

- ▲ **Palabras clave/** Espacios urbanos, microclima, zonas climáticas locales, arborización.
- ▲ **Keywords/** Urban spaces, microclimate, local climate zones, forestation.
- ▲ **Recepción/** 29 de abril 2023
- ▲ **Aceptación/** 25 de marzo 2024

# Variaciones del microclima local en zonas de tejido urbano abierto en clima tropical seco

## Local Microclimate Variations in Open Urban Fabric Zones in Dry Tropical Weather

### Kevin Rafael Therán-Nieto

Arquitecto, Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia.  
Magister(c) en Proyectos de Construcción Sostenible, Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia.  
Profesional Secretaria General Gobernación del Atlántico, Barranquilla, Colombia.  
kevinthnieto@gmail.com

### Raúl Pérez-Arévalo

Arquitecto, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia.  
PhD(c) en Ciudad, Territorio y Planificación, Universidad de Granada, Granada, España.  
Decano Facultad de Arquitectura de la Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia.  
raulperez@mail.uniatlantico.edu.co

### Jesús Marín-Carranza

Arquitecto, Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia.  
Magister © en Proyectos de Construcción Sostenible, Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia.  
Profesional Secretaria General Gobernación del Atlántico, Barranquilla, Colombia.  
jesusmarin798@gmail.com

### Andrés Caballero-Calvo

Licenciado en Geografía, Universidad de Granada, Granada, España.  
Doctor en Geografía, Universidad de Granada, Granada, España.  
Profesor Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, Universidad de Granada, Granada, España.  
andrescaballero@go.ugr.es

**RESUMEN/** El objetivo del artículo es analizar el comportamiento del microclima local en zonas de tejido urbano abierto en clima tropical seco usando como caso de estudio la ciudad de Barranquilla, Colombia. En la investigación se formularon dos protocolos de simulación computarizada para el estudio de sombras, radiación solar y viento. En el estudio se comprobó que la relación de aspecto  $hw^{-1}$ , la materialidad de las superficies y la arborización en zonas climáticas de tejido abierto influyen en las variaciones de los parámetros microclimáticos como radiación solar y viento. Asimismo, los resultados demuestran que, en las fachadas donde se presenta menor radiación solar, los porcentajes de sombras oscilan entre 90% y 100%. En cuanto a ventilación natural, se identificó que en las cubiertas de los edificios con una altura menor a 6 metros la velocidad del viento es favorable, con variaciones entre 3.36 m/s y 6 m/s. **ABSTRACT/** The purpose of this article is to discuss the local microclimate behavior in open urban fabric zones located in dry tropical weather; the case study is the city of Barranquilla, Colombia. The research proposed two computer simulation protocols for the study of shades, solar radiation, and wind. The study evidenced that the  $hw^{-1}$  aspect ratio, the materiality of the surfaces, and forestation in open fabric climatic zones impact microclimatic parameters variations such as solar radiation and wind. Similarly, the results show that shade ratios range between 90 % to 100 % in facades with the lowest solar radiation. In terms of natural ventilation, the study reveals that in the building roof of less than 6 meters, wind is favorable and ranges between 3.36 m/s to 6 m/s.

## INTRODUCCIÓN

En años recientes, el acelerado crecimiento del sector de la construcción ha generado el 40% de las emisiones directas e indirectas de dióxido de carbono y ha tenido un impacto adverso en el microclima urbano (International Energy Agency, 2018). Desde el desarrollo industrial las áreas urbanas han sufrido cambios significativos puesto que el uso excesivo de materiales como el hormigón provocó el incremento de la temperatura a nivel local y la intensificación del fenómeno

conocido como isla de calor urbano (ICU) (Widiastut *et al.*, 2020). Este fenómeno influye en el ambiente térmico local y su impacto puede variar según la permeabilidad de las superficies, la ventilación de los espacios y otros aspectos morfológicos urbanos (Stewart y Oke, 2012; Mohammad y Goswami, 2021). En los climas tropicales, la ICU puede causar un aumento del estrés por calor en espacios exteriores y el incremento del consumo energético en las edificaciones por el uso de sistemas de refrigeración o de materiales acristalados en las fachadas (Therán y

Rodríguez, 2018). En estas zonas climáticas, el aumento de las temperaturas por la ICU incide en el uso excesivo durante casi todo el día de sistemas de climatización –por ejemplo aire acondicionado– para generar confort térmico en espacios interiores (Balew y Korme, 2020). Además, la falta de arborización en los espacios exteriores no contribuye a controlar la radiación solar que incide en las superficies verticales y horizontales del cañón urbano (Mohammad y Goswami, 2021). Por otro lado, los impactos y las variaciones en la ICU –tal como se ha mencionado–

dependen de la morfología y la composición urbana, es decir, de la forma de la ciudad, los materiales usados en la superficie y del tipo de actividad humana que se desarrolla en un sector determinado (Bala *et al.*, 2019). En ese sentido, para comprender los cambios en la ICU se debe tener en cuenta las zonas climáticas locales (ZCL) puesto que representan la clasificación de la morfología urbana interna de las ciudades cuyas características pueden determinar el comportamiento de los parámetros microclimáticos, como temperatura del aire, radiación solar, humedad relativa y ventilación natural (Ziaul y Pal, 2018; Choudhury *et al.*, 2021).

Estos patrones microclimáticos sufren alteraciones debido a las propiedades geométricas y/o morfológicas de un tipo de ZCL de tejido abierto o compacto (Leconte *et al.*, 2015), por lo que en los últimos años se han realizado investigaciones sobre la relación entre las ZCL y las variaciones en el microclima urbano (Choudhury *et al.*, 2021). Según las conclusiones, en los procesos de planeación local, el diseño con sensibilidad climática y la gestión del incremento de la ICU y la temperatura en ciudades tropicales con alta densidad de edificaciones es necesario entender el comportamiento de los parámetros microclimáticos según el tipo

de ZCL (Perera y Emmanuel, 2018; Jabik, 2022; Therán-Nieto *et al.*, 2023).

