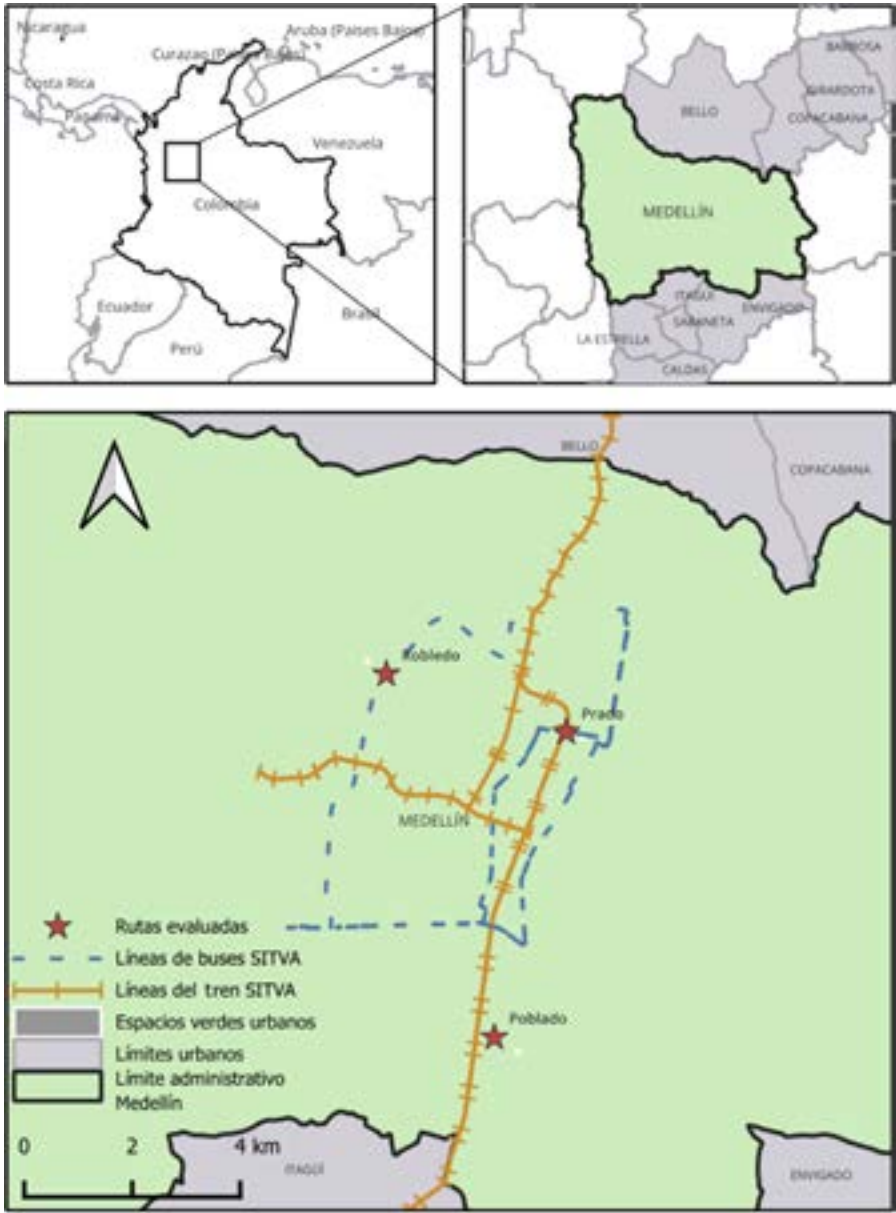
Esta característica de los materiales con alta IT puede resultar contraproducente para las superficies exteriores como los pavimentos o suelos urbanos, principalmente en zonas de tránsito peatonal. En resumen, el uso de materiales con altas densidades y alta IT resulta en temperaturas superficiales elevadas que persisten por largos períodos, lo que afecta negativamente el confort térmico en espacios exteriores, sobre todo en climas cálidos (Austin, 2022). En contraste, los materiales con menor IT, como aquellos con composiciones porosas, pueden ofrecer un mejor rendimiento térmico en exteriores al liberar el calor más rápidamente.

Materiales y métodos

Área de estudio

Este estudio se llevó a cabo en Medellín (Colombia). Esta ciudad está ubicada en la zona tropical, lo que le otorga un clima isotérmico: su temperatura promedio anual de 22,1 °C no presenta variaciones significativas a lo largo del año, con mínimas de 17,2 °C y máximas de 27,8 °C. Cuenta además con un régimen de precipitación bimodal, con dos períodos lluviosos y otros dos con menor precipitación (Moreno & Hoyos, 2015). Las especies arbóreas características de la ciudad son latifoliadas perennifolias o siempre verdes y algunas caducifolias en algunos períodos del año (figura 1).

Figura 1. Mapa de localización de las rutas de estudio en el municipio de Medellín (Antioquia)



Fuente: elaboración de los autores.

Esta investigación tiene como objetivo evaluar las condiciones térmicas a las que se exponen los peatones al caminar por algunas de las rutas que conectan estaciones o paradas del Sistema Integrado de Transporte del Valle de Aburrá (SITVA) con un espacio público (EP) del sector (figuras 2, 3 y 4, respectivamente). Las rutas se seleccionaron teniendo en cuenta la topografía de la ciudad, en la cual el grado de inclinación es un factor determinante en la elección de caminar, escogiendo distintos niveles de pendiente ubicados en el centro (Hospital), la ladera suroriental (Poblado) y la ladera noroccidental (Robledo), del 10 %, 15 % y 30 %, respectivamente, y con distancias entre 300 y 500 m.

Relación del arbolado y la temperatura

Medición temperatura del aire

Se utilizó el instrumento Multi-Function Environment Meter modelo DT 8820 para medir la temperatura en grados Celsius (°C). Durante este ejercicio se tomaron datos en cada una de las rutas a una altura de 1,5 metros del piso, cada 6 m. La toma de datos se realizó en tres jornadas: mañana (9 a. m.), mediodía (12 m.) y tarde (3 p. m.), en días distintos.

