XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

EFECTOS URBANOS EN LA METEOROLOGÍA DEL VALLE DE ABURRÁ - COLOMBIA: ISLA DE CALOR EN UN TERRENO COMPLEJO Y VARIACIONES MICRO-CLIMÁTICAS

Gisel Guzmán (1); Carlos Hoyos (2)

(1) Msc Ingeniería – Recursos Hidráulicos Universidad Nacional de Colombia (UNAL), Analista de proyectos en SIATA, gguzmane@unal.edu.co

(2) PhD, Profesor Departamento de Geociencias y Medio Ambiente UNAL, director de SIATA, cdhoyos0@unal.edu.co

Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), Carrera 48A # 10 Sur-123, Medellín, Colombia (teléfono: 4038870).

RESUMEN

En este trabajo se analizan efectos urbanos en la meteorología del Valle de Aburrá (noroccidente de Colombia) a través de datos representativos de una escala climática local y micro**.** La complejidad del territorio hace que el esquema tradicional de estudio del efecto isla de calor no sea apropiado, por lo que éste se analiza a través de cambios en el gradiente de temperatura con la altura. A su vez, para investigar variaciones de microclima en el dosel urbano se consideran dos fuentes de datos; una primera que permitió realizar un análisis en diferentes rangos de altura (Proyecto Ciudadanos Científicos V2), y una segunda con la cual se estudió el contraste de microclimas entre sitios con alturas similares (Campaña con sensores multiparamétricos). Los resultados indican que la ubicación altitudinal y latitudinal determina los tipos de climas que se encuentran en el Valle; sin embargo, la influencia de la urbanización es notable a través de una modificación del gradiente de temperatura en función del entorno de medición (tanto a escala local como micro). Las mediciones micro climáticas realizadas a alturas similares mostraron que hay diferencias en el comportamiento térmico (y posiblemente de sensación térmica) en función principalmente del acceso solar, debido a la geometría urbana y la vegetación situada alrededor de los sensores. Estos resultados indican que la complejidad del Valle de Aburrá (tanto urbana como topográfica) podría ser incorporada en la creación de estrategias de diseño energéticamente eficientes para espacios exteriores que aprovechen el clima como criterio básico. Por ende, estas estrategias no sólo deben basarse en promedios mensuales, sino también en variaciones intradiurnas.

Palabras clave: efecto isla de calor, microclima, terreno complejo, ciencia ciudadana, vegetación urbana.

ABSTRACT

In this paper, we analyze urban effects in the meteorology of the Aburrá Valley (northwest of Colombia) through data of a local and microclimatic scale. The complexity of the territory makes inappropriate the use of the traditional scheme for the study of urban heat island effect; therefore, this effect is analyzed through changes of the temperature with altitude (environmental lapse-rate). At the same time, to investigate microclimate variations in the urban canopy we considered two datasets. The first allowed us to perform an analysis in different altitude ranges (Ciudadanos Científicos V2), and with the second one dataset, we studied the contrast of microclimates between sites with similar altitudes (Campaign with multiparameter sensors). The results indicate that the altitudinal and latitudinal location determines the climate types found in the Valley; However, the influence of urbanization is notable through a modification of the altitudinal temperature gradient depending on the measurement environment (both local and micro). The microclimatic measurements made at similar heights showed that there are differences in the thermal behavior (and possibly on thermal sensation) depending mainly on solar access, due to the urban geometry and vegetation located around the sensors. These results indicate that the complexity of the Aburrá Valley (both urban and topographic) could be incorporated into the creation of energy-efficient climate-sensitive design strategies to outdoor spaces. Therefore, these strategies should not only be based on monthly averages, but also on intra-day variations.

Keywords: Urban heat island effect, microclimate, complex terrain, citizen science, urban vegetation.

1. INTRODUCCIÓN

La atmósfera urbana está sujeta a fenómenos de un contexto espacial y temporal mayor, como procesos de la escala sinóptica, sistemas regionales (como los vientos de montaña), o por la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos. Por ello es importante separar la influencia urbana de la no urbana en estudios de clima en ciudades, y para ello se puede tomar como referencia una modificación del marco conceptual de Lowry (Oke et al., 2017). Este marco indica que el valor medido de una variable meteorológica (como temperatura, humedad relativa o velocidad del viento, etc.) se asume conceptualmente como la suma linear de 3 contribuciones: un valor de fondo de la variable debido al macroclima de la región, una desviación dada por efectos climáticos locales o por el paisaje (ej. cuerpos de agua, sistemas montañosos) y por una desviación dada por efectos de actividades humanas, como, por ejemplo, los efectos urbanos.

La influencia urbana en el clima también tiene su expresión en diferentes escalas espaciales, siendo uno de los efectos más estudiados el de isla de calor urbano, que se expresa cómo el aumento de la temperatura en las ciudades frente a zonas rurales. Este calentamiento no es homogéneo al interior de las ciudades, ya que el gradiente ciudad-campo se ve interrumpido por puntos fríos y calientes localizados en áreas de densidad urbana alta o baja (Oke, 1982).

Específicamente en el dosel urbano —la porción de atmósfera que va desde el suelo hasta el tope de las edificaciones— se establecen microclimas diferentes debido a la heterogeneidad de los elementos urbanos, con un régimen de viento y balance energético que son determinados por la naturaleza física del entorno inmediato (Oke et al., 2017).

En ciudades situadas en terrenos complejos las diferencias de altura interponen un gradiente natural de temperatura, por ende, el enfoque tradicional de comparar directamente estaciones rurales y urbanas en estudios del efecto isla de calor no es apropiado. Lo cual ante la falta de mediciones preurbanas para cuantificar el cambio por la urbe según lo establecido en Lowry (1997), hace necesario que se busquen enfoques alternos para su estudio, como en Saaroni; Ziv (2010).

