



Gradiente térmico en la ciudad de Medellín y su relación con el crecimiento urbano: estudio de caso¹

Silvia Andrea Quijano Pérez², Iliana María Ramírez Velásquez³, José Luis González Manosalva⁴

*Thermal gradient in the city of Medellín and its relationship with urban growth:
case study*

*Gradiente térmico na cidade de Medellín e sua relação com o crescimento
urbano: estudo de caso*

RESUMEN

Introducción. Algunas investigaciones han mostrado que el gradiente térmico observado entre los espacios urbanos densamente construidos y la periferia rural está asociado con la expansión urbana en las grandes ciudades, y es el resultado de la modificación en la cobertura del suelo debido al proceso de urbanización y de actividades como el transporte y la industria. El Valle de Aburrá ha sufrido un cambio notorio en el aumento de la temperatura en las últimas décadas. Sin embargo, hacen falta estudios cuantitativos que evidencien la influencia del crecimiento urbano sobre la temperatura de la ciudad, a través de modelos que permitan estimar predicciones que apoyen la generación de herramientas y estrategias de planificación territorial. **Objetivo.** Se pretende evaluar el grado de asociación entre los cambios de temperatura en la ciudad y el crecimiento urbano. **Materiales y métodos.** Se utilizaron imágenes satelitales Landsat obtenidas del USGS entre 2010 y 2014 para estimar la temperatura superficial. La temperatura atmosférica se obtuvo de registro de seis estaciones meteorológicas. **Resultados.** No hubo diferencia entre los sistemas de medición de la temperatura (superficial y atmosférica) y se evidenciaron variaciones de la temperatura atmosférica entre estaciones. Mediante un modelo descriptivo se encontró una asociación entre el área construida y las temperaturas superficiales, identificándose zonas de alto grado de densificación con aumentos evidentes de la temperatura mediados por los usos del suelo. **Conclusiones.** Se encontró una asociación entre el área construida y las temperaturas superficiales, identificando áreas de alto grado de densificación con evidentes aumentos de temperatura causados por el uso del suelo

Palabras clave: percepción remota, área construida, temperatura superficial y atmosférica, clima urbano, Medellín.

¹ Reporte de caso Instituto Tecnológico Metropolitano

² Bióloga, PhD en Ciencias, Mención Sistemática y Ecología, Docente Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Santiago de Cali, saquijanoperez@gmail.com ORCID: 0000-0002-6371-3038

³ Física, magíster en Automatización y Control Industrial, docente Instituto Tecnológico Metropolitano, Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas, ilianaramirez@itm.edu.co ORCID: 0000-0001-9779-4019

⁴ José Luis González Manosalva, Ingeniero civil, ingeniero Sanitario. Especialista en Gestión Ambiental, candidato a magíster Medio Ambiente y Desarrollo. Jefe de Oficina Departamento de Ciencias Ambientales y de la Construcción, Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas Instituto Tecnológico Metropolitano, jlgonzal@unal.edu.co ORCID: 0000-0002-0625-3362

ABSTRACT

Introduction. Some research has shown that the thermal gradient observed between densely built urban areas and the rural periphery is associated with urban expansion in large cities and is the result of the change in land cover due to urbanization and various activities such as transport and industry. It has been shown that the Aburrá Valley has suffered a remarkable change in temperature increase in the last decades. However, quantitative studies are needed to demonstrate the influence of urban growth on the city temperature through models that allow estimating predictions and supporting the generation of tools and strategies for territorial planning. **Objective.** Evaluate the relationship between changes in the city temperatures and urban growth. **Materials and**

methods. To estimate surface temperature, we used USGS Landsat satellite images from 2010 to 2014. The atmospheric temperature was obtained from six local weather stations. **Results.** There was no difference between the two temperature measurement systems (surface and air), and atmospheric temperature variations were evidenced between stations. **Conclusions.** Using a descriptive model, we found an association between the constructed area and surface temperatures, identifying areas of high degree of densification with evident increases in temperature caused by land uses.

Keywords: remote perception, constructed area, surface and atmospheric temperature, urban climate, Medellín.

RESUMO

Introdução. Algumas investigações há mostrado que o gradiente térmico observado entre os espaços urbanos densamente construídos e a periferia rural está associada com a expansão urbana nas grandes cidades, e é o resultado da modificação na cobertura do solo devido ao processo de urbanização e de atividades como o transporte e a indústria. O Vale de Aburrá há sofrido um câmbio notório no aumento da temperatura nas últimas décadas. Embora, faz falta estudos quantitativos que evidenciem a influência do crescimento urbano sobre a temperatura da cidade, através de modelos que permitam estimar predições que apoiem a geração de ferramentas e estratégias de planificação territorial. **Objetivo.** Se pretende avaliar o grau de associação entre os câmbios de temperatura na cidade e o crescimento urbano. **Materiais e métodos.** Se utilizaram imagens de satélites Landsat obtidas do USGS entre 2010 e 2014

