

**Implementación y análisis de red de mediciones de temperatura en tiempo real para el estudio de la
isla de calor urbana en Bucaramanga**

Hildreth Jadira Villamil Almeida

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Químico

Director:

Carlos Eduardo García Sánchez

PhD. en Ingeniería Química

Codirector

Oscar Yazit Salah García

Especialista en Control e instrumentación industrial

Universidad Industrial de santander

Facultad de Ingenierías Físico-Químicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A Dios por ser mi fortaleza y guía durante mi proceso formativo.

A Maria Hilda mi madre, por su apoyo en todos los momentos de mi vida.

A mi amigo, cómplice y compañero de vida Kevin Andrés por su entrega, paciencia y amor
durante el tiempo compartido.

A mi hermana Natalia, por ser la personita que alegra y une la familia.

A todas las personas que de una u otra manera hicieron parte de mi vida universitaria.

Agradecimientos

A Dios y a la vida misma, por permitirme culminar este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander, por hacerme parte de su comunidad educativa.

A la Escuela de Ingeniería Química, por su aporte académico y de crecimiento personal.

Al Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, a mi director de proyecto Carlos Eduardo García y codirector Oscar Salah por su compromiso para llevar a buen término este proyecto.

Al ingeniero y funcionario de Alumbrado Público de Bucaramanga Nicolás Cobos, por su gran ayuda para la instalación, montaje y desmontaje de la red de monitoreo.

A cada una de las personas que me acogieron en las diferentes etapas de mi vida universitaria.

Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Caracterización de las islas de calor urbano	15
1.1 Formación de las islas de calor urbano	16
1.2 Impacto de las islas de calor	17
1.2.1 Consumo energético.....	17
1.2.2 Impacto Ambiental.....	17
1.2.3 Efectos sobre la salud humana	18
1.3 Medición de temperatura	18
1.4 Redes de medición en tiempo real	19
1.5. Big data y procesamiento de datos.....	20
2. Objetivos	23
2.1 Objetivo General	23
2.2 Objetivos Específicos.....	23
3. Metodología	24
3.1 Revisión bibliográfica	25
3.2 Definición del estudio	25
3.3 Instalación de sensores.....	27
3.4 Medición de variables	28

3.5 Procesamiento de datos	28
3.6 Análisis de resultados	29
4. Resultados y Análisis	29
4.1 Procesamiento de datos	30
4.2 Eliminación de datos atípicos	30
4.3 Manejo de datos faltantes.....	31
4.4 Suavizado de los datos	32
4.5 Análisis de resultados	33
5. Conclusiones	38
6. Recomendaciones	39
Referencias Bibliográficas	40
Apéndices.....	43

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Diagrama de bloques. Descripción metodológica.	24
<i>Figura 2.</i> Datos de temperatura reportados por los siete sensores entre las 0500 h y las 0900 h el 28 de mayo de 2018. Los valores de referencia están representados por la línea azul (EQ-229). 30	
<i>Figura 3.</i> Eliminación de valores atípicos. A. Datos brutos de carga de la batería del nodo EQ-233 el 1 de junio de 2018. B. Los mismos datos, después de la eliminación de valores atípicos. 31	
<i>Figura 4.</i> Imputación de datos faltantes usando un trazador cúbico. Los datos mostrados corresponden a las temperaturas informadas por el nodo EQ-233 entre las 0600 h y las 1400 h del 1 de junio de 2018.	32
<i>Figura 5.</i> Comparación entre las técnicas de reducción de ruido, para los datos de temperatura recopilados por EQ-233 el 1 de junio de 2018. A. Datos sin procesar. B. Datos después de la aplicación de la media móvil. C. Datos después de la aplicación del filtro Savitzky-Golay.....	33
<i>Figura 6.</i> Temperatura media de los nodos reportados en el P1. Diurno (A) y nocturno (B).	35
<i>Figura 7.</i> Temperatura media de los nodos reportados en el P2.	36
<i>Figura 8.</i> Temperatura media de los nodos reportados en el P3.	36

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Ubicación de los nodos de medición.</i>	27
Tabla 2. <i>Sensores que reportaron resultados en cada uno de los periodos de medición.</i>	34
Tabla 3. <i>Temperatura media del aire medida por los diferentes nodos en cada período del estudio. ΔT: diferencia entre la temperatura media del nodo y la temperatura media del nodo de referencia. NA: no aplicable. ND: no hay datos.</i>	37

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Áreas de estudio.....	43
Apéndice B. Fotografía aérea del área de estudio.....	44

Resumen

Título: Implementación y análisis de red de mediciones de temperatura en tiempo real para el estudio de la isla de calor urbana en Bucaramanga*

Autor: Hildreth Jadira Villamil Almeida**

Palabras Clave: Isla de calor urbano, procesamiento de datos, geometría urbana.