Las investigaciones enfocadas en el estudio del comportamiento del microclima urbano en diferentes ZCL de una ciudad contribuyen al diseño de espacios térmicamente confortables y al mejoramiento de la calidad de vida en el hábitat construido (Lai *et al.*, 2019). Por lo anterior, el objetivo de este artículo es analizar el comportamiento del microclima urbano en zonas climáticas locales de la ciudad de Barranquilla, ubicada en la región norte de Colombia con clima tropical cálido seco. En el estudio se consideran tres patrones microclimáticos: la radiación solar, la generación de sombras y el viento, además

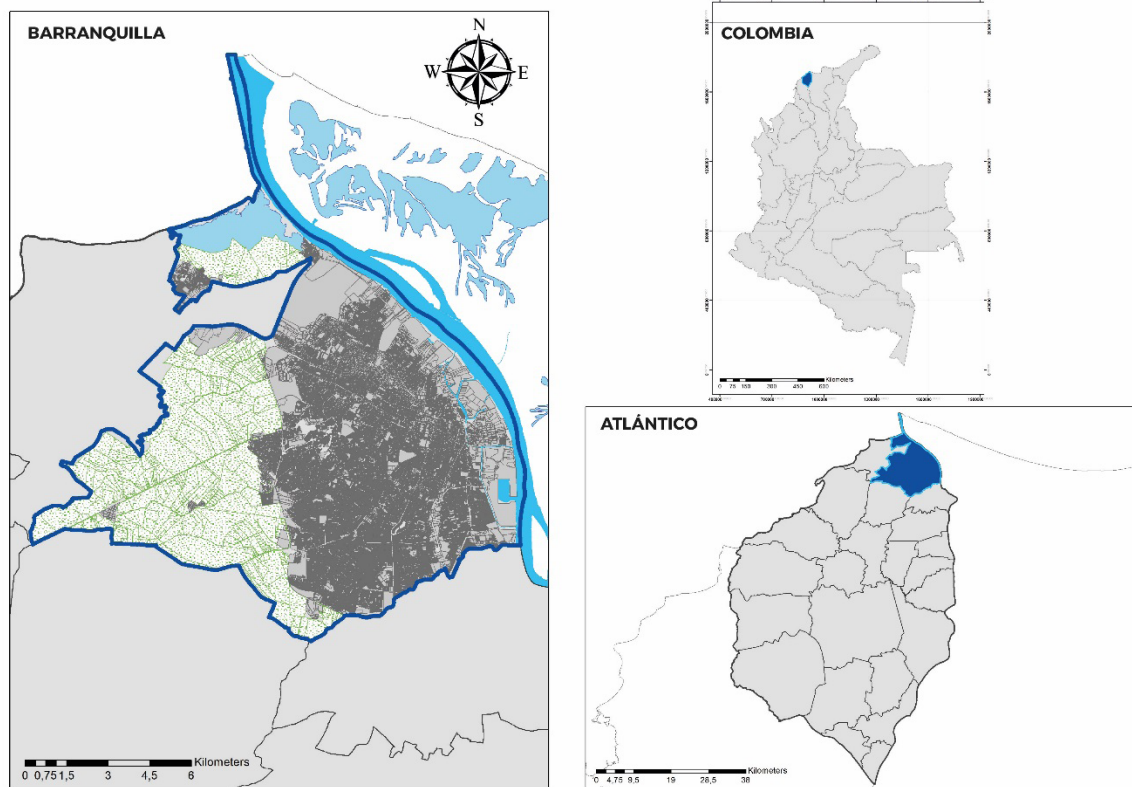


Figura 1. Localización de la ciudad caso de estudio (fuente: elaboración propia, 2023).

de los componentes morfológicos de las zonas climáticas locales seleccionadas para la realización de las simulaciones virtuales. La investigación se enfoca en dos aspectos. El primero consiste en identificar las variaciones que se presentan en la incidencia de la radiación solar y la generación de sombras en los elementos del cañón urbano de las ZCL de tejido abierto en la ciudad de Barranquilla. El segundo enfoque consiste en el estudio de los efectos, los patrones de circulación y la velocidad del viento en las ZCL de tejido abierto identificadas en el campus de la Universidad de la Costa, localizada en la zona norte de la ciudad. En el estudio se considera que, en la ciudad de Barranquilla y otras ciudades que presentan climas cálido seco y húmedo, las condiciones del ambiente exterior determinan las condiciones

ZCL	Altura edificios (h)	Ancho de calle (W)	hw-1	Dimensión de la manzana diseñada	Material de fachadas	Tipo de suelo
ZCL 6	9 m	12 m	0.75	77 - 52 m	Bloques de cemento y concreto	Suelo permeable con arborización
ZCL4	30 m	30 m	1	77 - 80 m		

Tabla 1. Tipología de espacios urbanos diseñados para el estudio de radiación solar y sombra (fuente: elaboración propia, 2023).

socioeconómicas de una comunidad (Baruti et al., 2020; Galal et al., 2020).