para estimar a temperatura superficial. A temperatura atmosférica se obteve de registro de seis estações meteorológicas. **Resultados.** Não houve diferencia entre os sistemas de medição da temperatura (superficial e atmosférica) e se evidenciaram variações da temperatura atmosférica entre estações. Mediante um modelo descritivo se encontrou uma associação entre a área construída e as temperaturas superficiais, identificando-se zonas de alto grau de adensamento com aumentos evidentes da temperatura mediados pelos usos do solo. **Conclusões.** Se encontrou uma associação entre a área construída e as temperaturas superficiais, identificando áreas de alto grau de adensamento com evidentes aumentos de temperatura causados pelo uso do solo

Palavras chave: percepção remota, área construída, temperatura superficial e atmosférica, clima urbano, Medellín.

INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento poblacional, la urbanización, la migración de la población hacia las ciudades y, por lo tanto, la expansión de las ciudades en zonas geográficamente más amplias evidencian que las ciudades, en las últimas décadas, son atractivas para vivir, en tal medida, que se estima que para el año

2025 gran parte de la población mundial vivirá en áreas urbanas (Fuentes, 2015). Esta presión antrópica supera los límites y las capacidades de las ciudades, generando un impacto que no se limita únicamente a cambiar la morfología del terreno, sino que, además, modifica y degradada las condiciones climáticas y ambientales (Grover y Singh, 2015).

Las zonas urbanas desarrollan microclimas debido a que la morfología urbana y las superficies de la ciudad se convierten en captadores y aprisionadores de energía térmica. La urbanización transforma el uso del suelo y la cobertura, modificando así el balance de energía, y haciendo que las ciudades sean más calientes que en las zonas periféricas. La presencia de este gradiente térmico observado entre los espacios urbanos densamente construidos y la periferia rural, fenómeno denominado Isla de Calor, surge tanto de la modificación en la cobertura del suelo, que resulta del proceso de urbanización transformando las superficies con materiales impermeables (asfalto y concreto), como del transporte y la industria (generación de gases efecto invernadero), que debido a las emisiones térmicas contribuyen al calentamiento urbano, y tienen consecuencias en lo ambiental, lo económico y lo social (Fuentes, 2015; Grover y Singh, 2015; Nuruzzaman, 2015).

La temperatura de la superficie terrestre ha aumentado considerablemente en los últimos años, y se destacan cambios notables en las zonas urbanas con mayor concentración poblacional. Entre mayor sea la temperatura, habrá mayor emisión de gases a la atmósfera y consecuentemente mayor consumo de energía (Fuentes, 2015). El calentamiento urbano también tiene implicaciones para la salud y el bienestar humano, lo cual se observa en estudios epidemiológicos que han mostrado una estrecha relación entre la temperatura elevada del aire y el aumento de la morbilidad y la mortalidad causado por enfermedades cardiovasculares y respiratorias (CEPAL, 2013a).

Estudiar la climatología urbana es cada día más importante debido a la tendencia mundial hacia la urbanización y el crecimiento disperso de las ciudades, aspectos que tienen implicaciones directas en la calidad del aire, la salud pública, la gestión energética y la planeación urbana. Por lo anterior, el control y manejo de los climas urbanos es una nueva tarea encomendada a la planificación y gestión ambiental de las ciudades, especialmente bajo los actuales escenarios de cambio climático; en este sentido, la transformación urbana de la ciudad debe considerar la integración de las variables medioambientales (eg. climáticas) y morfológicas a los proyectos de planeación urbana (Fuentes, 2015).

La ciudad es un sistema ambiental de gran complejidad, y generalmente los datos disponibles de clima urbano como representación de las condiciones atmosféricas y la calidad del aire carecen de significados espaciales y no constituyen series temporales valiosas, lo cual

puede implicar generalizaciones que no consideran debidamente la escala de los problemas que representan (Romero *et al.*, 2010). La teledetección es una técnica que surge como una alternativa en los estudios de clima urbano; los sensores situados en satélites o aviones captan la temperatura radiante de las superficies urbanas, lo que permite un análisis detallado de la distribución espacial de la misma y su correlación con variables urbanas. Los registros de temperatura superficial derivados de sensores remotos pueden ser de gran utilidad para analizar los patrones de expansión urbana y su impacto sobre la dinámica térmica, debido a que dicha temperatura responde de forma directa a los cambios en los patrones espaciales de cobertura del suelo (Paolini, 2012).