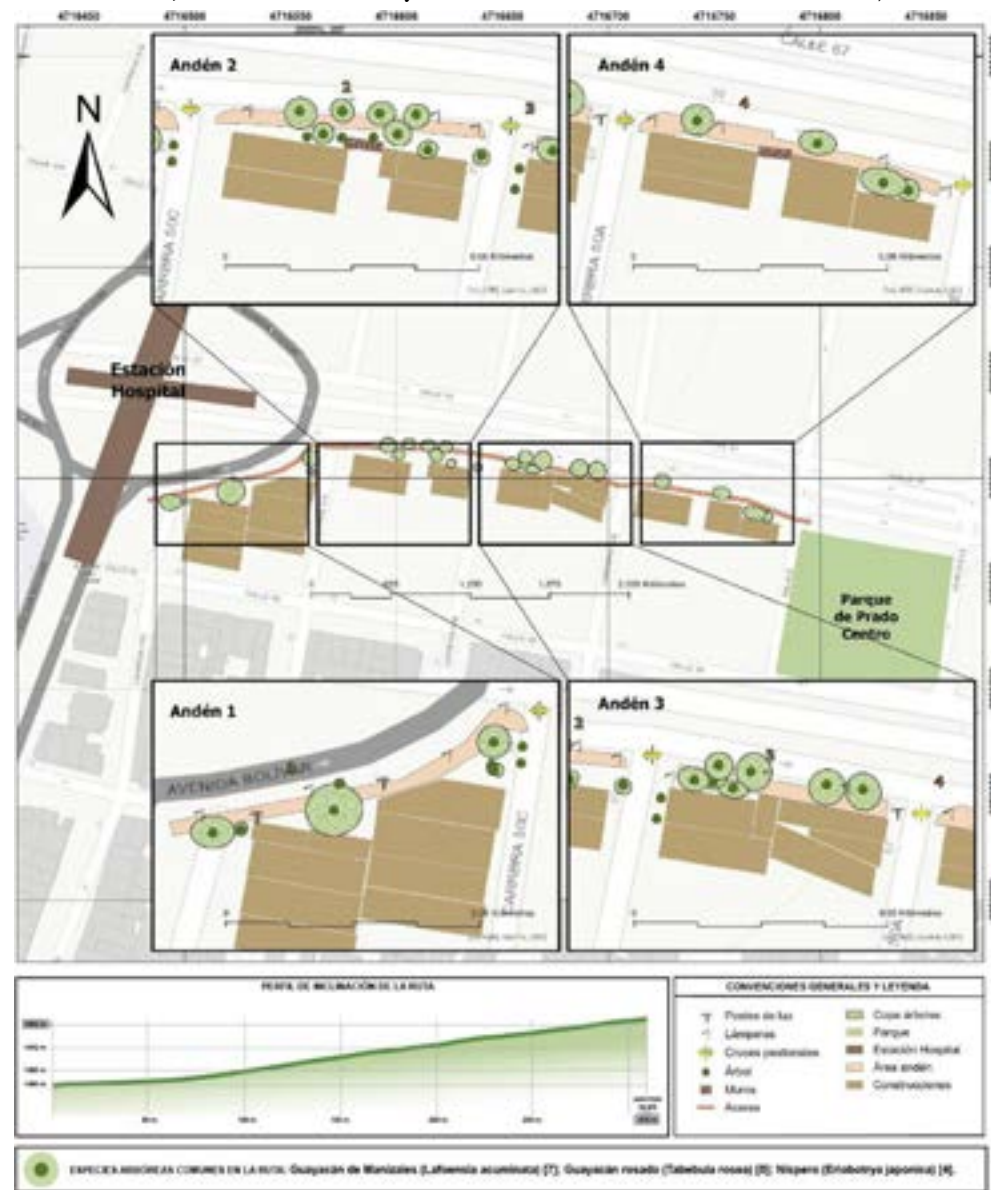
Perfiles de sombra (índice de permeabilidad del follaje)

Se evaluó el efecto de la sombra de los árboles en los trayectos. Para ello se calculó el índice de permeabilidad del follaje (IPF) a la radiación solar usando un método fotogramétrico, una técnica fotográfica que permite calcular la proporción de rayos del sol que llegan al suelo, aplicado en estudios como el de Kurbán *et al.* (2006).

La técnica consiste en fotografiar la parte aérea de los andenes a la altura de la cabeza del investigador (1,7 metros de altura), tomando fotos a lo largo del trayecto, usando una cámara a una distancia de 6 metros entre fotos. Posteriormente, a través del *software* Photoshop, se obtiene el número de píxeles iluminados de cada imagen en relación con el total de los píxeles.

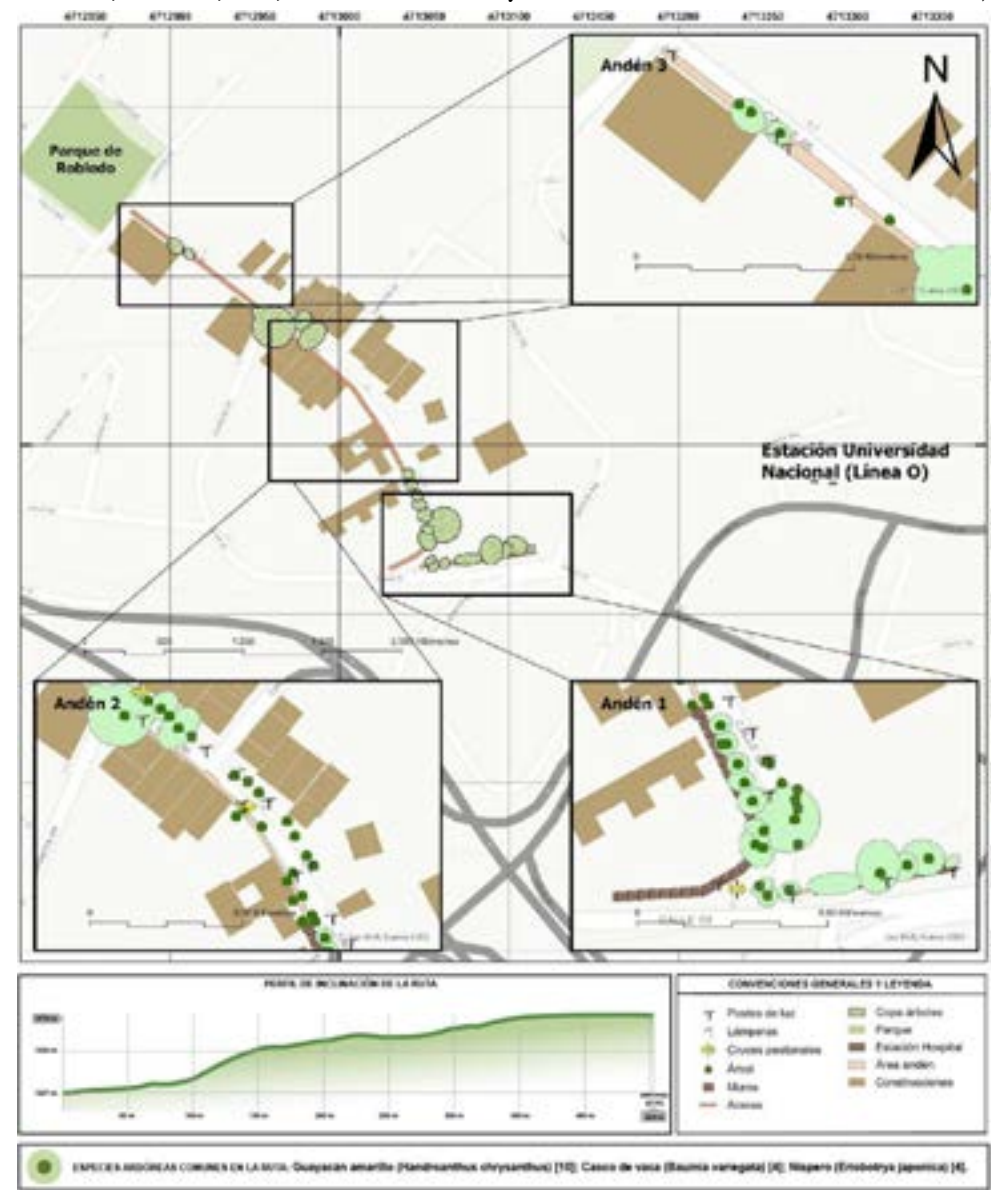
Más allá de obtener la radiación que llega al suelo, lo que se realiza con la ayuda del *software* Excel es un análisis de los datos para saber el nivel de sombra proyectada, y en qué parte es más sombreado o se da en menor medida a lo largo del trayecto analizado, lo cual permite generar un perfil de sombras o IPF en el recorrido (figura 5). Entendiendo que el confort para caminar, en una ciudad como Medellín, de clima cálido y sol fuerte, está directamente relacionado con la presencia de sombra; finalmente, se hace un gráfico de confort, calculado como IPF, en el que se refleja mejor la información.