El Valle de Aburrá (*Figura 1 – Arriba; Localización del Valle de Aburrá y de las redes de medición empleadas en este estudio. Medio: Perfil topográfico de la zona más Ancha del Valle de Aburrá. Abajo: emplazamiento y exposición de los sensores meteorológicos empleados.*Figur) es un cañón estrecho localizado sobre los Andes tropicales al noroccidente de Colombia (7°N) con áreas urbanas entre los 1300 y 2000 m.s.n.m, y hogar de aproximadamente 3.9 millones de personas, de las cuales un 90% vive en zonas urbanas. En un trabajo paralelo se abordó la expresión del efecto isla de calor superficial en el Valle (Guzmán, 2018 e Guzmán et al., 2019), teniendo en cuenta sus particularidades topográficas. En este se encontraron diferencias térmicas independientes a la altura y orientación de las superficies, de acuerdo con el tipo de forma urbana y la densidad de vegetación

2. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es analizar los efectos urbanos en las condiciones térmicas del Valle de Aburrá a través del análisis de datos representativos de una escala climática local y micro climática, con énfasis en el dosel urbano, como nivel de estadía de la población.

Aquí se aborda este problema desde un enfoque con alcance regional o general —con datos distribuidos en distintas cotas de altura— que permite analizar la meteorología en el territorio con su complejidad, para luego para pasar al análisis de casos particulares de microclima bajo diferentes configuraciones urbanas. Este artículo hace parte de los resultados de la tesis de maestría “Análisis de la influencia del diseño urbano del Valle de Aburrá” (Guzmán, 2018).

3. MÉTODO

Los procedimientos que se llevaron a cabo para alcanzar el objetivo de este trabajo se dividen por el tipo de datos analizados y su distribución espacial:

Alcance regional:

a. Efectos urbanos en el contexto térmico local del Valle: Red de estaciones meteorológicas SIATA.

b. Meteorología en el dosel urbano: Proyecto Ciudadanos Científicos V2.

Casos de estudio:

Meteorología en el dosel urbano: Campaña con sensores multiparamétricos.

Todos los datos empleados provienen del proyecto de Ciencia y Tecnología Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá – SIATA (https://siata.gov.co/). SIATA es una estrategia regional para la gestión del riesgo, que a través del monitoreo ambiental del territorio busca fortalecer la toma de decisiones. El proyecto tiene como pilares fundamentales cuatro tareas: el monitoreo ambiental,

alertas y gestión, modelación, y comunicación y educación. Por ende, en su misión está además promover la divulgación científica y apropiación social del conocimiento a través de las investigaciones del proyecto.

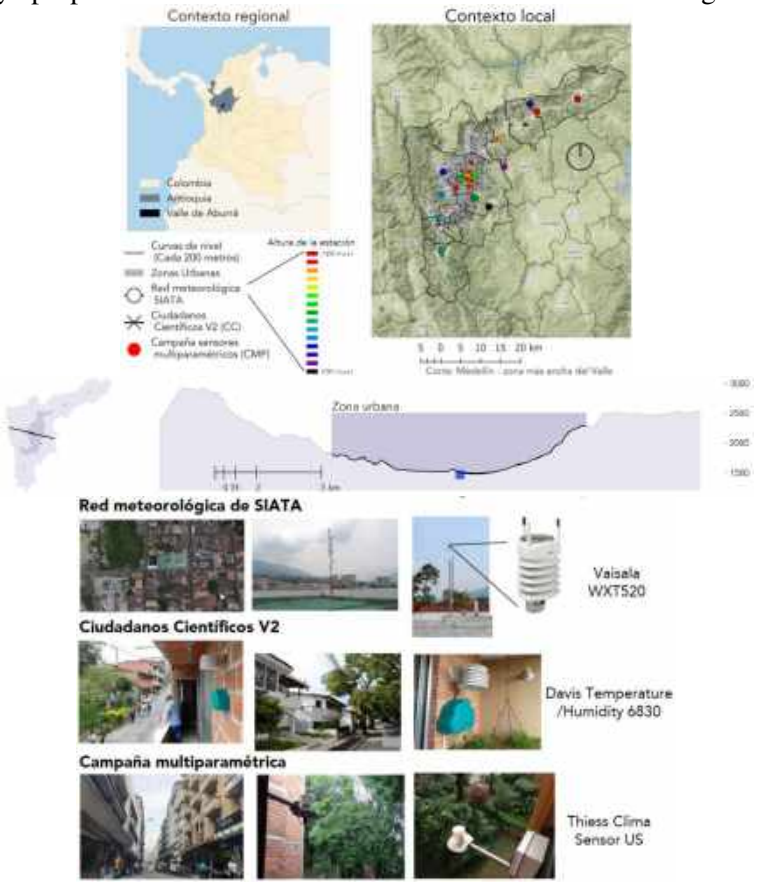

Figura 1 – Arriba; Localización del Valle de Aburrá y de las redes de medición empleadas en este estudio. Medio: Perfil topográfico de la zona más Ancha del Valle de Aburrá. Abajo: emplazamiento y exposición de los sensores meteorológicos empleados.

Cabe mencionar que aunque se usan tres sensores distintos para medir temperatura (Vaisala WXT520, Davis Temperature/Humidity Sensor 6830 y Thiess Clima sensor US) se cumple con los requerimientos de precisión para estudios de confort y estrés térmico de acuerdo con el estándar internacional ISO 7726:1998 (Johansson et al. 2014), ya que la precisión de estos sensores es ±0.3°C y cuentan con escudo contra la radiación. Por lo tanto, Las variaciones en cada una de las fuentes de datos se atribuye a la naturaleza del balance energético del entorno que lo rodea (sub-capa residual o dosel urbano).

3.1 Alcance regional:

3.1.1 Red de estaciones meteorológicas SIATA

En esta sección se analizaron datos de 15 estaciones pertenecientes a la red meteorológica de SIATA con registros de más de 5 años (2013-2018) de cada minuto, distribuidas entre 1335 y 2781 m.s.n.m (Figur). Los emplazamientos de estas estaciones tienen un único sensor multiparamétrico (Vaisala WXT520), y están situados sobre torres en su mayoría —por encima del nivel de las edificaciones o el suelo— que varían en altura desde 3 a 12 metros. Se considera que estas mediciones representan en mayor medida una influencia agregada de escala local, y en menor medida la influencia de elementos cercanos al emplazamiento de la estación. La excepción a lo anterior es la estación más alta de la red situada en el Altiplano de Santa Elena, que está a 30 metros del suelo que es representativa de la escala sinóptica. Los análisis de esta sección se enfocaron a:

- Describir la existencia de diferentes regímenes climáticos y la ocurrencia del efecto isla de calor desde una modificación en el gradiente altitudinal de temperatura.
- Establecer un estado de referencia de escala local para detectar diferencias respecto a mediciones micro climáticas en el dosel urbano.