Al nivel mundial varios estudios sobre climatología urbana evidencian la fuerte relación entre la extensión espacial del fenómeno de isla de calor y factores como el tamaño urbano, área de desarrollo, usos del suelo, proporción de agua, deshidratación del suelo, sequedad del aire, así como de la cantidad y estrés hídrico de la vegetación. Algunas investigaciones concluyen que las temperaturas más altas de las ciudades corresponden a los lugares con mayor densidad poblacional; esta densificación genera superficies impermeables que son más calientes que las zonas verdes. Por su parte, otros trabajos muestran la relación directa entre las altas temperaturas urbanas y la falta de vegetación (CEPAL, 2013b; Fuentes, 2015; Grover y Singh, 2015; Nuruzzaman, 2015).

América Latina es la región más urbanizada del mundo; casi el 80 % de su población vive actualmente en ciudades. El proceso de urbanización en esta región ha sido uno de los más veloces, su población urbana crece 3,2 % en promedio cada cinco años, porcentaje muy superior al crecimiento de la población urbana mundial (2,6 % en 1950-2010). Las ciudades colombianas han experimentado un acelerado proceso de urbanización durante los últimos cincuenta años; según cifras censales, entre 1951 y 2005, el porcentaje de participación de la población residente en cabeceras municipales aumentó de 39,5 % a 75 %, y este, sin duda, continuará en ascenso, en tal medida que para 2020 se prevé que esta participación se encuentre alrededor de 77 %. En general, esta acelerada velocidad de urbanización ha tenido un alto costo social, económico y ambiental (CEPAL, 2013b).

En muchas ciudades de Latinoamérica, el desarrollo se ha dado a partir del centro desde el cual la urbanización se va expandiendo a medida que se requiere, donde los procesos de expansión y densificación han estado

caracterizados por una continua falta de planeación y aplicación de las normas (Ángel et al., 2010). Las ciudades de Colombia, como Medellín, no son la excepción. El Valle de Aburrá continúa creciendo: hoy hay nuevos polos de desarrollo y construcción que mueven al sector entre el norte y el sur del Área Metropolitana, sin embargo, la mayoría de proyectos de construcción aún se realizan en Medellín. El Valle de Aburrá en los últimos años ha sufrido un cambio notorio en el aumento de la temperatura en las últimas décadas: 2 °C en aproximadamente 40 años. Esta tendencia está influenciada por procesos de urbanización e industrialización, incrementos de la capa de asfalto, concreto y pisos duros en general que afectan el factor regulador de la temperatura, propio de las áreas de zonas verdes y de la arborización urbana. Adicionalmente, la población de Medellín continúa aumentando, y en promedio se ha incrementado cada año en 25.000 personas (período 2005-2012): teniendo en cuenta el área del municipio, eso significa una densidad de 6286 hab. / km² (CEPAL, 2013b, Martínez, 2017).

En Colombia, se han realizado investigaciones que evidencian la existencia del fenómeno de Isla de Calor (Ángel et al., 2010; Martínez, 2017); sin embargo, hacen falta estudios en Medellín que demuestren la influencia del crecimiento urbano sobre la temperatura de la ciudad y que consideren las variaciones espacio-temporales de la temperatura, con el fin de contribuir al conocimiento de la climatología urbana como una herramienta que permitan generar estrategias para la planificación territorial. En este estudio se analizó la diferencia entre los métodos de medición de la temperatura, se evaluó la relación entre la temperatura y el área construida de Medellín y se determinaron las variaciones de temperatura entre las estaciones meteorológicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el objetivo propuesto se utilizaron los datos de temperatura media de Medellín en el período 2010-2014, que fueron suministrados por el Laboratorio de Calidad del Aire (CALAIRE) de la Universidad Nacional de Colombia y el (IDEAM). Dicha información fue registrada en las estaciones Aeropuerto Olaya Herrera (OLAYA), Une-Casa Yalte-poblado (UNEP), Universidad de Medellín (UDEM), Universidad Nacional de Colombia (UNNV), Politécnico Jaime Isaza Cadavid (PJIC) y Museo de Antioquia (MANT).

Para estimar la temperatura superficial en los mismos puntos correspondientes a la ubicación de estaciones

meteorológicas arriba mencionadas, se utilizaron las imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y 8 suministradas por *United States Geological Service* (USGS), las cuales fueron procesadas con el *software* libre QGIS y el plugin *Semi-Automatic Classification SCP*. Estas imágenes son procesadas con el objeto de clasificar los diferentes tipos de superficie, tales como agua, vegetación, infraestructura, entre otros. El procesamiento de estas imágenes se realizó para obtener un mapa que muestre la clasificación de los distintos tipos de superficie tales como agua, vegetación, infraestructura, entre otros. Dicha clasificación se realiza por medio del algoritmo "Mínimum Distance".

Se construyó el mapa de temperaturas superficiales del área de estudio a partir de los datos que representan la emisividad del territorio (figura 1).

De esta manera se tienen dos formas o técnicas para el registro de temperatura en los puntos específicos correspondientes a la ubicación de las estaciones antes mencionadas.