## METODOLOGÍA

### Área de estudio

El estudio de caso es Barranquilla, capital del departamento del Atlántico en la región Caribe, norte de Colombia (figura 1); posee clima tropical cálido seco, temperatura media

de 28°C, régimen pluviométrico monomodal y velocidad promedio del viento de 7,9 a 3,4 m/s. La dirección predominante del viento es noreste y la humedad relativa es igual a 82% (Área Metropolitana de Barranquilla, 2005). La superficie territorial de la ciudad es de 166 km<sup>2</sup> y ostenta un desarrollo robusto; tiene 1.312.473 habitantes y la densidad poblacional

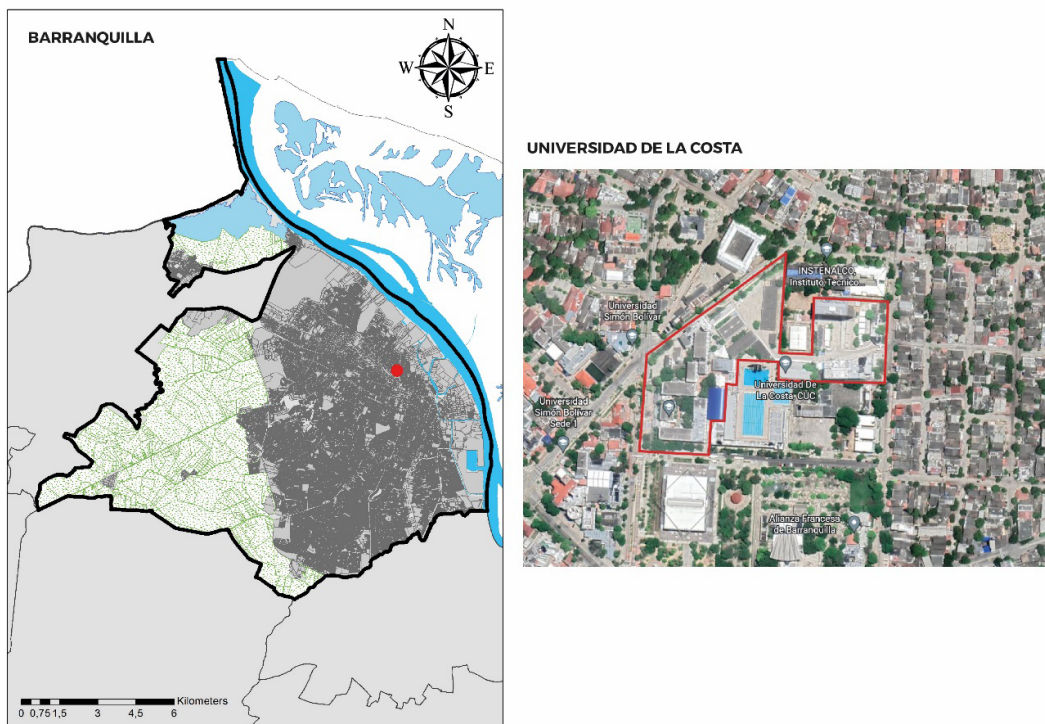


Figura 2. Localización de las instalaciones de la Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia (fuente: elaboración propia, 2023).

de 7.942 hab/km<sup>2</sup> (Departamento Nacional de Planeación, 2022).

### Instrumentos de análisis y recolección de datos

Esta investigación experimental, con aplicación a un caso de estudio, analiza las variaciones en el microclima urbano de las zonas climáticas locales de una ciudad con clima tropical seco. Para esto se realizaron simulaciones virtuales asistidas por softwares de estudio bioclimático: Autodesk Revit para las simulaciones de radiación solar y sombras, y Autodesk Flow Design para las simulaciones de viento. En la investigación se formularon dos protocolos de simulación computarizada para la recolección de datos: el primero para el estudio de sombras y radiación solar y el segundo para el análisis del viento.

### Simulaciones de radiación y sombras

En el estudio de radiación solar y sombras se simulan las fechas correspondientes a los solsticios de verano e invierno, seleccionando el día 21 de junio y 21 de diciembre, puesto que corresponden a las fechas del año con mayor y menor altura solar (Cárdenas-Jirón y Chang Lou, 2019); en los softwares se ingresó la ubicación geográfica de Barranquilla. Las simulaciones se realizaron en dos horarios diurnos: a las 10:00 y 16:00 horas, con lo cual se obtuvieron datos cuantitativos de la cantidad de radiación solar acumulada y el porcentaje de sombras generadas en la superficie seleccionada. Para estas simulaciones se tuvo en cuenta la clasificación de las ZCL de tejido abierto presentadas por Stewart y Oke (2012): ZCL 4, 5 y 6 o tejido abierto de gran, mediana y baja altura. Se seleccionaron dos tipos de ZCL de tejido abierto que se presentan en distintas localidades de la ciudad de Barranquilla (Villadiego, 2014): ZCL 4 con tejido abierto de gran altura (edificaciones con más de 10 niveles) y ZCL 6 con tejido abierto de baja altura (edificaciones de 1-3 niveles) (tabla 1). La selección de estas dos zonas climáticas de tejido abierto se debe a que poseen abundante cobertura vegetal (arbustos y árboles) y suelo permeable, e impactan positivamente

Orientación	Elemento	21 de junio (Wh/m <sup>2</sup> )		21 de diciembre (Wh/m <sup>2</sup> )	
		10 hrs	16 hrs	10 hrs	16 hrs
Norte-Sur	Este	459	37	260	41
	Oeste	90	263	55	265
	Suelo	224	25	131	34
Este-Oeste	Sur	92	40	318	241
	Norte	288	160	54	43
	Suelo	404	84	102	56
Noreste-Suroeste	Noroeste	94	263	53	137
	Sureste	221	37	360	46
	Suelo	440	25	28	100
Noroeste-Sureste	Noreste	489	40	59	41
	Suroeste	90	162	103	238
	Suelo	216	84	242	24

Tabla 2. Radiación solar (Wh/m<sup>2</sup>) en los elementos del cañón urbano de la ZCL 4 (fuente: elaboración propia con base en los datos obtenidos en las simulaciones de Revit, 2023).