El análisis de estos datos requirió un remuestreo a escala horaria y diurna (mínimos, medios y máximos). Luego se obtuvieron regresiones lineales entre la altura del sensor y los estadísticos diurnos y mensuales de temperatura, bajo los cuales se analizó el gradiente térmico.

Posteriormente, para obtener una clasificación Köppen-Geiger de la región (Peel et al., 2007), se hizo uso de una climatología de precipitación derivada de datos de radar meteorológico (Sepúlveda, 2015) y de mapas

de temperatura media mensuales obtenidos a partir de los coeficientes de la regresión. Para esto se hizo uso de un modelo digital de elevación ALOS-1 PALSAR RTC remuestrado a 30m (ASF DAAC, 2015).

Por último, para analizar las implicaciones energéticas del comportamiento medio de temperatura y humedad, a lo largo del día y del año, se emplearon diagramas psicrométricos. Este tipo de diagramas permiten analizar el estado termodinámico de la mezcla de aire seco con vapor de agua. Aquí se usa el diagrama basado en las ecuaciones de ASHRAE (2009) empleando el paquete de Python 3: Psychrochart.

3.1.2 Proyecto Ciudadanos Científicos V2 (CC)

El proyecto Ciudadanos Científicos V2 es un proyecto de ciencia ciudadana de SIATA, el cual inicia en 2015 con la implementación de 100 sensores de bajo costo desarrollados por el proyecto de PM2.5, PM10, temperatura y humedad relativa. Para el 2018 en su versión 2 amplía su cobertura y aumenta el número de sensores a 250, y cambia los sensores de temperatura y humedad por unos más robustos (Davis Temperature/Humidity Sensor 6830). Estos sensores se encuentran distribuidos por todo el Valle de Aburrá (Figur), principalmente en altitudes entre 1400 y 1800 m.s.n.m, y en fachadas, balcones y terrazas de edificaciones en contacto con el exterior entre los pisos 1 y 4 de altura.

En estas mediciones, al igual que las de la **sección 3.2** cobran interés los rasgos individualizados del entorno de medición, por lo que se asume que son mediciones influenciadas por la geometría urbana, la cobertura vegetal, la altura de la medición respecto al piso y nivel del mar, y cercanía a fuentes de calor.

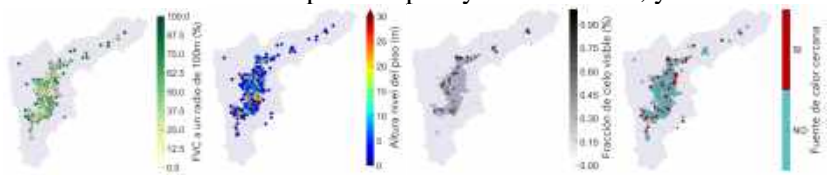

Figura 2 – Ubicación sensores del proyecto Ciudadanos Científicos V2. Atributos de izquierda a derecha: Fracción de cobertura vegetal, altura del piso al sensor, fracción de cielo visible, fuentes de calor cerca al sensor.

Con estos datos se hizo un análisis similar al de la **sección 3.1.a** en cuanto a que se revisó la relación de los valores medios de temperatura y humedad con la altura. Estos gradientes se compararon respecto al observado en las estaciones meteorológicas. También, se hizo uso de diagramas psicrométricos para analizar la variación a lo largo del día de estas dos variables, esta vez separando las mediciones en rangos por altura sobre el nivel del mar. Para esta sección se tienen en cuenta datos entre mayo y diciembre del 2018.

3.2 Campaña con sensores multiparamétricos (CMP)

Esta campaña se realiza con el objetivo de medir microclimas determinados por unas propiedades superficiales contrastantes en el Valle de Aburrá, en términos de geometría urbana, tipos de materiales y cobertura vegetal. Para estas mediciones, el análisis se centró en las variables objetivas involucradas en el ambiente térmico humano: **Temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación** (Parsons, 2014).

La elección de los sitios de medición se hizo a partir de los resultados obtenidos del análisis de temperatura superficial (Ts) con datos de Landsat 8 (Guzmán, 2018), eligiendo sitios con: altas Ts, Ts moderadas y alta densidad de vegetación, y Ts moderadas con baja densidad de vegetación. Además, se buscó aislar el efecto de la topografía en las mediciones, por ende, se escogieron sitios en la base del Valle (ciudad de Medellín) con alturas que rondan entre 1470 y 1543 m.s.n.m (Ver, Figur).

La campaña inició en marzo del 2017 y finalizó en abril del 2018, y se emplearon dos sensores Thiess Clima sensor US con los que se realizaron mediciones simultáneas. La campaña inició con una medición piloto (medición 1) de 6 mesess, luego en los siguientes sitios se realizaron mediciones simultáneas por pares (un sitio con vegetación escasa y otro con vegetación abundante) con una duración entre 2 y 3 meses por sitio. El cambio de lugar de los sensores no fue simultáneo, se contó con una diferencia de 20 días entre cambio de lugares para contar con datos de traslapo entre 3 lugares. Estas mediciones se hicieron en espacios exteriores a 1.5 m de separación de la fachada, y en su mayoría, a 7 metros de altura del suelo (2 o 3 planta). Para mayor detalle del entorno de las mediciones remitirse a Guzmán (2018), Anexo A.



Figura 3 – Metadatos sitios de medición CMP, agrupados en: cañón urbano cerrado (tono gris), sitios con poca vegetación (colores cálidos), sitios con vegetación (colores verdes). En las fotografías de tipo ojo de pescado las líneas rosas corresponden a las rutas solares durante el tiempo de medición. Los puntos rojos corresponden a la ubicación del sensor en cada lugar.