Figura 2. Mapa detallado de la ruta que conecta la estación Hospital (E) del SITVA con el parque de Prado (EP) (incluye levantamiento de los árboles, andenes, vías, mobiliario urbano y elementos de señalización e iluminación)



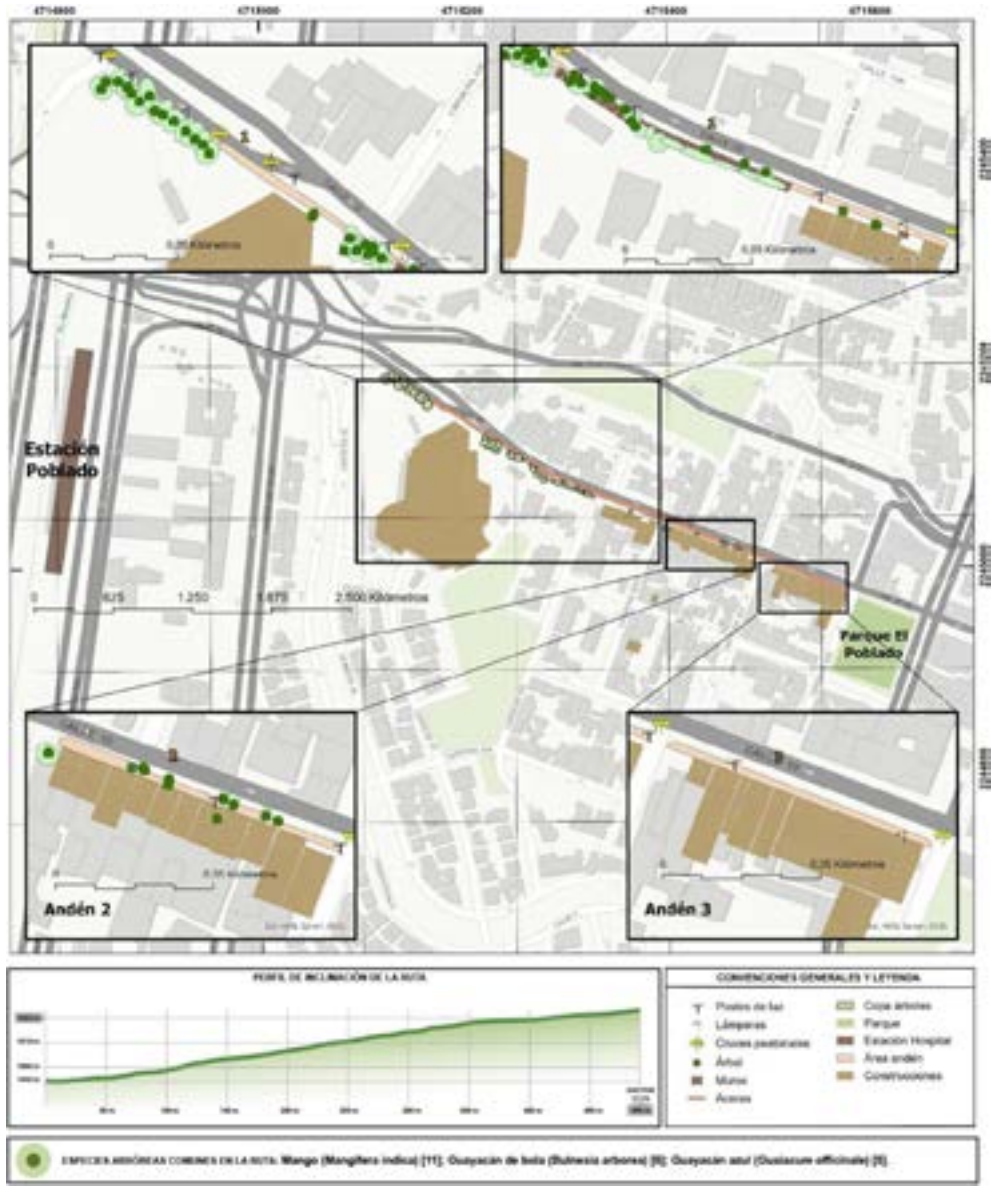
Fuente: elaboración de los autores.

Figura 3. Mapa detallado de la ruta que conecta la estación Universidad Nacional Línea O (E) del SITVA con el parque de Robledo (EP) (incluye levantamiento de los árboles, andenes, vías, mobiliario urbano y elementos de señalización e iluminación)



Fuente: elaboración de los autores.

Figura 4. Mapa detallado de la ruta que conecta la estación Poblado (E) del SITVA con el parque del Poblado (EP) (incluye levantamiento de los árboles, andenes, vías, mobiliario urbano y elementos de señalización e iluminación)



Fuente: elaboración de los autores.

LUIS S. BRAVO, JULIETH N. CASTAÑO, ANDRÉS C. PATIÑO, MARÍA F. CÁRDENAS

Figura 5. Ecuación perfil de sombras o de permeabilidad del follaje (IPF)
$$\frac{\# \text{ píxeles histograma (blancos)}}{\# \text{ píxeles totales histograma}} \times 100 = IPF$$

Fuente: Kurbán *et al.* (2006).

Medición de temperatura de pavimentos urbanos

Durante el recorrido por las rutas de estudio se encontraron comúnmente materiales de piso en concreto como adoquines en las rutas Hospital y Poblado, concreto vaciado y escobillado in situ y pavimentos flexibles en la ruta Robledo (figura 6).

El alcance del estudio no incluye toma de muestras de material para análisis de componentes, espesores, ni áreas, sin

embargo, a través de la bibliografía se puede inferir la composición que tienen comúnmente estos materiales e identificar su características y espesores de aplicación para concluir un comportamiento normal frente a la radiación solar incidente.

Confort térmico

Se evaluaron las tres rutas midiendo valores de temperatura y permeabilidad del follaje, cada 6 metros. Se registraron en Prado 49, en Poblado 83 y en Robledo 61 puntos. En los transectos, además, se midió la temperatura del pavimento urbano para contrastar la incidencia de distintos materiales en el confort térmico (CT).

Figura 6. Materiales de pavimentos urbanos comúnmente encontrados en las tres rutas



Fuente: elaboración de los autores.

CONFORT TÉRMICO Y CAMINABILIDAD

Resultados

Relación del arbolado y la temperatura

La sensación térmica en las rutas está estrechamente relacionada con la presencia del arbolado urbano, ya que la sombra proyectada por los árboles y los procesos de evapotranspiración contribuyen a regular la temperatura percibida.

Temperatura del aire y temperatura del pavimento urbano

Los datos de temperatura obtenidos en las rutas permiten observar variaciones importantes según el momento del día (figura 7). En las rutas se encontró que la temperatura en la ruta Poblado varía considerablemente, con un incremento gradual tanto en el piso como en el aire. En la mañana (9 a. m.), la temperatura del piso ($T^{\circ}1$) registra un promedio de $34,34^{\circ}\text{C}$, con una desviación estándar de 401°C , mientras que la temperatura del aire ($T^{\circ}2$) son más bajas, con $31,25^{\circ}\text{C}$ (desviación de $1,62^{\circ}\text{C}$). Al mediodía (12 m.), el aumento de temperatura es más pronunciado en el piso, donde alcanza un promedio de $35,64^{\circ}\text{C}$ y una desviación de $5,11^{\circ}\text{C}$. La temperatura del aire también sube, con $T^{\circ}2$, registrando $31,71^{\circ}\text{C}$, con desviaciones que rondan los 2°C .