en el control de la temperatura del aire, ventilación natural, generación de sombra y reducción de la radiación solar acumulada en las superficies (Martínez González, 2021). Para el diseño de las tipologías de espacios urbanos simulados se consideraron algunos aspectos morfológicos como la relación de aspecto entre la altura de la edificación y el ancho de la calle ( $hw^{-1}$ ), la dimensión de la manzana, la permeabilidad del suelo, el material de las superficies verticales (fachadas) y horizontales (suelo), y el uso de arborización (Javanroodi *et al.*, 2021). Teniendo en cuenta los efectos de la vegetación en el microclima local, en ambas tipologías hay presencia de árboles perennifolios de gran altura para generar sombras y abundante superficie de suelo permeable como zonas verdes o arena (Hasan *et al.*, 2022; Smith *et al.*, 2002). Además, el material usado para las fachadas es el bloque de cemento y/o concreto. El tipo de ZCL de tejido abierto determinó la altura de las edificaciones de los casos

simulados. La relación  $hw^{-1}$  se determinó con base en el estudio realizado por Villadiego (2014) en la ciudad de Barranquilla, en el cual se identificaron los tipos de ZCL y la proporción del cañón urbano por localidad. La relación  $hw^{-1}$  describe las proporciones del cañón urbano, es decir, la altura de la edificación ( $h$ ) y el ancho de la calle ( $w$ ). Según la altura de la edificación de la ZCL y el coeficiente  $h/w$ , se calculó la dimensión del ancho de la calle. En cuanto a la orientación de la calle, este factor describe el ángulo en grados del cañón con respecto al eje norte-sur (Therán *et al.*, 2019); la orientación es un factor que ayuda a determinar las variaciones del microclima local (Olgay, 2015). En las simulaciones se tuvo en cuenta cuatro tipos de orientaciones: norte-sur (NS  $\updownarrow$ ), este-oeste (EO  $\leftrightarrow$ ), noreste-suroeste (NESO  $\nearrow$ ) y noroeste-sureste (NOSE  $\nwarrow$ ). Por consiguiente, para el análisis de los datos de radiación acumulada y porcentajes de sombras, se elaboraron tablas donde se

Orientación	Elemento	21 de junio (Wh/m <sup>2</sup> )		21 de diciembre (Wh/m <sup>2</sup> )	
		10 hrs	16 hrs	10 hrs	16 hrs
Norte-Sur	Este	363	31	177	34
	Oeste	82	149	49	166
	Suelo	148	14	86	19
Este-Oeste	Sur	82	31	197	119
	Norte	247	102	48	34
	Suelo	162	19	50	21
Noreste-Suroeste	Noroeste	81	130	46	66
	Sureste	170	30	187	33
	Suelo	177	11	46	29
Noroeste-Sureste	Noreste	260	30	48	31
	Suroeste	75	61	72	132
	Suelo	128	24	127	13

**Tabla 3.** Radiación solar (Wh/m<sup>2</sup>) en los elementos del cañón urbano de la ZCL 6 (fuente: elaboración propia con base en los datos obtenidos en las simulaciones de Revit, 2023).

sistematizó la información para cada uno de los elementos del cañón urbano de las cuatro orientaciones (Rodríguez, 2017): fachada oeste, fachada este y suelo en la orientación NS; fachada norte, fachada sur y suelo en la orientación EO; fachada noroeste, fachada sureste y suelo en la orientación NESO; y fachada noreste, fachada suroeste y suelo en la orientación NOSE.

**Simulaciones de viento**

En el caso de las simulaciones de viento, se seleccionó una zona urbana construida en la ciudad que mezclara dos tipos de zonas climáticas y varios ejes de orientación de la calle. En ese sentido, se diseñaron las instalaciones de la Universidad de la Costa donde se presentan zonas climáticas de tejido abierto, de alta y baja densidad (figura 2). Esto con el objetivo de comprender cuáles son los patrones de circulación y flujo del aire, presión atmosférica (Pa), turbulencias térmicas y mecánicas del viento

en un espacio urbano construido en la zona norte de la ciudad. Además, *Flow Design* funciona como un túnel del viento y para la recolección de datos en las simulaciones se ingresó la predominancia usual del viento en Barranquilla (dirección noreste, por los vientos alisios) y una velocidad promedio del viento estimada en 5 m/s.

**RESULTADOS Y DISCUSIONES**

**Radiación solar y sombras**

En los elementos del cañón urbano de la ZCL 4 (en las cuatro orientaciones), incide menor radiación solar en el solsticio de diciembre con respecto al solsticio de junio (tabla 2). Según lo simulado, la radiación solar incidente es mayor en horas de la mañana. Por ejemplo, la fachada este en la orientación norte-sur, el elemento suelo en la orientación EO y NESO, y la fachada noreste en la orientación NOSE presentan valores de radiación solar superiores a 400 Wh/m<sup>2</sup> en

horas de la mañana; mientras que, en horas de la tarde, estos valores disminuyen debido al aumento de los porcentajes de sombras en el cañón urbano.

Para el solsticio de junio en la ZCL 4, las fachadas oeste, sur, noroeste y suroeste presentan indicadores de radiación solar inferiores a 95 Wh/m<sup>2</sup> en horas de la mañana. Mientras tanto, en las fachadas este, sur, sureste y noreste se presentan valores de radiación inferiores a 50 Wh/m<sup>2</sup> en horas de la tarde. Para el elemento suelo en las cuatro orientaciones, a las 16 horas la radiación solar no supera los 85 Wh/m<sup>2</sup>. En cuanto al solsticio de diciembre, las fachadas oeste, norte, noroeste y noreste presentan valores de radiación inferiores a 60 Wh/m<sup>2</sup> a las 10 horas. En horas de la tarde, los valores de radiación solar en las fachadas este, norte, sureste y noreste están por debajo de 50 Wh/m<sup>2</sup>.