En este apartado se realizaron análisis más detallados, y se examinaron los siguientes aspectos:

- Comparación del microclima de cada lugar respecto a las mediciones de la estación meteorológica más cercana, a través de estadísticos descriptivos y de los ciclos diurnos de cada variable (la radiación se obtuvo a través de una regresión de iluminancia horaria, para más detalle consultar (Guzmán, 2018)).
- Análisis de las posibles implicaciones en el confort térmico de la población de cada microclima mediante análisis cuantitativos (diagramas psicrométricos y estimación de índices térmicos). Para lo último, se empleó el modelo RayMan Pro (Matzarakis et al., 2010), y se analizó temperatura media radiante, una modificación de la temperatura fisiológica equivalente (mPET) y el índice Universal Thermal Climate Index (UTCI).
- Variaciones en el microclima de acuerdo con la disponibilidad energética, a través de la respuesta en la amplitud térmica.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Efectos urbanos en el contexto térmico local del Valle

El sistema de clasificación del clima Köppen-Geiger clasifica el clima de un lugar de acuerdo a los valores medios mensuales y la estacionalidad de la precipitación y temperatura. En el Valle el mes más seco del año no presenta en promedio menos de 60 mm, por ende, la mayoría se clasifica en categorías asociadas a lugares húmedos con precipitación constante a lo largo de año (Af: tropical húmedo y Cfb: Templado, sin estación seca, verano suave). La categorización del clima del Valle según este sistema se da en base principalmente a la isoterma 18°C, ya que la media mensual de temperatura no varía en más de 1°C a lo largo del año. Las estaciones de SIATA en su mayoría están se sitúan en clima Af en zona urbanas y periurbanas con temperaturas medias que no superan los 23°C. Aquellas estaciones de tipo Cfb, se encuentran en zonas rurales o periurbanas por encima de los 2000 m.s.n.m.

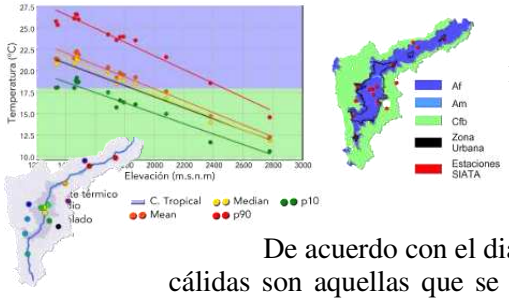

Figura 4 – Izquierda: Relación entre la temperatura y altura de las estaciones de la red meteorológica de SIATA (los colores del fondo corresponden a categorías: tropical y templado de la clasificación Köppen-Geiger). Derecha: Clasificación Köppen-Geiger en el Valle de Aburrá (Línea negra: zona urbana, puntos rojos: estaciones de SIATA).

De acuerdo con el diagrama de dispersión entre altura y temperatura las estaciones más cálidas son aquellas que se ubican en la zona urbanizada del centro del Valle entre 1400 y 1600 m.s.n.m (Figura 5), razón por la cual la pendiente de la regresión de las temperaturas medias es cercana a -0.7 K/km. Esta modificación del gradiente de temperatura ambiental promedio (0.65 K/km) se puede considerar como una expresión del efecto isla de calor urbano, ya que las estaciones ubicadas por debajo de 1400 m.s.n.m al norte del Valle no son las más cálidas, y estas pertenecen a zonas con menor densidad poblacional o periurbanas (Figura 5).

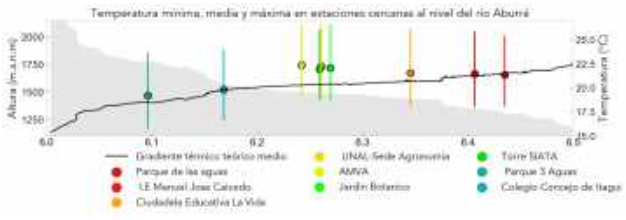

Figura 5 - Relación temperatura (percentil 10, media, percentil 90) - altura de las estaciones de SIATA cercanas al eje del río Aburrá. La comparación entre el gradiente térmico teórico (línea negra) que muestra que las estaciones del centro del Valle (la zona más urbanizada) son más cálidas respecto a la temperatura de referencia que las otras ubicadas en zonas con menor densidad poblacional.

A través del uso de diagramas psicrométricos se analizan las variaciones a lo largo del año y del día de cada estación. (Figura 6, izquierda y derecha respectivamente). Lo primero que salta a la vista es que son

mayores las variaciones del estado del aire a lo largo del día, que, a lo largo del año, con amplitudes térmicas promedio que rondan entre 5 y 9°C, y medias mensuales que no varían ampliamente.

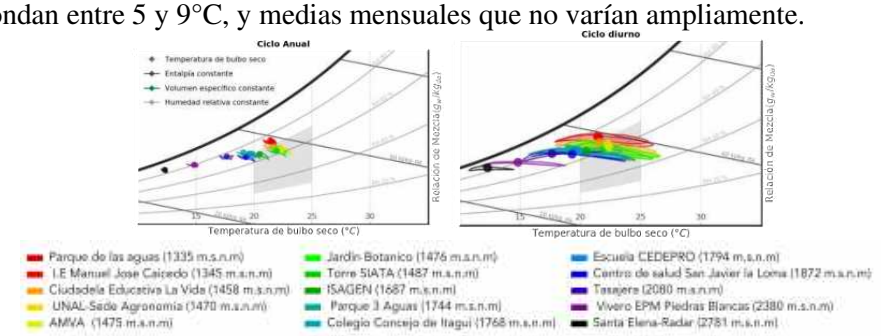

Figura 6 – Diagramas psicrométricos del ciclo anual (izquierda) y ciclo diurno (derecha) de humedad relativa y temperatura. Los colores de los polígonos son únicos por estación y varían de acuerdo con su altura en m.s.n.m.