Estas dos técnicas fueron comparadas mediante el análisis de regresión lineal con el método de Deming. El grado de concordancia se calculó con el método de Bland-Altman, con la finalidad de encontrar correspondencia entre las mediciones de temperatura atmosférica y temperatura superficial, ambas capturadas punto a punto: hora, fecha y posición. Los criterios a cumplir para verificar que ambas técnicas fueran estadísticamente comparables fueron los siguientes: coeficiente de correlación mayor a 0,975; el Intervalo de Confianza de 95 % de la pendiente debe incluir al uno (1) y el Intervalo de Confianza de 95 % del intercepto debe incluir al cero (0).

De otro lado, se analizó la variación de los promedios de temperatura atmosférica entre las estaciones meteorológicas, mediante el análisis de varianza de un factor, con el objeto de observar la variabilidad de temperatura con relación a la posición de las diferentes estaciones meteorológicas.

Con la información anterior y los datos del área aprobada para construcción obtenidos de las series históricas de las Estadísticas de Edificación Licencias de Construcción del DANE, se realizó la prueba estadística correlación de Spearman para explorar el grado de asociación entre las cantidades mencionadas.

Se analizó la diferencia entre los dos sistemas de medición de la temperatura, además de la variación de los promedios de temperatura atmosférica entre

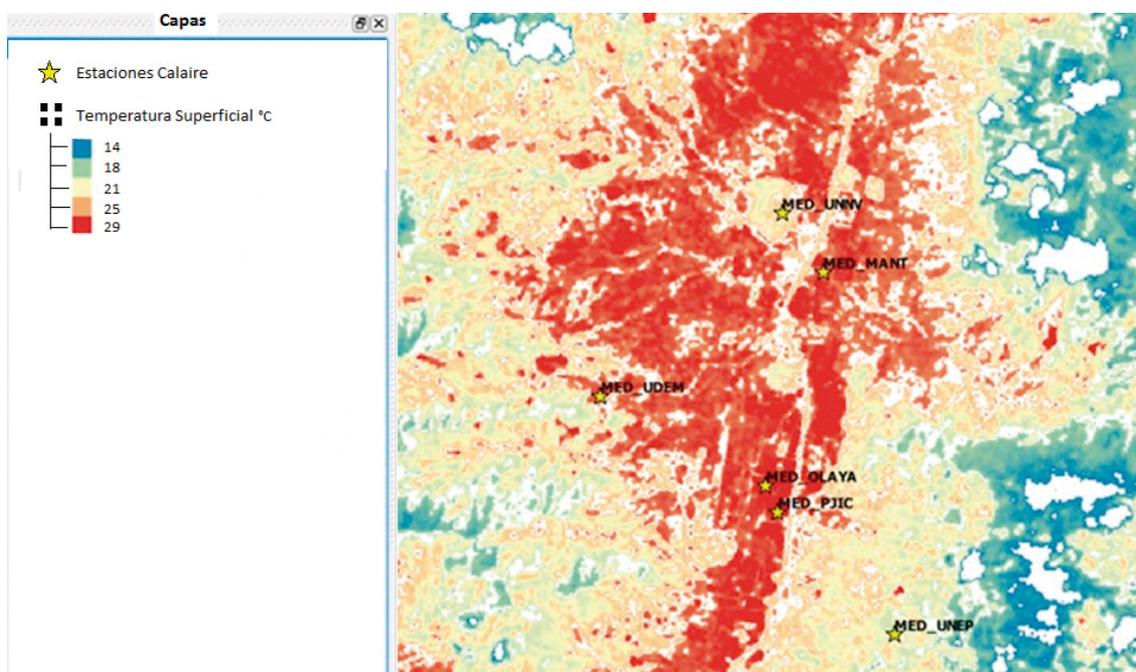


Figura 1. Mapa de temperaturas superficiales del Valle de Aburrá

Fuente: elaborado por los autores

las estaciones meteorológicas, mediante el análisis de varianza de un factor. Los cálculos y test o pruebas se realizaron con el programa estadístico SPSS (Statistical Package For Social Sciences, Waltham, USA) versión 22.0.

RESULTADOS

-Comparación de los sistemas de medición de la temperatura

A partir de un set de datos de temperaturas atmosféricas y superficiales de 2010 a 2014 registradas punto a punto, se compararon los dos sistemas de

medición. La temperatura atmosférica se consideró como el método de referencia, y la temperatura superficial como el nuevo método, presentando esta última una media y una variabilidad mayor al aplicar la regresión lineal Deming. De acuerdo con la tabla 1, el intervalo de confianza al 95 % del intercepto incluye el cero, lo que implica que la diferencia sistemática entre los dos métodos es igual a cero, es decir, no hay errores sistemáticos constantes. El intervalo de confianza al 95 % de la pendiente incluye el 1; eso significa que la diferencia proporcional entre los dos métodos es igual a 1. Se puede afirmar que no hay diferencias sistemáticas y proporcionales entre las dos técnicas.