Por otro lado, algunos elementos del cañón urbano en las orientaciones analizadas presentan elevados valores de radiación solar; tales son los casos de las fachadas este, norte, sureste, noreste y elemento suelo en horas de la mañana para el solsticio de junio (entre 216 Wh/m<sup>2</sup> y 490 Wh/m<sup>2</sup>). Asimismo, se identificó que, para el 21 de junio a las 10 horas, los valores de radiación solar en los elementos del cañón urbano son mayores que el resto de los horarios en las fechas simuladas. Además, se comprobó que las fachadas este y noreste, y el elemento suelo en las orientaciones EO y NESO son los elementos que acumulan mayor radiación en las dos épocas del año y los horarios simulados en Revit.

En el caso de la ZCL 6, la cantidad de radiación que se acumula en los elementos del cañón urbano en las cuatro orientaciones es menor con respecto a los resultados obtenidos en la ZCL 4 (tabla 3). Para el 21 de junio a las 10 horas, las superficies verticales que acumulan menor radiación solar son las fachadas oeste, sur, noroeste y suroeste: < 82 Wh/m<sup>2</sup>. Mientras que las fachadas este, norte, sureste y noreste son las superficies verticales que acumulan mayor radiación solar: entre 170



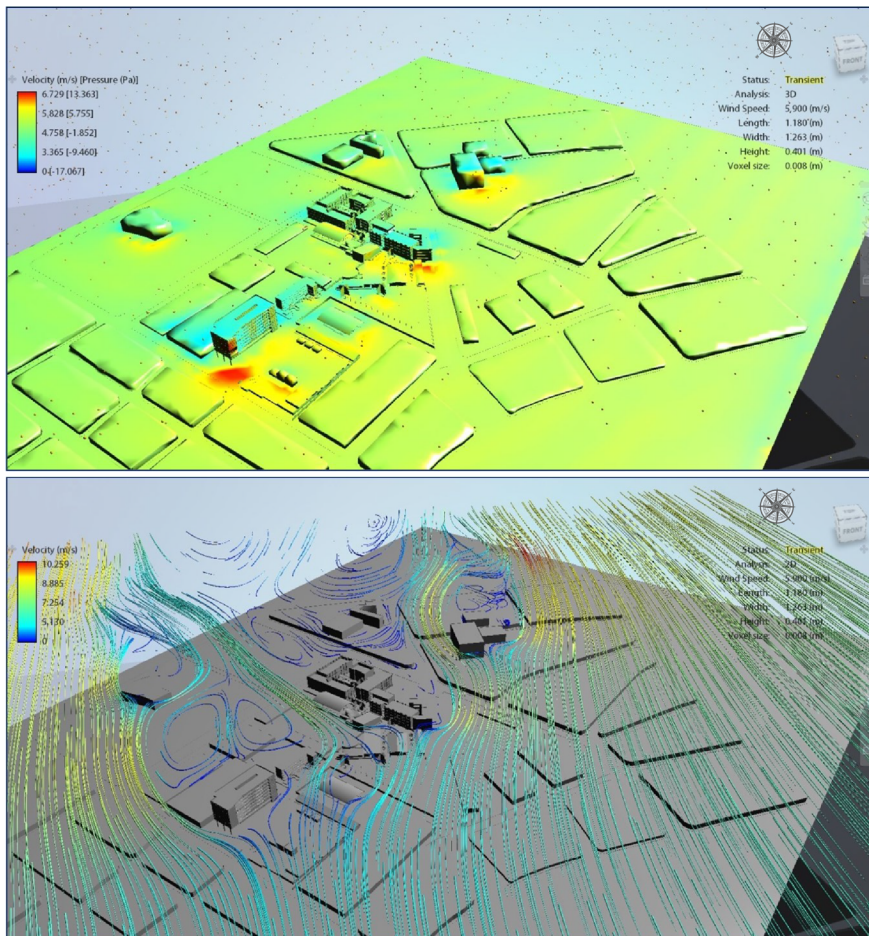


Figura 3. Presión atmosférica y velocidad del viento en el entorno urbano de la Universidad de la Costa (fuente: elaboración propia utilizando Autodesk Flow Design, 2023).

Wh/m<sup>2</sup> y 363 Wh/m<sup>2</sup>. Sumado a esto, la presencia de arborización y la relación hw<sup>-1</sup> favorecen que se acumule menor radiación en estas superficies verticales, incluyendo el elemento suelo en cada orientación (entre 128 Wh/m<sup>2</sup> y 177 Wh/m<sup>2</sup>).

A las 16 horas del 21 de junio, se observan resultados favorables para la mayoría de las superficies del cañón urbano de esta ZCL. En las fachadas este, sur, sureste y noreste la radiación solar acumulada es < 31 Wh/m<sup>2</sup>. Asimismo, el elemento suelo en las cuatro

orientaciones acumula entre 11 Wh/m<sup>2</sup> y 24 Wh/m<sup>2</sup>. También, las fachadas oeste, norte, noroeste y suroeste acumulan más radiación solar a las 16 horas que el resto de las superficies: entre 61 Wh/m<sup>2</sup> y 149 Wh/m<sup>2</sup>. En cuanto al solsticio de diciembre a las 10 horas, la radiación solar en las fachadas oeste, norte, noroeste y noreste es < 50 Wh/m<sup>2</sup>. En tanto, en las fachadas este, sur, sureste y el elemento suelo de la orientación noroeste-sureste presentan valores de radiación solar que oscilan entre 127 Wh/m<sup>2</sup> y 197 Wh/m<sup>2</sup>.