Adicionalmente si se compara el comportamiento medio anual y diurno, respecto a la desviación de una zona de confort (área gris en Figura 6), se puede reafirmar que la altura determina el tipo de clima dado que ubica el comportamiento mensual de las estaciones de clima temperado (Cfb) en zonas frías y húmedas; y a medida que baja la altura, ubica las estaciones dentro de la zona de confort o en un estado ligeramente húmedo. Lo que permite concluir que el clima del Valle de Aburrá es muy deseable por su cercanía a la zona de confort. Sin embargo, al observar el comportamiento de los ciclos diurnos, se puede notar que dependiendo del momento del día las condiciones pueden ser confortables o no.

Separando las estaciones por rangos de altura, y sin tener en cuenta el efecto del viento y la radiación, se puede intuir que:

- Las estaciones ubicadas en el corregimiento de Santa Elena en Medellín (a alturas mayores de 2100 m.s.n.m) tienen condiciones de frías y húmedas todo el tiempo.
- Las estaciones ubicadas entre 1500 y 2100 m.s.n.m, durante el día presentan condiciones que se incluyen dentro de la zona de confort y durante la noche tienen condiciones frías y húmedas.
- Las condiciones térmicas de las estaciones ubicadas en la base del Valle hasta una altura de 1450 m.s.n.m permanecen la mayoría del tiempo dentro de la zona de confort. Sin embargo, unas pocas horas durante las madrugadas se presentan condiciones frías y húmedas y cerca al mediodía se dan condiciones cálidas.
- Las estaciones ubicadas en la parte norte, a una altura menor a 1400 m.s.n.m, durante el día permanecen dentro de condiciones de confort con unas pocas horas cerca al mediodía con condiciones cálidas.

Por ende, para el Valle de Aburrá dependiendo de la altitud, y el grado de urbanización del lugar, se pueden pensar estrategias diferentes para el acondicionamiento ambiental de edificaciones y espacios públicos.

4.2 Meteorología en el dosel urbano: análisis regional (Datos CC)

En este apartado, extendemos el análisis a datos micro climáticos distribuidos por todo el Valle. Para estudiar los mismos aspectos de la sección 4.1 se agruparon los sitios de medición por rangos de altura de 100 m Figura 7). En este caso, los diagramas psicrométricos muestran ciclos diurnos aplanados, lo cual significa que estas mediciones, que están más cerca de la superficie, miden procesos que están asociados a un mayor intercambio de calor sensible que las estaciones meteorológicas de SIATA. Respecto a las estaciones, las amplitudes térmicas son más grandes, y la humedad, aunque es mayor tiene una amplitud más pequeña. Este set de datos también muestra más tiempo del día por fuera de la zona de referencia de confort térmico (especialmente cerca del medio día) con temperaturas que superan los 30°C en condiciones medias, situación que no ocurre en las estaciones meteorológicas.

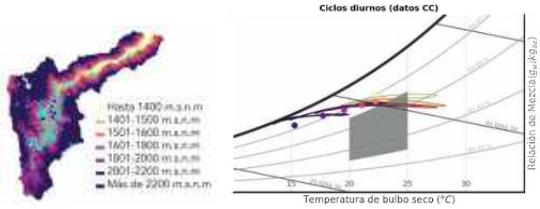

Figura 7 – Izquierda: ubicación de los 250 sensores del proyecto Ciudadanos Científicos V2 (cyan) y de los sensores de la campaña multiparamétrica (Azul). Derecha: diagramas psicrométricos con el ciclo diurno de humedad relativa y temperatura por rangos de altura.

Lo observado con el diagrama psicrométrico para CC se confirma con el análisis del gradiente altitudinal de la temperatura y la humedad (Figura 8). Comparando estos gradientes con el de las estaciones, en todos los rangos de altura predominan mediciones más cálidas y húmedas en el dosel urbano. Los puntos negros de estas figuras corresponden a las mediciones de la CMP, los cuales se incluyen para poner de

manifiesto que las diferencias de temperatura y humedad en alturas similares tienen mucho que ver con las características propias de cada entorno de medición.

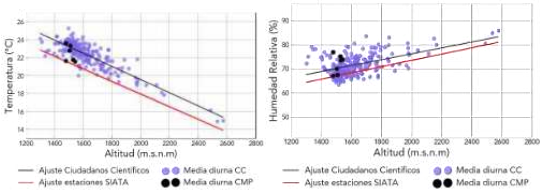

Figura 8 – Diagrama de dispersión entre la temperatura (izquierda) y humedad relativa (derecha) media diurna y la altura del sensor. En colores: datos CC (purpura) y CMP (negro), ajuste lineal en estaciones SIATA (Rojo), Ajuste lineal en sensores CC (negro).

Para remover el efecto de los cambios de elevación y cuantificar las diferencias de los 250 sitios de acuerdo a una desviación del gradiente termico local, se remueve la tendencia de la altura de las estaciones de SIATA a los datos medios de CC. En la Figura 8, se puede notar que la dispersión en las medias a una altura fija es bastante grande. Por ejemplo, para alturas entre 1400 y1600 m.s.n.m la media de temperatura en el dosel urbano aumenta del valor de la estación en promedio 1.8°C, pero puede variar entre -1 y 4°C. Para explicar esto se acude a las distintas propiedades de cada entorno de medición (Figura 9), pero en este caso no es muy clara la relación. Lo cual podría indicar que no hay un único factor dominante que explique el efecto urbano en cada sitio de medición.

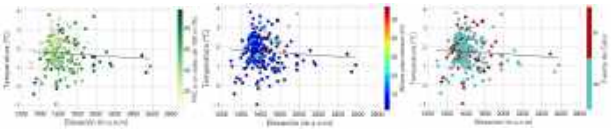

Figura 9 – Diagrama de dispersión entre altitud y temperatura con tendencia removida (de estaciones meteorológicas) para descontar efectos por cambios en la elevación. Los puntos en cada grafico varían en una escala de color de acuerdo con (de izquierda a derecha) altura piso-sensor, fracción de cobertura vegetal 100 m a la redonda, y fuentes de calor cercanas a la ubicación del sensor.