Tabla 1. Pendiente e intercepto de la recta de comparación de los dos sistemas de medición

| | Valor | Límite inferior 95 % (Media) | Límite superior 95 % (Media) |
|------------|----------|------------------------------|------------------------------|
| Intercepto | -167,113 | -1268,644 | 934,417 |
| Pendiente | 8,126 | -37,533 | 53,786 |

Fuente: elaborado por los autores

Además, el cálculo del p-valor arrojó un resultado de 0,33, mayor que el nivel de significancia; por lo tanto, la relación entre las variables es lineal. De acuerdo con el análisis de Bland Altman, la estimación del error sistemático es de 2,9 con un intervalo de confianza del 95 % que incluye el 0, lo que confirma que la diferencia

entre las medias es igual a cero, teniendo en cuenta además el p-valor es 0,17. Para evaluar la concordancia entre los dos métodos de medida, se representó la diferencia entre cada pareja de valores frente a la media de cada pareja de valores en la figura 2.

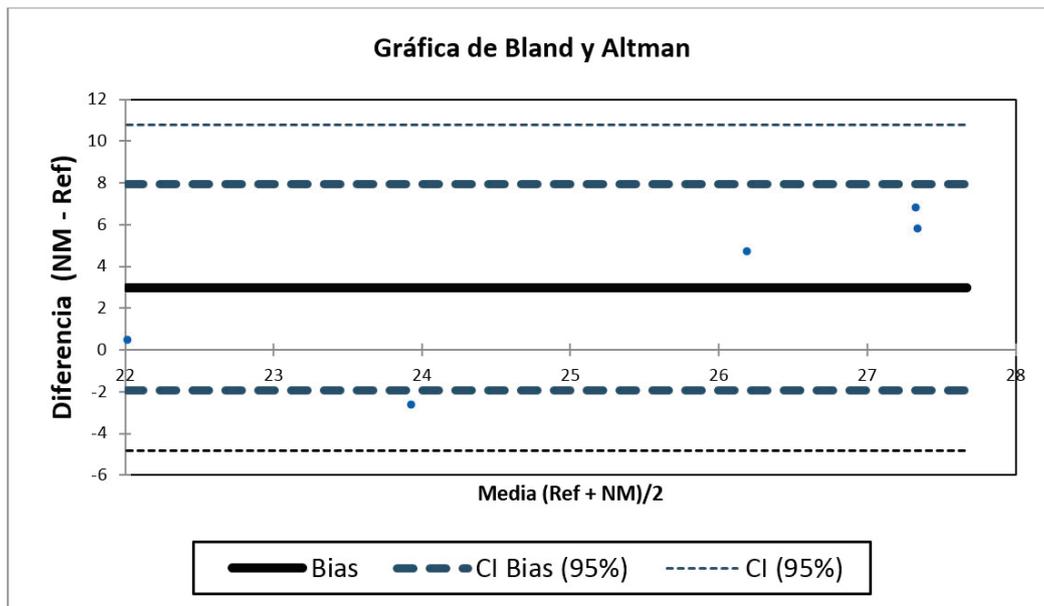


Figura 2. Método de Bland y Altman

Fuente: elaborado por los autores

Como no hay error sistemático, los puntos están distribuidos en forma aleatoria a uno y otro lado de la recta correspondiente a la diferencia 0 entre medidas (línea horizontal negra). La línea doble presenta la media de las diferencias, que en este caso corresponde a 2,9 (error sistemático del segundo método respecto al primero). Las líneas negras representan los límites de confianza del 95 % para esa diferencia, y se denominan límites de concordancia. A su vez, las líneas punteadas representan el límite confianza inferior para cada límite de concordancia. El cálculo del factor de correlación de Pearson fue de 0,83.

La media de temperatura superficial (25,3 °C) fue mayor que la media de la temperatura atmosférica (24,4 °C); sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre ambas (figura 3).

-Variación de temperaturas atmosféricas entre estaciones meteorológicas

Se tomaron los promedios de temperatura de cinco estaciones meteorológicas durante el período septiembre 2012-diciembre 2013. Los promedios de temperatura variaron desde 19,6 °C (UNEP) hasta 23,5 °C (OLAYA). Los resultados del análisis de varianza muestran diferencias significativas del promedio de la temperatura medida en cada una de las estaciones. De acuerdo con las comparaciones entre los promedios realizados por el test de Tukey se observa que las temperaturas fueron similares entre las estaciones MANT-PJIC (22,7 °C-22,4 °C) y entre PJIC-UDEM (22,4 °C-21,8 °C).