En cuanto a los sistemas de sombras, la presencia de arborización y la relación hw<sup>-1</sup> favorece la generación de sombras en los elementos del cañón urbano, tal como lo demuestra Fernández y Gentili (2021). En los resultados de la ZCL 4 y 6 se observó que, en las fachadas donde se presenta menor radiación solar, los porcentajes de sombras son mayores a 90% o igual a 100%. En cambio, en aquellas fachadas donde se acumula mayor cantidad de radiación solar, los porcentajes de sombra son inferiores a 30% e incluso iguales a 0%. Un ejemplo de esta situación es el caso de la orientación NS en la ZCL 4 para el solsticio de junio a las 10 horas; en la fachada oeste se genera 100 % de sombra y se acumula 90 Wh/m<sup>2</sup>, mientras que en la fachada este se presenta 0% de sombras y se acumula 459 Wh/m<sup>2</sup>. En las simulaciones se identificó que la arborización proporciona sombra y control de la radiación solar acumulada en las superficies del cañón urbano puesto que contribuye al mejoramiento del clima exterior y la reducción del estrés por calor (Cilek y Uslu, 2022). Además, en espacios urbanos con edificaciones de gran altura -como es el caso de la ZCL 4- el sombreado de los edificios es una estrategia de generación de sombras (Lee *et al.*, 2018). Desde esa perspectiva, la geometría de las calles y los sistemas de sombras generados en el cañón urbano pueden optimizar la refrigeración de los espacios urbanos (He, 2019).

Por otro lado, los resultados de estudio demuestran que la generación de sombras varía según las características morfológicas de las ZCL 4 y 6. Estas variaciones microclimáticas influyen en el rendimiento energético de las edificaciones (Li *et al.*, 2021), principalmente en aquellas que no cuentan con sistemas de climatización (Hong *et al.*, 2021). Además, la radiación solar que incide en las superficies horizontales de las ZCL 4 y 6 es modificada por la relación hw<sup>-1</sup> y los árboles (Ruwaah Bahgat y Elkady, 2020). Por lo que en la ZCL 4 la cantidad de radiación que absorben las superficies es mayor con respecto a la ZCL 6. De ese modo, entre mayor sea el ancho

de la calle y la altura de las edificaciones, las superficies horizontales y verticales acumulan mayor radiación solar (Cárdenas-Jirón y Chang Lou, 2019).

### Estudio de viento

En las simulaciones realizadas en la Universidad de la Costa se puede identificar el efecto del viento laminar en ciertos espacios con dos flujos de aire distintos debido al coeficiente de la rugosidad superficial. Por ejemplo, en los espacios abiertos donde hay presencia de arborización y cubiertas textiles (espacio 1), las edificaciones que se ubican a su alrededor tienen una altura mayor a 12 metros y un coeficiente de rugosidad superficial ( $\alpha$ ) para áreas urbanas igual a 0,40. Mientras que, en los espacios abiertos donde solamente hay presencia de arborización para generar sombras y edificaciones alrededor de hasta 5 metros de altura (espacio 2), el coeficiente de rugosidad ( $\alpha$ ) es igual a 0,28 para áreas suburbanas.

Esa diferencia en la rugosidad superficial ocasiona que las moléculas de aire en el espacio 2 se muevan lentamente a una altura muy diferente a aquella del espacio 1, causando ciertos flujos deficientes del viento dentro de la universidad. Asimismo, en los bloques de gran altura de la universidad se presentan golpes de vientos entre 0 y 4 m/s, mientras que, en la base de estos, las velocidades superan los 5.00 m/s al igual que en los bloques de menor altura. En las cubiertas de las edificaciones con una altura mayor a 6 metros la presión atmosférica es negativa (-17,06 Pa a -1,85 Pa), con velocidades del viento entre 0 y 4,75 m/s.

Por otra parte, en las cubiertas de los edificios con una altura menor a 6 metros y en las bases de las edificaciones, la presión atmosférica oscila entre -9,46 Pa a 6 Pa con velocidades del viento entre 3,36 m/s a 6 m/s (figura 3). Es decir, esa acumulación de viento en las bases y en las cubiertas de los edificios de menor altura se debe en primer lugar a la diferencia de temperatura y presión atmosférica -que en estos casos acumula mayores velocidades del viento y turbulencias- y en segundo lugar al nivel de fricción superficial.

Por otro lado, Wang *et al.*, (2020) demostraron que las distribuciones bidimensionales de la velocidad del viento se pueden estimar en dos formas: a partir de las velocidades del viento de fondo y los parámetros morfológicos. Asimismo, exponen que las velocidades del viento estimadas en el centro del dominio numérico dependían de los parámetros de la morfología circundante, así como las direcciones del viento de fondo. De esta manera, los patrones del viento en espacios exteriores están influenciados por la morfología urbana.

En las simulaciones se identifican zonas de remolinos de succión o de presión que se forman por las edificaciones presentes dentro de la universidad. Los remolinos de presión se presentan de cara a las edificaciones con respecto a la predominancia de los vientos (noreste); en estas zonas, la velocidad del viento se incrementa, aunque se redirige y desaparece o puede mantenerse de forma continua en el espacio dependiendo a la circulación del viento. Por su parte, las zonas de remolinos por succión se producen detrás de las edificaciones y se unen a las turbulencias cercanas.

Los resultados de las simulaciones demuestran que la morfología urbana determinada por la altura de los edificios y el tejido urbano afectan los patrones de circulación del viento (Takebayashi *et al.*, 2020). De igual forma, en los espacios del campus universitario donde se presenta arborización, la velocidad del viento tiende a disminuir debido al efecto barrera y rugosidad de la vegetación (Stojanovic *et al.*, 2020). En algunos espacios de la universidad se forman corredores de viento por el efecto Venturi, donde se crea un ambiente térmico agradable para los climas cálidos (Shooshtarian y Rajagopalan, 2019).