Por la tarde (3 p. m.), el calor del piso continúa aumentando, alcanzando un promedio de $36,73^{\circ}\text{C}$, con una

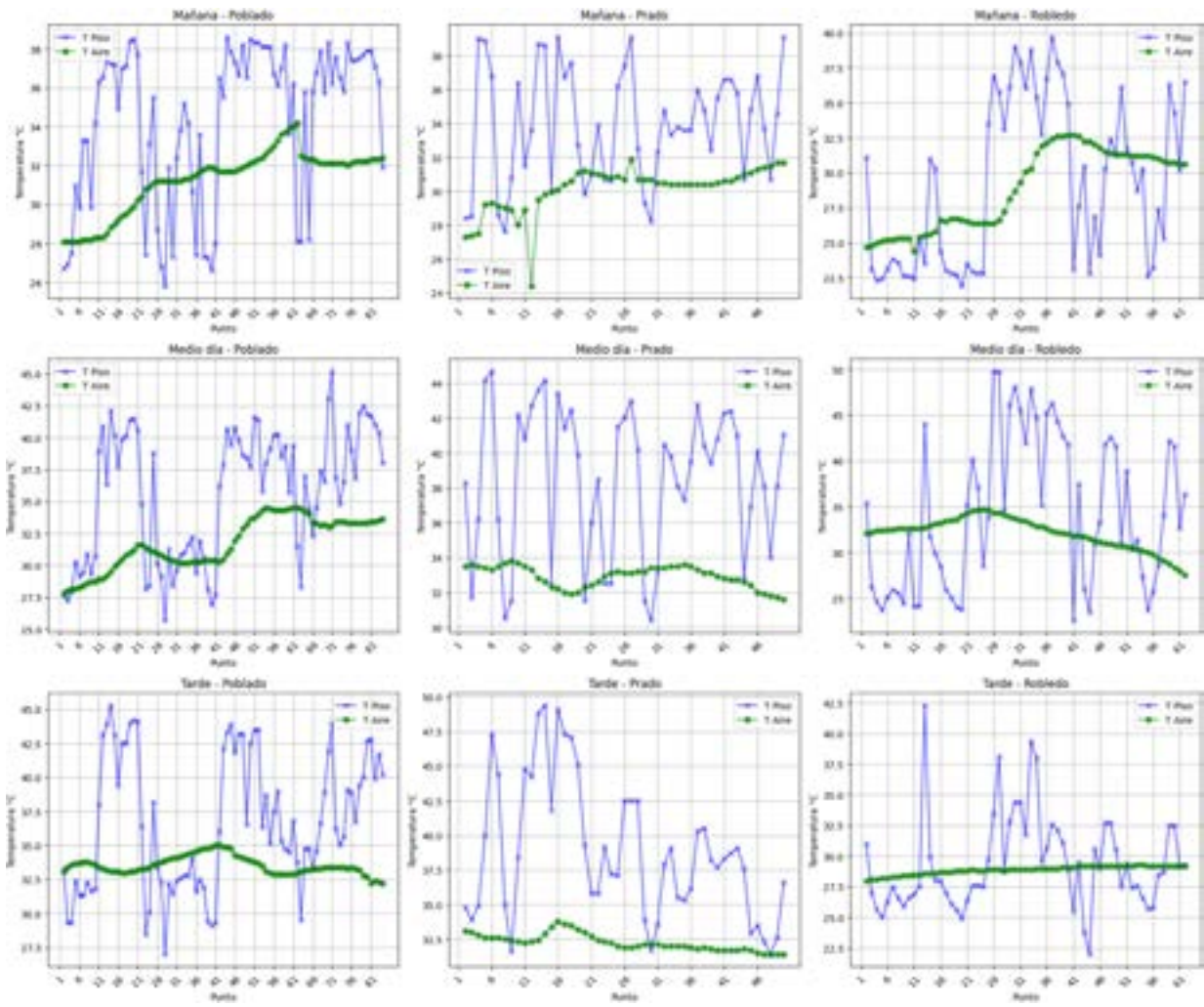
desviación de $4,96^{\circ}\text{C}$, mientras que la temperatura del aire también se eleva a $33,56^{\circ}\text{C}$ (desviación de $0,67^{\circ}\text{C}$), aunque con menos fluctuaciones que en la mañana. Este patrón sugiere un incremento constante de las temperaturas durante el día, y que las temperaturas de la tarde (1 a 4 p. m.) son considerablemente más altas a pesar de tener menor incidencia directa del sol.

En la estación de Prado, en la mañana, la temperatura promedio del piso ($T^{\circ}1$) es de $34,04^{\circ}\text{C}$, con una desviación estándar de $8,82^{\circ}\text{C}$, mientras que la temperatura del aire ($T^{\circ}2$) es de $30,32^{\circ}\text{C}$, con una desviación de $7,44^{\circ}\text{C}$. Al mediodía, la temperatura en el piso experimenta un ascenso importante, alcanzando los $38,46^{\circ}\text{C}$, con una desviación de $4,27^{\circ}\text{C}$, mientras que la temperatura del aire sube moderadamente a $32,91^{\circ}\text{C}$, con una desviación más controlada de $0,62^{\circ}\text{C}$.

Por la tarde, la temperatura del piso desciende a $34,80^{\circ}\text{C}$ (desviación de $4,97^{\circ}\text{C}$), y el aire se mantiene relativamente estable en $32,80^{\circ}\text{C}$, aunque con una mayor variación de $7,95^{\circ}\text{C}$. Prado presenta un mayor aumento de temperatura al mediodía, primordialmente en el piso, mientras que el aire parece mantener una mayor estabilidad a lo largo del día. En la tarde los valores de temperatura disminuyen tanto a nivel de superficie como en el aire.

En Robledo, las temperaturas son más bajas y presentan un patrón más fluctuante. En la mañana, la temperatura del piso

Figura 7. Gráfico resumen de la variación térmica en las tres rutas (Poblado, izquierda; Robledo, centro; y Prado, derecha) en mañana, mediodía y tarde



Fuente: elaboración de los autores.

($T^{\circ}1$) tiene un promedio de $29,14^{\circ}\text{C}$, con una desviación estándar de $5,87^{\circ}\text{C}$, mientras que el aire ($T^{\circ}2$) es ligeramente más frío con $28,87^{\circ}\text{C}$ y una desviación

de $2,87^{\circ}\text{C}$. Al mediodía, la temperatura en el piso sube a $34,21^{\circ}\text{C}$, mostrando una desviación más alta de $8,33^{\circ}\text{C}$, y la temperatura del aire también aumenta,

alcanzando 32,11 °C, con una desviación de 1,73 °C.

Por la tarde, sin embargo, la temperatura del piso baja nuevamente a 29,33 °C, con una desviación de 3,83 °C, mientras que la del aire desciende significativamente a 28,88 °C, con una desviación mínima de 0,35 °C. Robledo es la ruta más fresca, especialmente en la tarde, cuando tanto las temperaturas del piso como las del aire bajan de manera notable en comparación con el mediodía.

Las rutas presentan variaciones térmicas considerables a lo largo del día: en la ruta Poblado, se observa un crecimiento gradual y constante en las temperaturas del piso y el aire, alcanzando los valores más altos por la tarde, lo que indica un calor acumulado a pesar de la menor incidencia solar directa. En la estación de Prado, el incremento de la temperatura al mediodía es más pronunciado en el piso, mientras que las temperaturas del aire muestran mayor estabilidad. Esto podría indicar una menor capacidad del piso para disipar el calor en comparación con el aire. Robledo presenta las temperaturas más bajas de las tres rutas y un patrón más fluctuante, con un notable descenso en las temperaturas tanto del piso como del aire por la tarde, destacando como la estación más fresca.

Entre los tramos estudiados, Poblado presenta las temperaturas más altas durante todo el día, con un aumento constante en las mediciones tanto del piso como

del aire. Prado destaca por tener las temperaturas más elevadas al mediodía en el piso, alcanzando su máximo de 38,46 °C, mientras que las temperaturas del aire permanecen más estables a lo largo del día. Por otro lado, Robledo se distingue como la ruta más fresca, en especial en las tardes, con una disminución significativa de las temperaturas tanto en el piso como en el aire en comparación con los otros sectores y con el mediodía en esa misma ruta.

Finalmente, al comparar la temperatura del piso con la del aire, podemos concluir que el piso tiende a alcanzar temperaturas más altas que el aire, principalmente al mediodía y por la tarde. Esto puede deberse a las propiedades de los materiales de los pavimentos urbanos que permiten una mayor absorción y retención de calor, lo que provoca un calentamiento constante a lo largo del día. Además, la temperatura del piso presenta una mayor fluctuación y variabilidad (desviación estándar), lo que indica que es más sensible a los cambios en la radiación solar directa y las condiciones ambientales.