4.3 Meteorología en el dosel urbano: microclima en un rango de altura similar y diseño urbano contrastante (CMP)

El entorno de medición y las formas de instalación en los datos de CC son muy diversas (balcones, fachadas o terrazas), en esta sección se abordan específicamente variaciones microclimáticas en entornos contastantes, con mediciones más controladas en cuanto al emplazamiento y ubicación del sensor en altura.

Para facilitar la interpretación de los resultados de esta sección, se agrupan los sitios de medición en tres categorías de acuerdo con la escala de color mostrada en la Figura 3. El sitio correspondiente a **cañón cerrado** se mostrará en gris, los **sitios con poca vegetación** se mostrarán en colores cálidos, y **los sitios con vegetación** se muestran en escala de verdes. El color más verde, pertenece al sitio con más vegetación y el color más rojo al sitio con más superficies impermeables.

4.3.1. Estadísticos descriptivos y variaciones a lo largo del día

El primer aspecto que se revisó en cada lugar fueron los estadísticos descriptivos y su ciclo diurno, comparando estos con los datos para el mismo periodo de tiempo de la estación meteorológica más cercana (Figura 10). A pesar de que las mediciones fueron en diferentes épocas del año, las mediciones de referencia de las estaciones entre sí mostraron pocas variaciones de temperatura y humedad, y una variación un poco mayor en velocidad del viento e irradiación total diurna (no mostrado).

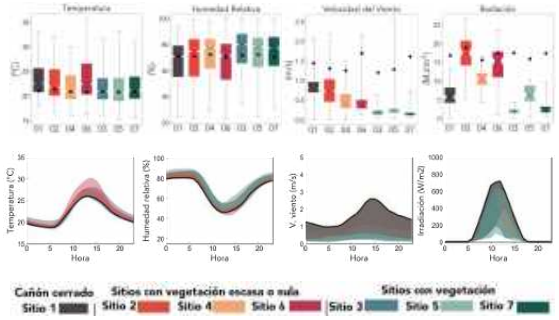

Figura 10 – Arriba: diagrama de cajas a partir de datos minutales de la campaña multiparamétrica, los puntos negros corresponden al valor medio para el mismo periodo de tiempo de la estación meteorológica más cercana. Abajo: desviación del ciclo diurno para cada lugar de medición en el dosel urbano respecto al valor de la estación meteorológica (línea negra). De izquierda a derecha: temperatura, humedad relativa, radiación y velocidad del viento.

Al comparar las mediciones del dosel urbano frente a las estaciones (Figura 10 puntos negros y 10), se notaron los siguientes patrones.

- La temperatura del dosel urbano (al igual que en la sección 4.2) es más alta que la medida en las estaciones, especialmente durante el día. Las temperaturas más altas se dan en sitios con poca vegetación y prevalencia de materiales impermeables (mediciones 1,2,6). La única medición que presenta temperaturas considerablemente más cálidas durante todo el día y la noche es la medición

del cañón urbano cerrado. Los sitios con sombra de vegetación sobre el sensor (mediciones 5,7) presentan temperaturas similares a las estaciones meteorológicas.

- El entorno en el dosel urbano tiende a ser un más húmedo que el de las estaciones, siendo más húmedo en los sitios con más vegetación. Sólo en los lugares con vegetación nula (mediciones 1,6) la humedad tendió a ser igual o incluso un poco menor a las estaciones.
- La radiación se vio altamente condicionada por el acceso solar de cada sitio, por ende, aquellos más abiertos (mediciones 2,6) presentaron valores más cercanos a las estaciones. En el resto de los lugares la radiación varió de acuerdo con la ubicación de los obstáculos (como edificaciones y árboles) con picos en las horas de exposición directa al sol.

4.3.2. Implicaciones en términos de confort térmico en espacios exteriores a través de análisis cuantitativos

Las variaciones descritas (sección 4.3.1) indican que cada lugar tiene un comportamiento micro climático característico, influenciado por aspectos como la geometría urbana, la cantidad de vegetación, y materiales de construcción. Si se tienen en cuenta los factores fundamentales que definen el ambiente térmico en humanos (Parsons, 2014), entonces cada entorno de medición influencia de manera única cómo la población puede percibir su microclima. En este apartado, se analizan las posibles implicaciones en confort térmico en exteriores a través de análisis cuantitativos, con el diagrama psicrométrico, pero se añade además el uso de índices térmicos como mPET (Chen; Matzarakis, 2017) y UTCI (Błazejczyk et al., 2013). Estos índices en su planteamiento teórico tienen en cuenta los flujos individuales de calor del balance energético humano.

Los ciclos diurnos en el diagrama psicrométrico (Figura 11) muestran las diferencias micro climáticas que se pueden inducir cuando la vegetación hace parte del entorno (mediciones 3,4,7) y cuando hay ausencia de esta (1,2,6). Las zonas con vegetación presentan condiciones dentro la zona de confort durante gran parte del día, y en la noche, madrugada y primeras horas de la mañana muestran condiciones húmedas. En las zonas con vegetación escasa, el comportamiento es más variable, pero tiende a presentar condiciones cálidas durante más tiempo. Aquí se presta especial atención a la medición 6, ya que tiene una amplitud térmica mayor, a causa de que allí prevalecen superficies impermeables (calles asfaltadas) que alcanzan altas temperaturas en el día. Otra forma de analizar este diagrama es mediante la cantidad de tiempo en qué un lugar está o no dentro de condiciones confortables. En este caso analizando sólo la temperatura (Figura 11, derecha), se puede notar de una mejor manera contraste entre las categorías con y sin vegetación. Aquí es especialmente notable la medición en el cañón cerrado (medición 1) que, si bien presenta un mayor número de horas bajo temperaturas confortables, no presenta horas frías, y un número de horas cálidas similar al de las otras mediciones con vegetación escasa. Esto es resultado del balance radiativo dado por su geometría, donde en horas de la noche es posible que no se dé una liberación de calor de onda larga eficiente.