### CONCLUSIONES

Las distribuciones espaciotemporales de la radiación solar evaluadas en la investigación sugieren acciones de doble vía; por un lado, el aprovechamiento de la realidad conocida de asoleamiento para generar soluciones de envolventes que limiten la transmisión de calor exterior-interior y, por otra parte, la creación de mecanismos de almacenamiento a través de sistemas conocidos y exploratorios de

captación fotovoltaicas. De esta forma, aportamos a la reducción del consumo energético por razones de acondicionamiento del aire.

La arborización favorece más a los porcentajes de sombras generados en espacios con tipologías urbanas de baja altura y tejido abierto. En cambio, en los espacios con tipologías urbanas de gran altura, la arborización favorece en cierto porcentaje mayor a 2 % con respecto a otras tipologías de espacios urbanos de gran altura con tejido compacto. La presencia de árboles en la LCZ 4 favorece el incremento del porcentaje de sombras y menor radiación solar acumulada en el elemento suelo de las cuatro orientaciones. Los porcentajes de sombras generadas en el cañón urbano varían según la fecha del año debido a la trayectoria solar.

En la LCZ 6 las orientaciones norte-sur y noroeste-sureste presentan porcentajes de sombras más favorables, seguido por la orientación noreste-suroeste y, por último, este-oeste. Asimismo, la relación  $hw^{-1}$  igual a 0,75 y presencia de arborización favorece el aumento de porcentajes de sombras en los diferentes elementos del cañón urbano. Por lo anterior, al diseñar ambientes urbanos y espacios arquitectónicos en la ciudad de Barranquilla es necesario tomar en consideración los valores de radiación solar acumulados en las superficies horizontales y verticales del cañón urbano según el tipo de ZCL (tejido, trama, tipos de suelo, etc.). Esto ayuda a los planificadores, diseñadores y urbanistas a seleccionar los materiales, las formas y los elementos superficiales adecuados que reducen la acumulación de radiación solar en las fachadas.

El método empleado para el estudio de caso resulta eficaz para establecer parámetros de reconocimiento de la incidencia solar y del viento en la ciudad de Barranquilla. En consecuencia, el conocimiento del comportamiento de los factores del clima sobre las edificaciones abre paso a nuevas exploraciones científicas, en especial en aquellas relacionadas con el estudio de materiales y técnicas constructivas aplicadas a la solución de fachadas y envolventes en las edificaciones. ▲●●