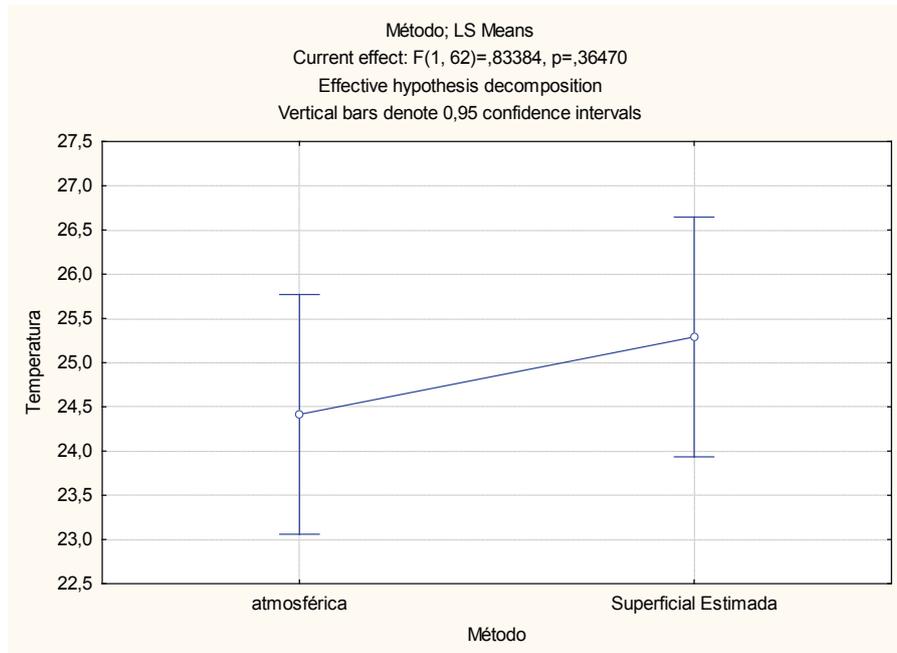


Figura 3. Variación de la temperatura atmosférica y superficial en las estaciones climáticas de Medellín durante el periodo 2010-2014

Fuente: elaborada por los autores

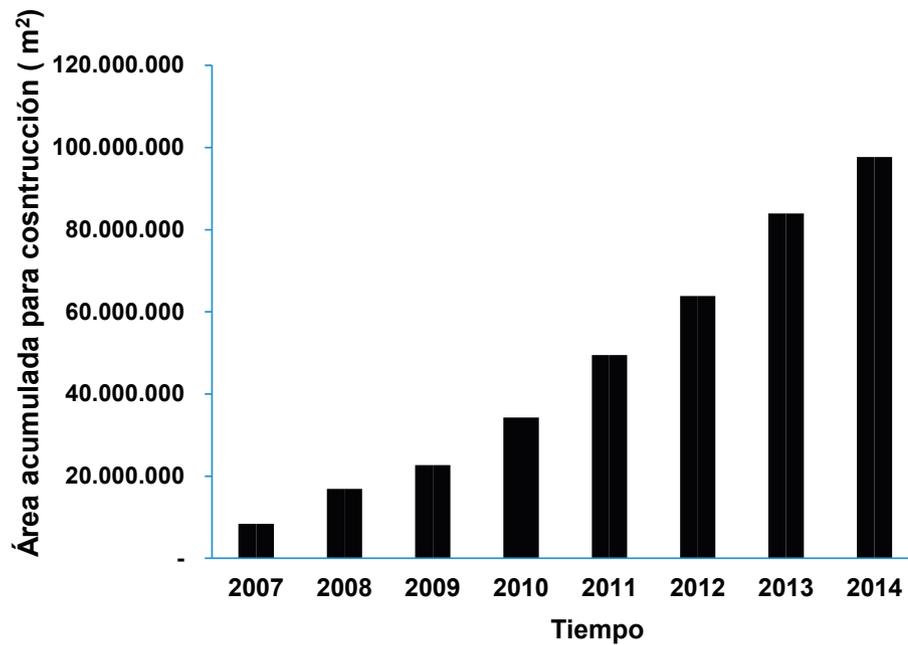


Figura 4. Variación del área aprobada para construcción en Medellín en el periodo enero 2007-febrero de 2014

Fuente: elaborado por los autores

-Asociación entre temperatura superficial estimada y área de construcción

De acuerdo con los datos suministrados por el DANE, se observó que el área aprobada para construcción ha ido en aumento en la ciudad, lo que se puede observar en la figura 4.

Se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman ya que no se ve afectado por los cambios en las unidades de medida. El vector de correlación que se muestra en la tabla 2 indica que la correlación entre el área construida y la temperatura medida en las estaciones Une-Casa Yalte-poblado (UNEP), y Politécnico

Jaime Isaza Cadavid (PJIC) es más alta que el promedio de todas las correlaciones; dicha correlación es considerada entre moderada y fuerte con un p-valor $< 0,5$; esto sugiere que entre mayor área construida mayor temperatura. Las demás correlaciones son débiles o nulas con un p-valor $> 0,5$.