En contraste, la temperatura del aire es más estable y presenta menores variaciones, aunque también evidencia un aumento en la sensación térmica, especialmente en las horas de mayor incidencia solar. La diferencia en comportamiento térmico entre el piso y el aire sugiere que, en términos de CT, el piso puede representar una fuente significativa de calor,

mientras que el aire, al tener menos fluctuaciones, ofrece una percepción térmica más moderada.

Perfil de sombra (índice de permeabilidad del follaje)

Mediante un análisis fotogramétrico de las imágenes tomadas, se obtiene el número de píxeles iluminados de cada imagen en relación con el total de los píxeles, para conocer el porcentaje de la radiación que llega al suelo y si esto tiene relación con la temperatura del aire y del piso.

Perfil de sombra de las tres rutas evaluadas

Se revela que el mayor porcentaje de permeabilidad del follaje (picos en la imagen) denotan mayor radiación que llega al suelo. Por el contrario, el menor porcentaje de permeabilidad del follaje (valles) implica más sombra y menor radiación ingresando. El perfil de sombra en las rutas varía principalmente debido a la presencia o ausencia de árboles y la densidad del follaje de cada especie en los transectos. Sin embargo, se encontró que, en promedio, el confort estimado según la sombra es el siguiente: el 54,5 % en Robledo, el 48,06 % en Prado y el 41,11 % en Poblado (figura 8).

Los resultados indican que todas las rutas ofrecen condiciones aceptables para

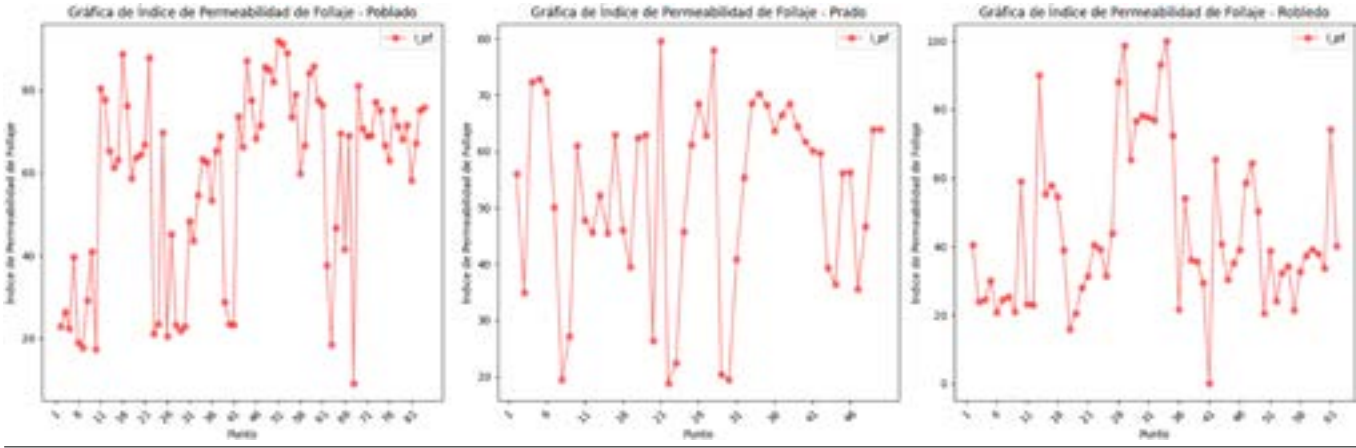
la comodidad al caminar. Robledo destaca como la ruta con el mayor porcentaje de sombra entre las rutas analizadas.

Al superponer los resultados de medición de temperatura del aire y temperatura del piso con el IPF, se evidencia que a mayor permeabilidad del follaje la temperatura del piso se eleva, es decir que hay una correlación directa entre la temperatura superficial del piso y la densidad del follaje de los árboles; en cambio, la radiación que llega al suelo tiene una menor incidencia en la temperatura del aire circundante (figura 9).

Análisis gráfico de correlación

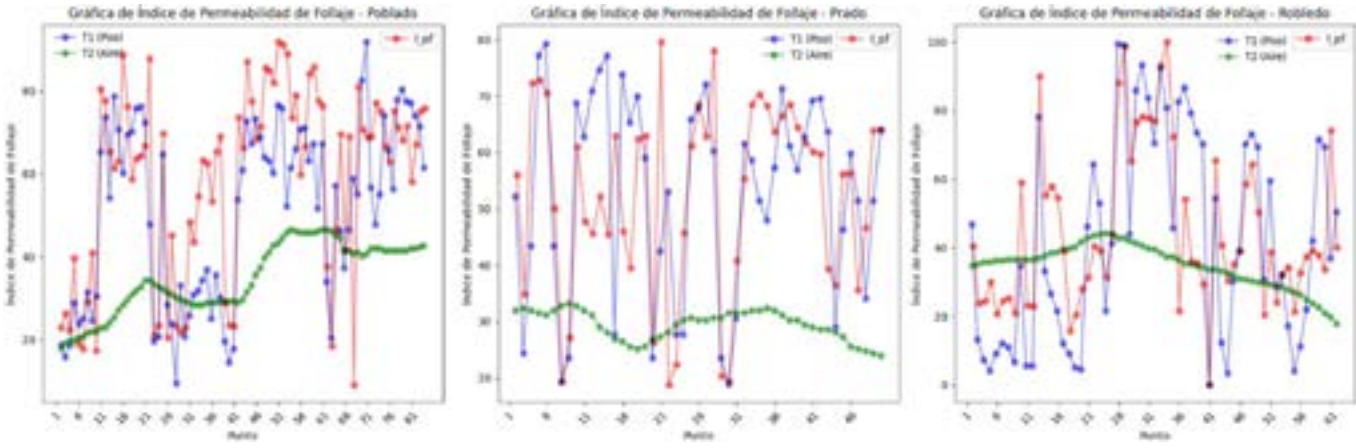
Para verificar el supuesto de que las variables empleadas están correlacionadas, se llevó a cabo un análisis de correlación con las variables de confort térmico (CT) e IPF contrastadas con los indicadores de temperatura tomados en la mañana, mediodía y tarde del aire y del piso. Se evidenció una constante correlación inversa entre estas variables, en la cual mientras los valores de CT disminuyen, los otros de IPF tienden a aumentar. La correlación es muy significativa entre CT e IPF en el indicador de temperatura del piso para cada transecto evaluado, con excepción de Robledo en la mañana. Los coeficientes fueron altamente significativos para sostener que existe una asociación significativa entre las variables evaluadas.

Figura 8. Gráfico del índice de permeabilidad del follaje para las tres rutas (Poblado, Prado, Robledo) al mediodía



Fuente: elaboración de los autores.

Figura 9. Gráfico resumen de la distribución de la temperatura del aire y del piso versus el IPF al mediodía para cada una de las rutas evaluadas



Fuente: elaboración de los autores.

Las variables asociadas a la temperatura en el piso (T mp, T mdp, T tp) muestran correlaciones muy elevadas entre sí, lo que denota que estas mediciones capturan aspectos muy similares del

comportamiento térmico de la superficie. Sin embargo, al aplicar correlaciones parciales, se observa una disminución notable en la fuerza de estas asociaciones y una pérdida de significancia.

Esto sugiere que la fuerte relación observada en el análisis simple se debe, en gran medida, a la influencia compartida de otras variables, es decir, a una alta colinealidad. Aun así, la correlación entre T mp, T mdp y T tp se mantiene relativamente robusta, lo que señala que las temperaturas del piso están fuertemente interrelacionadas, posiblemente por la influencia de los materiales de este (figura 10).