## REFERENCIAS

- Área Metropolitana de Barranquilla. (2005). *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos de Barranquilla y su Área Metropolitana*. Barranquilla: Área Metropolitana de Barranquilla. <http://www.ambq.gov.co/wp-content/uploads/2016/10/Cap-1-DIAGNOSTICO-GENERAL.pdf>.
- Bala, R., Prasad, R., Yadav, V. y Sharma, J. (2019). Spatial Variation of Urban Heat Island Intensity in Urban Cities Using Modis Satellite Data. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-4/W16* (October): 147-151.
- Balew, A. y Korme, T. (2020). Monitoring Land Surface Temperature in Bahir Dar City and Its Surrounding Using Landsat Images. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 23 (3): 371-386.
- Baruti, M., Johansson, E. y Yahia, M.-W. (2020). Urbanites' outdoor thermal comfort in the informal urban fabric of warm humid Dar es Salaam, Tanzania. *Sustainable Cities and Society*, 62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102390>.
- Cárdenas-Jirón, L. y Chang Lou, J. (2019). Acceso solar en espacio urbano: simulaciones energéticas para su mitigación en alta densidad inmobiliaria residencial. Santiago Centro Sur. *Revista 180*, 44 (95-109). [http://dx.doi.org/10.32995/rev180.Num-44.\(2019\).art-630](http://dx.doi.org/10.32995/rev180.Num-44.(2019).art-630).
- Choudhury, D., Das, A. y Das, M. (2021). Investigating thermal behavior pattern (TBP) of local climatic zones (LCZs): A study on industrial cities of Asansol-Durgapur development area (ADDA), eastern India. *Urban Climate*, 100727. doi: [10.1016/j.uclim.2020.100727](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100727).
- Ciek, M. U. y Uslu, C. (2022). Modeling the relationship between the geometric characteristics of urban green spaces and thermal comfort: The case of Adana city. *Sustainable Cities and Society*, 103748. doi: [10.1016/j.scs.2022.103748](https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103748).
- Departamento Nacional de Planeación (2022). *Terridata DNP*. <https://terridata.dnp.gov.co/index-app.html#/perfiles/08001>.
- Fernández, M. y Gentili, J. (2021). Radiación solar y planeamiento urbano: factores e interacciones en Bahía Blanca, Argentina. *Revista de Urbanismo*, (45), 46-66. doi: <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2021.58824>.
- Galal, O., Sailor, D. y Mahmoud, H. (2020). The impact of urban form on outdoor thermal comfort in hot arid environments during daylight hours, case study: New Aswan. *Building and Environment*, 184. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107222>.
- Hasan, M., Hassan, L., Al Mamun, A., Abualreesh, M. H., Idris, M. H. y Kamal, A. H. (2022). Urban green space mediates spatiotemporal variation in land surface temperature: a case study of an urbanized city, Bangladesh. *Environmental Science and Pollution Research*, 36376-36391. doi: [10.1007/s11356-021-17480-9](https://doi.org/10.1007/s11356-021-17480-9).
- He, B.J. (2019). Towards the next generation of green building for urban heat island mitigation: Zero UHI impact building. *Sustain. Cities Soc.* <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101647>.
- Hong, T., Xu, Y., Sun, K., Zhang, W., Luo, X. y Hooper, B. (2021). Urban microclimate and its impact on building performance: A case study of San Francisco. *Urban Climate*. doi: [10.1016/j.uclim.2021.100871](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100871).
- International Energy Agency. (2018). *World Energy Outlook*. 661. <https://doi.org/10.1787/weo-2018-en>.
- Jabik, B. B. (2022). Relevant local climatic knowledge for sustainable agro-ecological practices by small-scale farmers in northern Ghana. *Climate and Development*. doi: [10.1080/17565529.2022.2057403](https://doi.org/10.1080/17565529.2022.2057403).
- Javanroodi, K., Nik, V. M., y Scartezzini, J. (2021). Quantifying the impacts of urban morphology on modifying microclimate conditions in extreme weather conditions. *Journal of Physics: Conference Series*, 2042(1), Article 012058. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012058>.
- Lai, D., Chen, B. y Liu, K. (2019) Quantification of the influence of thermal comfort and life patterns on outdoor space activities. *Built Simul.* 13, 113-125. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0565-x>.
- Leconte, F., Bouyer, J., Claverie, R. y Pétrissans, M. (2015). Using local climate zone scheme for UHI assessment: Evaluation of the method using mobile measurements. *Built Environ.*, 83, pp. 39-49.
- Lee, I., Voogt, J. y Gillespie, T. (2018). Analysis and Comparison of Shading Strategies to Increase Human Thermal Comfort in Urban Areas. *Atmosphere* 9 (3) 91. <https://doi.org/10.3390/atmos9030091>.
- Li, Y., Wang, D., Li, S. y Gao, W. (2021). Impact Analysis of Urban Morphology on Residential District Heat Energy Demand and Microclimate Based on Field Measurement Data. *Sustainability*, 2070. doi: <https://doi.org/10.3390/sui3042070>.
- Martínez González, N. P. (2021). *Evolución de las islas de calor urbanas en el período 2002-2020 y su relación con las zonas climáticas locales de las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén, Región del Biobío, Chile*. Chile: Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180787>.
- Mohammad, P. y Goswami, A. (2021). Quantifying diurnal and seasonal variation of surface urban heat island intensity and its associated determinants across different climatic zones over Indian cities. *GIScience & Remote Sensing*, 955-981. <https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1940739>.
- Olgyay, V. (2015). *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism: New and Expanded Edition*. Princeton University Press, 1-190.
- Perera, N. y Emmanuel, R. (2018). A "Local Climate Zone" based approach to urban planning in Colombo, Sri Lanka. *Urban Climate*, 188-203. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.11.006>.
- Rodríguez, L. (2017). *Procedimiento para simulaciones de sombra incidente en Ecotect*. Facultad de Arquitectura, Universidad de la Costa, Colombia.
- Ruwaa Bahgat, R. R. y Elkady, S. (2020). Analyzing the impact of design configurations of urban features on reducing solar radiation. *Journal of Building Engineering*, 101664. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101664>.
- Shooshtarian, S. y Rajagopalan, P. (2019). Perception of Wind in Open Spaces. *Climate*, 7(9). doi: [10.3390/cli7090106](https://doi.org/10.3390/cli7090106).
- Smith, G.L., Wilber, A.C., Gupta, S.K. y Stackhouse, P.W. (2002). Surface radiation budget and climate classification. *Journal of Climate* 15 (10), 1175-1188. doi: [10.1175/1520-0442\(2002\)015<1175:SRBACC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1175:SRBACC>2.0.CO;2).
- Stewart, I. y 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>.
- Stojanovic, N., Tesic, M., Petrovic, J., Corovic, D., Vukmirovic, M., Lisica, A. y Petrovic, U. (2020). The effect of roadside green spaces on wind speed reduction in the urban environment. *Fresenius Environmental Bulletin*, 10465-10473.
- Takebayashi, H., Okubo, M., y Danno, H. (2020). Thermal environment map in street canyon for implementing extreme high temperature measures. *Atmosphere* 11 (6), 10.3390/ATMOS11060550.
- Therán, K. y Rodríguez, L. (2018). Hábitat sostenible. Adaptación y mitigación frente al cambio climático. Hacia los territorios resilientes. *Módulo Arquitectura - CUC*, 21(1), 63-96. <https://doi.org/10.17981/moducuc.211.2018.03>.
- Therán, K., Rodríguez, L., Mouthon, S. y Manjarres, J. (2019). Microclima y Confort Térmico Urbano, *Módulo Arquitectura - CUC*, vol. 23, N° 1, pp. 49-88, 2019. <http://doi.org/10.17981/mod.arq.cuc.231.2019.04>.
- Therán-Nieto, K., Pérez-Arévalo, R., Marín-Carranza, J. y Caballero-Calvo, A. (2023). Thermal Comfort and Microclimate in Indoor Spaces of Low-rise Residential Buildings in Dry Tropical Climate. *Journal of Design and Built Environment*. <https://doi.org/10.22452/jdbevol23no2.4>.
- Villadiego, K. (2014). *Une lecture de la forme urbaine et des microclimats. Le cas de Barranquilla*. Marseille, France. Aix Marseille Université; Institut d'Urbanisme et d'Aménagement Régional - IUAR; Laboratoire Interdisciplinaire en Urbanisme - LIEU.
- Widiastut, R., Zaini, J. y Caesarendra, W. (2020). Field measurement on the model of green facade systems and its effect to building indoor thermal comfort. *Measurement*. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108212>.
- Wang, J.-W., Yang, H.-J., y Kim, J.-J. (2020). Wind speed estimation in urban areas based on the relationships between background wind speeds and morphological parameters. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104324>.
- Ziaul, S. y Pal, S. (2018). Analyzing control of respiratory particulate matter on Land Surface Temperature in local climatic zones of English Bazar Municipality and Surroundings. *Urban Climate*, 34-50. doi: [10.1016/j.uclim.2018.01.006](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.01.006).