Aunque el área construida haya estado en aumento durante los últimos años en la ciudad de Medellín (figura 4), se puede afirmar que en los diferentes puntos en donde están ubicadas las estaciones meteorológicas también ha estado en aumento el área de construcción.

Tabla 2. Vector de correlación

| Variables | Área total Acumulada | Temp. Olaya Herrera | Temp. UNNV | Temp. MANT | Temp. UNEP | Temp. PJIC | Temp. UDEM |
|----------------------|----------------------|---------------------|------------|------------|--------------|--------------|------------|
| área total Acumulada | 1 | 0,093 | -0,045 | 0,091 | 0,587 | 0,586 | 0,138 |
| p-valor | 0 | 0,587 | 0,793 | 0,595 | 0,000 | 0,000 | 0,422 |

Fuente: elaborado por los autores



Figura 5. Mapas de correlación (positiva/negativa) entre área acumulada construida y temperatura

Fuente: elaborado por los autores

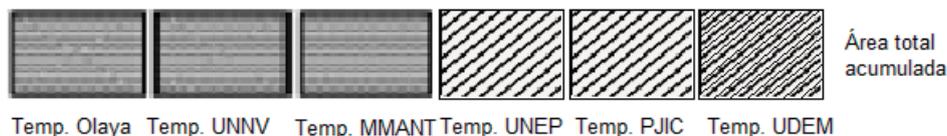


Figura 6. Mapas de correlación (signo / intensidad) entre área acumulada construida y temperatura

Fuente: elaborado por los autores

La figura 5 representa el mapa de correlación entre las variables, con el color negro y blanco para identificar las correlaciones positivas y negativas, respectivamente, entre área acumulada construida y temperatura para cada estación, sin interesar el grupo o nivel de asociación.

Considerando la intensidad de las correlaciones, la figura 6 muestra el mapa de tramas para representar el signo y la intensidad de las correlaciones.

Las líneas que van desde la parte inferior izquierda a la superior derecha corresponden a las correlaciones

positivas; las correlaciones negativas se representan por líneas que van desde la parte superior izquierda a la inferior derecha. Si las líneas son compactas más se aproxima la correlación a cero o nula. El conjunto de líneas horizontales representa la correlación nula.

DISCUSIÓN

Con la finalidad de comparar los dos sistemas de medición de temperatura, atmosférica y superficial, se aplicaron métodos estadísticos para determinar la existencia o no de diferencia significativa entre los promedios de los valores de temperatura, dando como resultado que no hubo diferencia entre los dos sistemas mencionados; esto indica que es indiferente utilizar cualquiera de los dos métodos de medición de la temperatura. Al respecto, otros trabajos han encontrado resultados similares donde se muestra que el comportamiento de las temperaturas por ambas herramientas fue parecido y, por lo tanto, se sugiere que la estimación de la temperatura por datos satelitales es una herramienta que puede utilizarse, por ejemplo, para el análisis de la distribución espacial de la temperatura, principalmente en áreas con baja densidad de información meteorológica o de difícil acceso (Cogliati, 2010; Paolini, 2012). En este sentido, la estimación de la temperatura superficial a partir de información geoespacial es de gran utilidad, dado que permitiría contar con registro de datos confiables diarios en toda el área metropolitana, especialmente considerando la falta de datos continuos que presentan las estaciones meteorológicas de Medellín.

Al tener en cuenta la variación de la medición de temperatura atmosférica registrada en las distintas estaciones, se logró observar que las estaciones presentan temperaturas más altas en la parte urbana central de Medellín; este suceso puede relacionarse con la alta contaminación atmosférica debido al alto tránsito vehicular, presencia de industrias, concentración de edificaciones y densidad poblacional que se evidencia en los sectores del centro, Guayabal y la zona occidental. La variación de la temperatura encontrada evidencia el fenómeno de islas de calor en la ciudad, mostrando mayores valores hacia las áreas centrales de la ciudad y menores valores hacia las zonas periféricas, como lo registra la literatura para diversas regiones (Fernández y Martilli, 2012; Paolini, 2012).

A partir de la estimación del coeficiente de asociación entre temperatura superficial estimada y área de construcción, se observó que las estaciones PJIC y

UNEP ubicadas en el barrio El Poblado presentaron un grado de correlación más alto entre temperatura y área construida. Lo anterior puede explicarse probablemente debido al aumento de la urbanización en este sector en los últimos años, como resultado de las políticas urbanas delineadas en el POT que han convertido a El Poblado en un barrio densificado de altos edificios, y esta densificación ha traído un notable aumento de vehículos; todo lo anterior ha contribuido notablemente a la generación de gases efecto invernadero y al aumento de temperatura. En este sentido, un estudio realizado en un sector de la ciudad de San Miguel de Tucumán en Argentina también muestra que el aumento de la temperatura está directamente relacionado con la densificación urbana, donde específicamente se encontró que crecimiento en densidad y construcciones (principalmente en altura como los edificios) tuvieron un impacto muy importante sobre la temperatura nocturna (Paolini, 2012).