De manera general, cuando se aplican correlaciones parciales, las asociaciones pierden fuerza, pasando de relaciones fuertes a moderadas o incluso débiles, según la escala de Pearson. Además, algunas correlaciones no solo pierden significancia, sino que incluso cambian de dirección, reforzando la presencia de alta colinealidad en la mayoría de los datos. No obstante, es relevante destacar que, en ciertos casos, se mantienen relaciones sólidas entre algunas variables: por ejemplo, en la ruta Prado se observa que T mdp e IPF mantienen una fuerte correlación, mientras que en la ruta Robledo destaca la asociación entre T tp e IPF, y en la ruta Poblado se observa, en menor medida, una relación consistente entre T mdp e IPF.

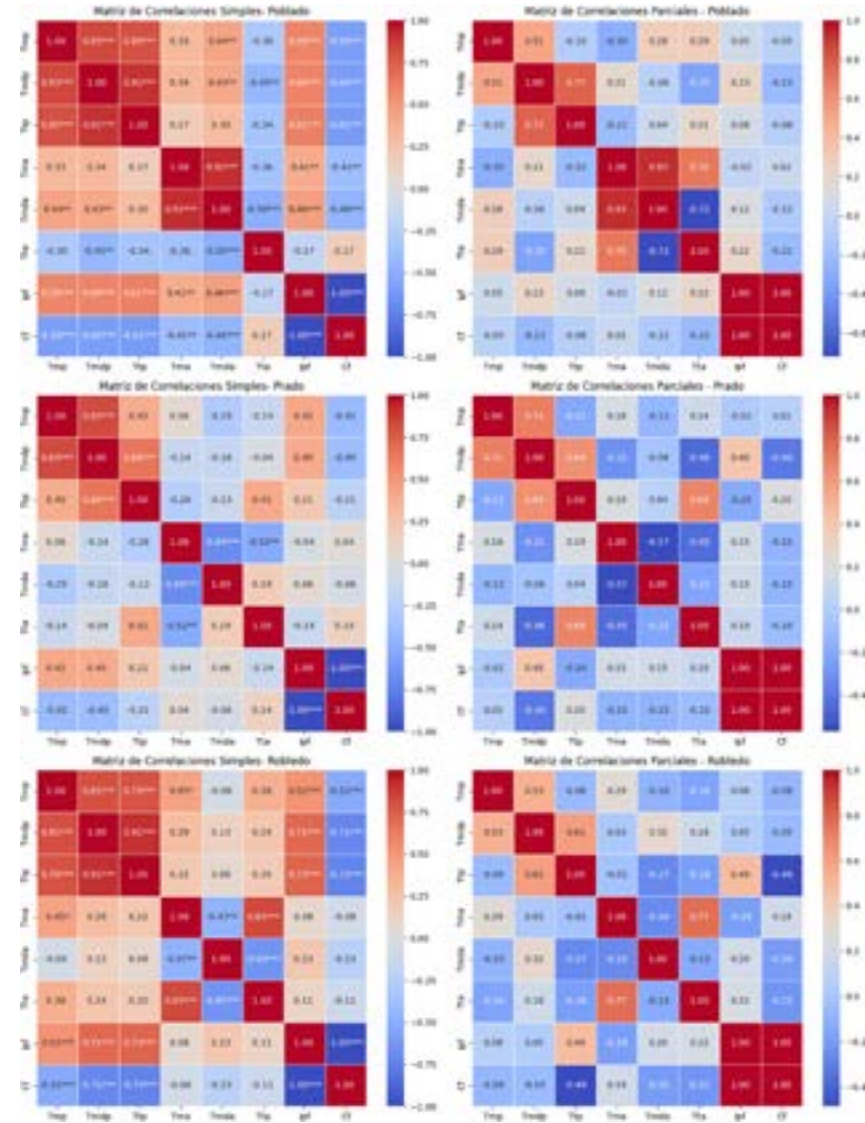
Respecto a la temperatura del aire, se reporta que Tmda presenta una correlación moderada positiva con T mp y T mdp del suelo en la ruta Poblado en el análisis de correlaciones simples. Se ve un comportamiento similar entre T ta y T ma con T mp en Robledo, y entre T ta y T tp en Prado. Sin embargo, al

comparar las temperaturas del aire y del suelo mediante correlaciones parciales, estas relaciones tienden a perder fuerza, pasando a ser moderadas en Poblado (entre T mp y Tmda) y en Robledo (entre T mp y T ma). En contraste, en la ruta Prado la relación entre T tp y T ta se intensifica, pasando de moderada a fuerte, lo que podría implicar que la temperatura radiante del suelo contribuye al aumento de la temperatura del aire.

Por otro lado, se encontró que la correlación entre T mdp y T ta es de moderada a fuerte y negativa en las rutas Poblado y Prado, manteniéndose tanto en las correlaciones simples como en las parciales. Incluso se observan cambios en el signo, aunque la asociación resulta débil para el caso de Robledo. Este patrón sugiere que, en ciertas condiciones, el suelo podría estar ejerciendo un efecto refrigerante sobre la temperatura del aire, posiblemente debido a las características propias de cada sitio, como materiales diferentes o áreas verdes adyacentes, que contribuyen al efecto refrigerante observado en las horas de la tarde.

Se observa que, en la correlación entre el índice de permeabilidad del follaje (IPF) y la temperatura de las superficies del piso en las mediciones de mañana (T mp), mediodía (T mdp) y tarde (T tp), se alcanza una fuerza de correlación elevada (coeficientes superiores a 0,6). Esto evidencia una clara dependencia entre el IPF y la temperatura del piso, con una dirección positiva, ya que, al aumentar el

Figura 10. Estadísticos para comparar la correlación entre las variables CT e IPF y los indicadores de temperatura (T) en la mañana (Tm), mediodía (Tmd) y tarde (Tt) del aire (a) y el piso (p) en Poblado, Prado y Robledo.