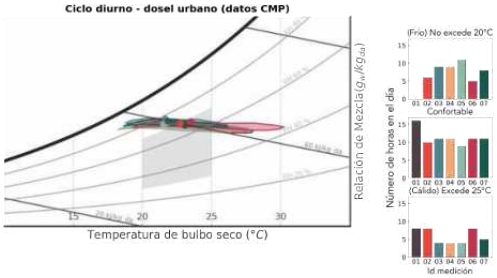

Figura 11 – diagrama psicrométrico con el ciclo diurno de humedad relativa y temperatura para cada lugar de medición de la campaña multiparamétrica. Los colores de cada polígono corresponden a la leyenda de Figura 2 y 8.

Por otra parte, los índices térmicos confirman lo que muestran los diagramas psicométricos, ya que manifiestan condiciones térmicas cercanas al confort térmico en el dosel urbano durante gran parte del día —especialmente el UTCI—, con particularidades que varían entre sitios con y sin vegetación. También, se nota el contraste entre el comportamiento de los índices en el día y la noche de las estaciones meteorológicas (línea negra, en Figura 12) versus los datos en el dosel.

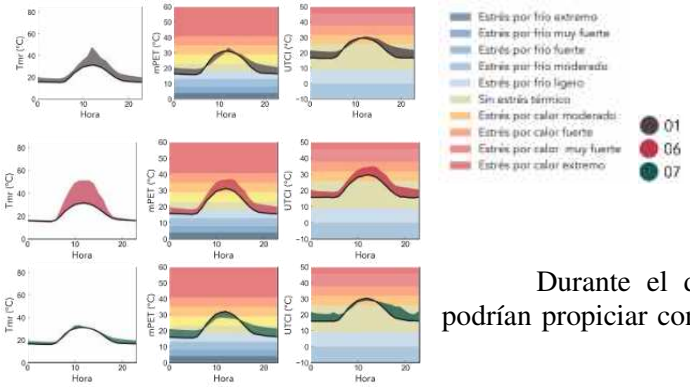

Figura 12 – desviación del ciclo diurno de temperatura media radiante, mPET y UTCI para las mediciones 01, 06, 07 (los lugares más contrastantes de la campaña) respecto al valor de la estación meteorológica (línea negra). Los colores del fondo corresponden a las categorías estándar de estrés térmico para los índices PET y UTCI.

Durante el día los sitios sin vegetación, más que los otros, podrían propiciar condiciones térmicas que induzcan estrés térmico por

calor, especialmente en las horas pico de radiación de cada lugar, lo cual puede estar ligado a la carga térmica impuesta por la radiación incidente (Tmrt: temperatura radiante media, en Figura 12). Asimismo, los rangos alcanzados en mPET y UTCI, muestran que los lugares sin vegetación se calientan y enfrían más durante el día, o al menos pueden producir sensaciones térmicas más cambiantes a lo largo de las horas con sol. Mientras que en el sitio con vegetación y el cañón urbano cerrado (mediciones 1 y 7) se dan índices con valores más cercanos al rango "Sin estrés térmico" durante todo el día, por ende, son lugares con una mejor regulación térmica.

Durante la noche los resultados de PET (no mostrado), mPET, y UTCI están dentro o cerca del rango "Sin estrés térmico" y muestran valores más altos que los índices de las estaciones (que alcanzan valores de estrés por frío ligero), por ende, la sensación térmica en el dosel urbano es un poco más cálida que aquella dada por encima del nivel de techo.

4.3.3. Cambios en el microclima de acuerdo con la disponibilidad energética en el dosel urbano

En este apartado, se analiza la disponibilidad energética de cada lugar de medición en función de la geometría del entorno. Con datos de la red meteorológica de SIATA se evidenció una relación directa entre la amplitud térmica y la irradiación diurna, es decir que el cambio de temperatura entre la madrugada y la tarde es una respuesta a la disponibilidad energética del lugar durante el día (Guzmán, 2018). Esto también se confirma para los datos de esta campaña (Figura 13) donde, además, se puede notar que cada sitio de medición presenta un comportamiento particular. En este caso, las mayores irradiaciones y amplitudes térmicas se presentan en los espacios abiertos (mayor porción de cielo visible) y con menor vegetación (mediciones 2,4,6); mientras que las menores irradiaciones se dan en los lugares con más obstáculos (sitios con vegetación). El cañón cerrado presenta un comportamiento intermedio entre los sitios con y sin vegetación.

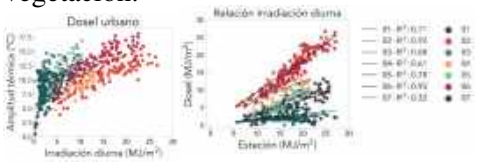

Figura 13 Relación entre la irradiación diurna y la amplitud térmica para variables medidas en el dosel urbano (izquierda). Regresión lineal entre la irradiación diurna medida dentro y fuera del dosel con el respectivo coeficiente de Pearson.

El comportamiento descrito en la Figura 13 implica que para días con cielo despejado se darán amplitudes térmicas más altas, y por ende se podrán alcanzar mayores temperaturas especialmente en sitios con alto acceso solar en el dosel urbano. Por ende, se pueden pronunciar los efectos urbanos descritos en la sección la sección 4.3.1. Un caso claro es la temperatura, porque en estaciones el promedio máximo diurno en Medellín no supera los 28°C, aunque en condiciones de cielo despejado se han alcanzado temperaturas de hasta 32°C. Pero en promedio, en un día despejado en el dosel urbano se pueden encontrar entre 28.4 y 33.6 °C, con mayores temperaturas en las mediciones 1, 5 y 6 asociado a las horas pico de radiación. Esto se describe con más detalle en los capitulos 4 y 5 de Guzmán (2018).

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A través del uso de datos representativos de una escala climática local y micro climática fue posible analizar efectos urbanos en distintas variables meteorológicas en el Valle de Aburrá. Teniendo en cuenta la topografía del Valle se examinó el comportamiento térmico en relación con la altura, y se encontró que hay modificaciones del gradiente de temperatura que responden al entorno de medición, y que el dosel urbano tiende a mostrar mediciones más cálidas y húmedas (Datos CC y CMP) que las mediciones realizadas por encima de este (Datos estaciones meteorológicas de SIATA).