De acuerdo con los resultados representados en la figura 5, la estación UNNV presenta una correlación negativa, lo que puede indicar que el índice de construcción no ha aumentado lo suficiente en esta zona. Además, es importante resaltar que en este sector se siguen manteniendo muchas áreas verdes; estas áreas verdes (parques, plazas y jardines urbanos) permiten que se originen flujos de aire limpio y fresco que amortiguan la contaminación ambiental y disminuyen la temperatura local (Romero *et al.*, 2010; CEPAL, 2013b).

CONCLUSIONES

-No hubo diferencias estadísticamente significativas entre los dos métodos de medición: temperatura superficial estimada a partir de imágenes satelitales y temperatura atmosférica registrada en las estaciones meteorológicas; esto es porque el p-valor calculado es mayor que el nivel de significancia ($\alpha = 0,05$), es decir, no se puede rechazar la hipótesis nula la cual indica que la diferencia entre las medias de la medición de temperatura por ambos métodos es igual a cero.

-Existe variación significativa de los promedios de temperatura atmosférica en las estaciones meteorológicas de Medellín, encontrándose que en las estaciones OLAYA, MANT y UNNV se presentaron los valores más altos de temperaturas.

-Mediante el cálculo del coeficiente de Spearman se encontró asociación entre el área construida y las temperaturas superficiales en las estaciones de Une-Casa Yalte-poblado (UNEP), y Politécnico Jaime Isaza Cadavid (PJIC) identificándose zonas de alto grado de densificación con aumentos evidentes de la temperatura mediados por los usos del suelo. Los correspondientes p-valores, ambos por debajo de 0,05, indican que existe correlación debido a que entre menor sea el valor de p, más diferente a 0 es la correlación.

-De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que el rol de la vegetación sobre el medio ambiente urbano es bastante más amplio y benéfico, puesto que controla el desarrollo de las islas de calor urbanas, al brindar sombra y consumir calor latente mediante el proceso de evapotranspiración. Y esta situación se ve afectada por un alto índice de construcción.

-En última instancia, el desafío reside en adoptar una planificación que promueva un modelo de urbanización sostenible, que favorezca la densificación, con espacios de calidad y que tenga un enfoque integral, abarcando todas las áreas urbanas y todos los sectores.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Laboratorio de Calidad del Aire (CAL-AIRE) del Departamento de Geociencias y Medio Ambiente la Universidad Nacional, sede Medellín que entregó los datos meteorológicos para realizar los análisis. Asimismo, agradecemos a La Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) que permitió, a partir de la modalidad de apoyo académico especializado, patrocinar este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ángel, L., Ramírez, A. y Domínguez, E. (2010). Isla de calor y cambios espacio-temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá. *Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas*, XXXIV(131), 173-183.
- Cogliati, M. (2010). Estudio de la distribución espacial de la temperatura en el valle del río Neuquén con la utilización de imágenes satelitales temperatura en el valle del río Neuquén con la utilización de imágenes satelitales. *Geograficando*. 6(6), 205-222.
- Martínez, A. (2017). *Islas de calor en el área urbana del Valle de Aburrá*. Tesis o trabajo de grado de Maestría en Ingeniería-Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Medellín, Colombia. 181 P.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe – CEPAL. (2013a). *Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe – CEPAL. (2013b). *Metrópolis de Colombia: Aglomeraciones y desarrollo*. Serie Estudios y Perspectivas. Santiago de Chile: CEPAL.
- Fernández, F. y Martilli, A. (2012). El clima urbano: aspectos generales y su aplicación en el área de Madrid. *Índice, Revista de Estadística y Sociedad*, (50), 21-24.
- Fuentes, C. (2015). Climatología urbana por modificación Antropogénica. Alteración del balance de Energía natural. *Revista de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Nuevo León*, IX(11), 73-91.
- Grover, A. y Singh, R. (2015). Analysis of Urban Heat Island (UHI) in Relation to Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): A Comparative Study of Delhi and Mumbai. *Environments*, (2), 125-138.
- Nuruzzaman, M. (2015). Urban Heat Island: Causes, Effects and Mitigation Measures - A Review. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 3(2), 67-73.
- Paolini, L. (2012). Análisis de la respuesta de la temperatura de superficie al crecimiento urbano utilizando series temporales MODIS. *Revista de Teledetección*, 38, 28-35.
- Romero, H.; Irrarrázaval, F.; Opazo, D., Salgado, M. y Smith, P. (2010). Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile. *Eure*, 36(109), 35-65.