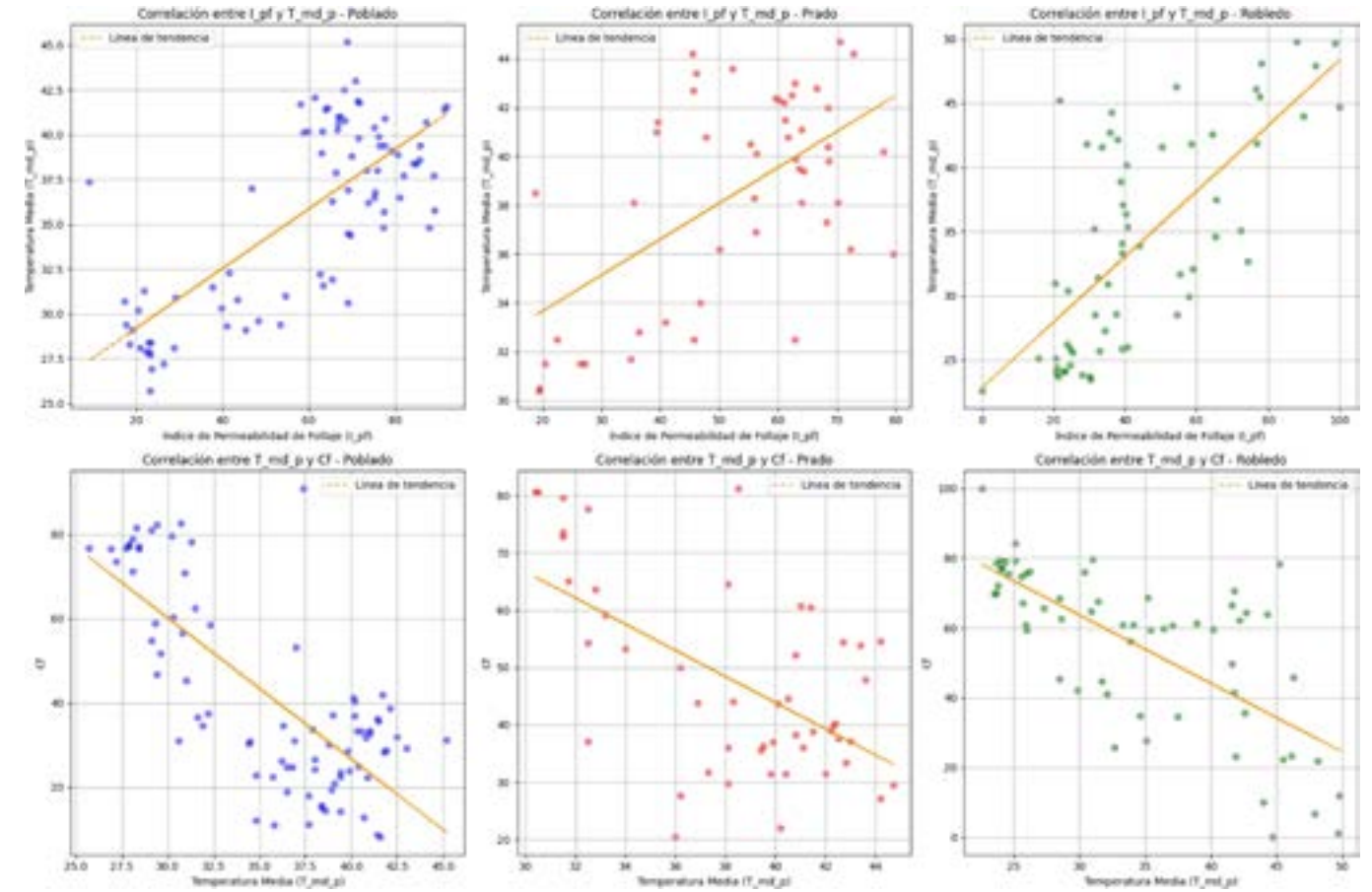


Valores >0,6 muestran una correlación significativa entre variables y la significancia de los datos está dada por un valor $p < 0,001^{***}$, $p < 0,01^{**}$, $p < 0,05^{*}$, $p < 0,1$.

Fuente: elaboración de los autores.

LUIS S. BRAVO, JULIETH N. CASTAÑO, ANDRÉS C. PATIÑO, MARÍA F. CÁRDENAS

Figura 11. Correlación entre la temperatura del piso al mediodía, el confort térmico y el índice de permeabilidad de follaje



Fuente: elaboración de los autores.

ingreso de radiación solar (reflejado en un mayor IPF), se incrementa la temperatura superficial.

No obstante, al eliminar la influencia de otras variables, esta correlación pierde significancia, aunque se mantiene la misma dirección y se presenta como moderada en dos de las tres rutas analizadas.

Por otro lado, el CT muestra una correlación negativa, lo que indica que, a mayor temperatura del piso (previamente correlacionada con el IPF), disminuye proporcionalmente el confort que experimenta el usuario (figura 11).

Es importante recalcar que las mediciones se realizaron durante la temporada

CONFORT TÉRMICO Y CAMINABILIDAD

seca en Medellín (febrero y marzo de 2024). Se observa que los datos muestran mayor fuerza al mediodía (T mdp), coincidiendo con el pico de radiación solar incidente, y en la tarde (T tp), cuando los materiales de los pavimentos urbanos alcanzan su máximo almacenamiento de energía térmica y comienzan a liberar calor.

Hallazgos y discusión

La mayoría de los usuarios de las rutas caminan principalmente por necesidad, como medio de transporte hacia el trabajo o estudios, en lugar de por recreación. Las personas estarían dispuestas a caminar más si las rutas incluyen características que las hicieran perceptiblemente más seguras, dado que, de acuerdo con Lee *et al.* (2017), la carencia de este factor, así como la falta de mantenimiento, son una barrera para el uso de las áreas verdes y de circulación urbanas.

De igual forma, Gaglione *et al.* (2022) establecen que la percepción de seguridad, la garantía de placer al caminar y los niveles de familiaridad con el entorno afectan tanto la decisión de caminar como los caminos elegidos para hacerlo dentro de la red peatonal. Un entorno accesible responde a un espacio estructurado y diseñado de tal modo que pueda ser utilizado con seguridad y eficacia por el mayor número posible de personas, ya sean pobres o discapacitadas y quienes no lo están (Santos Ganges & Rivas Sanz,

2008). Además de estos factores sociales, las condiciones ambientales también inciden en el uso o permanencia de los usuarios de espacios públicos y vías (Guzmán & Ochoa, 2014).

Más allá del confort térmico, elementos como el ruido —generado muchas veces por el tráfico vehicular y los vendedores ambulantes— o la contaminación del aire determinan la experiencia de los peatones urbanos, llegando a influir en su salud física y mental, como lo plantean Ming y Xun (2025). En cuanto a la relación del arbolado y la temperatura, se observó una correlación directa entre la densidad del follaje de los árboles y la temperatura superficial del piso: a menor densidad de follaje, mayor es la temperatura del piso; mientras que la incidencia de la densidad del follaje en la temperatura del aire es menor. En este sentido, mientras mayor sea el IPF, menor CT experimentan los usuarios de la ruta. La relación es proporcionalmente inversa, debido al calentamiento de las superficies del piso, primordialmente al medio día y la tarde, en contraste con la temperatura del aire, que tiene menores fluctuaciones.

Esto último puede explicarse también por las características del cañón o las zonas climáticas locales propuestas por Stewart y Oke (2012); hay otras variables meteorológicas que inciden en la sensación térmica, como la humedad relativa del aire, la velocidad y dirección del viento, la incidencia de la radiación solar y la vegetación urbana (Therán *et al.*, 2019),

altamente correlacionadas entre sí, pero que igualmente dependen de su relación con el entorno construido, que permite u obstruye el flujo del aire, refleja o absorbe la radiación incidente.

Así mismo, la vegetación aumenta la humedad circundante mediante la transpiración, lo cual aporta una sensación de frescura. Así, un bosque urbano puede llegar a generar un microclima con menor temperatura del aire. A este respecto, Bonebrake *et al.* (2024) mencionan que la importancia de los EVU en relación con los beneficios climáticos es particularmente bien apreciada, puesto que pueden tener efectos de enfriamiento considerables dependiendo del contexto, por ejemplo, condiciones climáticas y diversidad de árboles.

Martínez Osorio (2017) establece que el estudio de las ICU responde a un conjunto de variables topográficas y urbanísticas que interactúan con la radiación solar; además, utiliza las cuencas hidrográficas como geoforma base para definir los climatopos, es decir, áreas geográficas con características climáticas acopladas, que incluyen topografía, uso del suelo, vientos y factores que agrupan el territorio.

En relación con la presente investigación, destacamos que en el Valle de Aburrá el climatopo más cálido es el centro, que, al combinar efectos como altos valores de fracción urbana, zonas con edificios largos de baja altura y su presencia en el fondo del valle, hacen de este la ICU

de la región, seguido por el climatopo industrial (Poblado), mientras que entre los climatopos más frescos se encuentra el noroccidental (Robledo).

De igual manera, anota que la presencia de árboles y edificaciones afectan la temperatura y transporte de energía, por lo tanto, los árboles urbanos influyen en la temperatura de la superficie de la tierra, como subcapa rugosa que impide la incidencia directa del sol y por la disipación de calor por la transpiración de las plantas, lo que los hace relevantes para la mitigación de las ICU en diferentes ciudades del mundo (Yang *et al.*, 2022).

La gestión del follaje (silvicultura) y la escogencia de especies adecuadas en áreas urbanas, considerando atributos como permanencia de las hojas (perennes, semicaducifolias u hojas anchas), densidad, forma y altura de la copa pueden tener un impacto relevante en la temperatura del aire y las superficies caminables, además del tipo de material elegido para las superficies de los pisos o pavimentos urbanos.