A través del análisis de casos de estudio en sitios con alturas similares, pero con distintas configuraciones urbanas (datos CMP), se encontró que la meteorología en el dosel urbano (y posiblemente la sensación térmica) varía en función principalmente del acceso solar, debido a la geometría urbana, el tipo de coberturas y la vegetación situada alrededor de los sensores.

Por ende, los resultados hallados plantean la posibilidad de pensar en estrategias de diseño urbano, tanto para edificaciones como espacios públicos que aprovechen el clima del Valle, con sus complejidades, como criterio básico de diseño. De acuerdo con los resultados de esta investigación por rangos de altura se podría proponer lo siguiente:

- En lugares situados en la zona de clima frío y húmedo (alturas mayores a ~2000 m.s.n.m y tipo de clima Cfb) es recomendable usar estrategias para la noche que propicien la conservación del calor sensible del día, y para el día que disminuyan la exposición al viento en ambientes al aire libre.

- Entre 1500 y 2100 m.s.n.m las condiciones térmicas durante la mayor parte del día son deseables (de acuerdo con los referentes de confort térmico) y las noches son un poco más frías y húmedas, por lo que se recomienda propiciar espacios que conserven calor sensible del día y que generen sombra en las horas de mayor radiación.
- Para lugares situados hasta ~1450 m.s.n.m, dependiendo del grado de cobertura vegetal y de superficies impermeables en el entorno, las estrategias de diseño urbano podrían enfocarse a evitar disconfort por calor. Por ende, para las horas de mayor carga térmica, se puede propiciar espacios en los que se eviten altas temperaturas superficiales, y especialmente que minimicen el almacenamiento de calor sensible del día. Se recomienda también propiciar sombra (a través de vegetación y disposición de elementos con materiales de buena inercia térmica) y remoción convectiva de calor a través de la ventilación natural.

Dicho lo anterior, no hay que perder de vista que el Valle de Aburrá cuenta con un régimen climático deseable, puesto que las variaciones en el comportamiento mensual de temperatura y humedad relativa en las zonas urbanas tienden a estar cerca de referentes de confort térmico. Por lo que dependiendo de las necesidades de aclimatación una estrategia enfocada a mejorar el microclima para una porción dada del día puede funcionar durante todo el año, siendo más relevante conocer el comportamiento a escala subdiaria que mensual.

Cabe mencionar que la discusión generada en este estudio está más enfocado al microclima en espacios exteriores, y que para extender el alcance a espacios interiores se requiere de otro tipo mediciones y análisis. Para generar espacios interiores energéticamente eficientes el microclima exterior (no sólo el dato promedio de las estaciones climáticas de aeropuertos) condiciona, por ejemplo, el tipo de diseño bioclimático a emplear, por ende, es un dato válido y necesario, pero no es el único criterio a tomar en cuenta (otros pueden ser limitaciones de espacio, limitantes de ruido externo, calidad de aire, tipos de materiales).

Para futuros trabajos se propone realizar un análisis de exposición de la población a diferentes microclimas en sus rutinas diarias (con una mejor representación de la temperatura media radiante), que permita alimentar el debate sobre cuál es el clima que se considera para diseñar. Esto último siendo relevante al considerar las tendencias locales de cambio climático y la inexistencia de una línea base de estudios en confort térmico que soporte las acciones de adaptación climática locales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASF DAAC. Dataset: ASF DAAC 2015, ALOS-1 PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_low_res; Includes Material © JAXA/METI 2007. , 2015.

ASHRAE. **2009 ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI Edition)**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2009.

BŁAZEJCZYK, K.; JENDRITZKY, G.; BRÖDE, P.; et al. An introduction to the Universal thermal climate index (UTCI). **Geographia Polonica**, v. 86, n. 1, p. 5–10, 2013.

CHEN, Y. C.; MATZARAKIS, A. Modified physiologically equivalent temperature—basics and applications for western European climate. **Theoretical and Applied Climatology**, , n. 128, p. 1–15, 2017. Theoretical and Applied Climatology.

GUZMÁN, G. **Análisis de la influencia del diseño urbano en el Valle de Aburrá**, 2018. Universidad Nacional de Colombia. Disponível em: <http://bdigital.unal.edu.co/71197/>. .

GUZMÁN, G.; HOYOS, C.; BOTERO, V. Associating Land Surface Temperature Retrieved From Satellite and Unmanned Aerial System With Urban Cover and Topography in Aburrá Valley (In prep). , 2019.

JOHANSSON, E.; THORSSON, S.; EMMANUEL, R.; KRÜGER, E. Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies - The need for standardization. **Urban Climate**, v. 10, n. P2, p. 346–366, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2013.12.002>. .

LOWRY, W. P. Empirical estimation of urban effects on climate: A Problem Analysis. **Journal of Applied Meteorology**, v. 16, n. 2, p. 129–135, 1997.

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model. **International Journal of Biometeorology**, v. 54, n. 2, p. 131–139, 2010.

OKE, T. . The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, p. 1–24, 1982.

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. **Urban Climates**. 1º ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

PARSONS, K. **Human Thermal Environments**. Third edit ed. CRC Press, 2014.

PEEL, M. C.; MCMAHON, T. A.; FINLAYSON, B. L. Updated world map of the K öppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633–1644, 2007.

SAARONI, H.; ZIV, B. Estimating the urban heat island contribution to urban and rural air temperature differences over complex terrain: Application to an Arid city. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 49, n. 10, p. 2159–2166, 2010.

SEPÚLVEDA, J. **Estimación cuantitativa de precipitación a partir de la información de Radar Meteorológico del Area Metropolitana del Valle de Aburrá**, 2015. Universidad Nacional de Colombia.

AGRADECIMENTOS

Este trabajo fue apoyado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), el municipio de Medellín, Grupo EPM e ISAGEN bajo el contrato CD511, 2017. Gisel Guzmán fue financiada parcialmente por la Universidad Nacional de Colombia bajo el programa de becas de la Facultad de Minas. Los autores también desean reconocer el uso de software libre que incluye Python y Matplotlib.