Referencias

- Austin, M. A. C. (2022). Análisis de la influencia de la masa térmica en climas tropicales mediante simulación con Energy 2D. *Prisma Tecnológico*, 13(1), 27-35.
- Bezerra, B., & Tapia, S. (2004). *La “caminabilidad” de las ciudades como un reflejo del desarrollo sustentable*. Universidade

- de São Paulo. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/81609>
- Bonebrake, T., Tsang, T., Yu, N., Wang, Y., Ledger, M., Tilley, H., Yau, E., Andersson, A., Boyle, M., Lee, K., Li, Q., Fung Ling, Y., Dongmo, M., Güçlü, C., Dingle, C., & Ashton, L. (2024). Tropical cities as windows into the ecosystems of our present and future. *Biotropica*, e13369. <https://doi.org/10.1111/btp.13369>
- Borja, J., & Muxí, Z. (2001). Centros y espacios públicos como oportunidades. *Revista Perfiles Latinoamericanos*, 9(19), 115-130. <https://perfilesla.flacso.edu.mx/index.php/perfilesla/article/view/318>
- Boulton, C., Dedekorkut-Howes, A., & Byrne, J. (2018). Factors shaping urban greenspace provision: a systematic review of the literature. *Landscape and Urban Planning*, 178, 82-101. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.05.029>
- Cole, R. (2012). Regenerative design and development: current theory and practice. *Building Research & Information*, 40(1), 1-6. <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.617516>
- Costanza, R., De Groot, R., Braat, L., Kubiszewski, I., Fioramonti, L., Sutton, P., Farber, S., & Grasso, M. (2017). Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 28, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>
- Dörrzapf, L., Kovács-Győri, A., Resch, B., & Zeile, P. (2019). Defining and assessing walkability: a concept for an integrated approach using surveys, biosensors and geospatial analysis. *Urban Development Issues*, 62(1), 5-15. <https://doi.org/10.2478/udi-2019-0008>
- Gaglione, F., Gargiulo, C., & Zucaro, F. (2022). Where can the elderly walk? A spatial multi-criteria method to increase urban pedestrian accessibility. *Cities*, 127, 103724. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103724>
- Gehl, J. (2010). *Cities for people*. Island Press.
- Guzmán, M. H., & Ochoa, J. M. (2014). Confort térmico en los espacios públicos urbanos, clima cálido y frío semi-seco. *Hábitat Sustentable*, 4(2): 52-63.
- Haase, D. (2019). The rural-to-urban gradient and ecosystem services. In M. Schröter, A. Bonn, S. Klotz, R. Seppelt & C. Baessler (Eds.), *Atlas of ecosystem services: drivers, risks, and societal responses* (pp. 141-146). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96229-0_23
- Jiménez Coutiño, V. (2021). *Factibilidad de sustituir unidades de transporte público de combustión por vehículos eléctricos*. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/4366>
- Kurbán, A., Papparelli, A., Cúnsulo, M., Herrera, C., & Montilla, E. (2006). *Efecto bioclimático de la forestación en áreas urbanas de clima árido*. Universidad Nacional de San Juan (UNSJ).

- Lee, Y., Gu, N., & An, S. (2017). Residents' perception and use of green space: results from a mixed method study in a deprived neighbourhood in Korea. *Indoor and Built Environment*, 26(6), 855-871. <https://doi.org/10.1177/1420326X16661024>
- Livesley, S. J., McPherson, E. G., & Calafapietra, C. (2016). The urban forest and ecosystem services: impacts on urban water, heat, and pollution cycles at the tree, street, and city scale. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 119-124. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.11.0567>
- Marín, N. A., Bedoya Ramírez, D. C., Benjumea Pérez, G. I., Céspedes Herrera, A., Frankel Gallo, D., Monsalve Cifuentes, J. E., Tintinago Vásquez, T. F., Uribe Giraldo, I., Vargas, D. F., & Zapata Zapata, O. (2021). *Plan de Acción Climática Medellín 2020-2050*. https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/etc/PortalMedellin/archivos/medio_ambiente/Publicaciones/Documentos/2021/PAC_Medellin_Libro_Digital.pdf
- Martínez Osorio, A. (2017). *Islas de calor en el área urbana del Valle de Aburrá* [tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59963>
- McPherson, E. G. (2003). A benefit-cost analysis of ten street tree species in Modesto, California, US. *Arboriculture & Urban Forestry*, 29(1), 1.
- McPherson, E. G., Simpson, J. R., Xiao, Q., & Wu, C. (2011). Million trees Los Angeles canopy cover and benefit assessment. *Landscape and Urban Planning*, 99(1), 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.08.011>
- Mesa, A. F. (2020). *Inclusión del estatus social en la determinación del índice de caminabilidad como una plataforma para incentivar los viajes en modos sostenibles en Medellín* [tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- Ming, G., & Xun, Z. (2025). Seeking comfort in the urban heat: unraveling the effects of thermal-acoustic environments on psychological restoration in urban greenways. *Building and Environment*, 113269. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113269>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, & Instituto de Investigación Alexander von Humboldt. (2017). *Biodiversidad y servicios ecosistémicos en la planificación y gestión ambiental urbana*. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/biodiversidad_y_servicios_ecosistemicos_en_la_planificacion_y_gestion_ambiental_urbana.pdf
- Morales, C., Madrigal, D., & González, A. (2007). Isla de calor en Toluca. *Ciencia Ergo Sum*, 14(3), 307-316.
- Moreno, F., & Hoyos, C. (Eds.). (2015). *Guía para el manejo del arbolado urbano en el Valle de Aburrá*. Área Metropolitana del Valle de Aburrá-Universidad Nacional de Colombia.

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2016). *Proyecto de documento final de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Vivienda y el Desarrollo Urbano Sostenible (Hábitat III)*. <http://habitat3.org/wp-content/uploads/Draft-Outcome-Document-of-Habitat-III-S.pdf>

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. www.cepal.org/es/suscripciones

Rattan, B. A., Campese, A., & Eden, C. (2012). Modeling walkability. *ESRI*, 30-33.

Santa, L., & Henao, J. (2019). *Análisis del manejo ambiental sostenible de la movilidad en Medellín 2014-2018*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

Santos Ganges, L., & Rivas Sanz, J. L. D. L. (2008). Ciudades con atributos: conectividad, accesibilidad y movilidad. *Ciudades: revista del Instituto Universitario de Urbanística de la Universidad de Valladolid*, (11), 13-32. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/10290>

Stewart, I., & Oke, T. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

Talal, M. L., & Gruntman, M. (2023). Urban nature visitation, accessibility, and

impact of travel distance for sustainable cities. *Scientific Reports*, 13(1), 17808. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44861-6>

Therán, K., Rodríguez, L., Mouthon, S., & Manjarres, J. (2019). Microclima y confort térmico urbano. *Módulo, Arquitectura-CUC*, 23(1), 49-88. <http://doi.org/10.17981/mod.arq.cuc.23.1.2019.04>

Vega, S. (2020). *Evaluando confort térmico con adobe, bahareque, ladrillo y block: 3 zonas de estudio en Oaxaca* [tesis doctoral]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Vera Beltrán, B. G. (2021). *Evaluación del impacto en la transferencia de calor con el uso de teja en techos de vigueta y bovedilla* [Tesis doctoral]. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Yang, Q., Huang, X., Tong, X., Xiao, C., Yang, J., Liu, Y., & Cao, Y. (2022). Global assessment of urban trees' cooling efficiency based on satellite observations. *Environmental Research Letters*, 17(3), 034029.

Zari, M. P. (2015). Ecosystem services analysis: mimicking ecosystem services for regenerative urban design. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(1), 145-157. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsc.2015.02.004>