El desarrollo de las áreas urbanas y las actividades humanas conducen a la formación de las islas de calor urbano. Este fenómeno se caracteriza por experimentar temperaturas más elevadas en las ciudades en comparación con las áreas periféricas. Por lo tanto, este estudio buscó detectar y cuantificar la isla de calor urbano en el área central de la ciudad de Bucaramanga, Colombia.

Para lograr este objetivo, se implementó una red de medición de temperatura en tiempo real y se desarrolló un conjunto de datos por minuto durante las dos temporadas que se presentan en la ciudad: seca y de lluvias. Siete estaciones fijas se utilizaron para la medición de las temperaturas; seis nodos distribuidos en el centro urbano de la ciudad y un nodo de referencia ubicado en un bosque cercano. Para el procesamiento de los datos se aplicaron tres técnicas: eliminación de datos atípicos, manejo de datos faltantes y filtrado de ruido. A partir de la diferencia entre los valores medios de temperatura para los seis nodos urbanos y los valores medios de temperatura para el nodo rural se cuantificó la intensidad diurna y nocturna de la isla de calor.

El análisis de los datos mostró que el fenómeno de la isla de calor urbano se manifiesta en la ciudad con una intensidad nocturna de 1.0 °C para las dos temporadas; mientras que, la magnitud de la intensidad diurna varía de acuerdo a la temporada, geometría urbana, condiciones climáticas y a las características superficiales de la zona.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Carlos Eduardo García Sánchez PhD

Abstract

Title: The implementation and analysis of a real-time temperature measurements network for the study of the urban heat island in Bucaramanga*

Author: Hildreth Jadira Villamil Almeida**

Key Words: Urban heat island, data processing, urban geometry.

The development of urban areas and human activities lead to the formation of urban heat islands. This phenomenon is characterized by experiencing higher temperatures in cities compared to peripheral areas. Therefore, this study sought to detect and quantify the urban heat island in the downtown of the city of Bucaramanga, Colombia.

To achieve this goal, a real-time temperature measurements network was implemented and a set of data was developed per minute during the two seasons that occur in the city: dry and rainy. Seven fixed stations were used for the measurement of temperatures; six nodes distributed in the downtown of the city and a reference node located in a nearby forest. For the data processing, three techniques were applied: elimination of atypical data, handling of missing data and noise filtering. From the difference between the mean temperature values for the six urban nodes and the average temperature values for the rural node, the diurnal and nocturnal intensity of the heat island was quantified.

The analysis of the data showed that the phenomenon of the urban heat island manifests itself in the city with a nocturnal intensity of 1.0 °C for the two seasons; while, the magnitude of the diurnal intensity varies according to the season, urban geometry, climatic conditions and the surface characteristics of the area.

* Grade work

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director Carlos Eduardo García Sánchez PhD

Introducción

A medida que avanza el desarrollo urbano se alteran las relaciones urbano-rurales condicionando y estimulando cambios en el paisaje físico natural. La infraestructura que sustituye la vegetación y los terrenos abiertos por superficies impermeables y secas pueden conducir a la formación de islas de calor urbano: fenómeno por el cual las temperaturas del aire y las superficies de las ciudades suelen ser más cálidas en comparación con sus alrededores (no urbanizados) (Voogt, 2004). El primer estudio que describe y reconoce los efectos de las áreas urbanas en el clima local fue realizado en Londres por Luke Howard, en donde descubre el impacto de las actividades humanas sobre el clima de la ciudad al comparar sus registros de temperatura con los de la Royal Society en Somerset House (Mills, 2008). Afirma que no es adecuado considerarse la temperatura de la ciudad como la del clima, ya que está influenciada por el calor artificial que genera factores como la geometría urbana, propiedades de los materiales urbanos y el calor antropogénico (Oke, 1982). Desde entonces, numerosas ciudades del mundo han sido objeto de investigación para documentar las características de este fenómeno.

Se conocen tres tipos de isla de calor: superficial (SHI), de dosel (CLHI) y de capa límite (BLHI). La SHI se refiere al calor relativo de las superficies urbanas, mientras que la BLHI comienza en la parte alta de los edificios y la copa de los árboles y se extiende hasta la zona atmosférica que no logra ser alcanzada por los cambios térmicos introducidos por la ciudad, es decir, hasta una altura aproximada de 1,5 Km. La CLHI es la capa de aire más cercana a la superficie urbana y se extiende desde el suelo hasta aproximadamente la altura media de los

edificios de la ciudad. Los valores más altos de temperatura del aire se registran en el límite de las áreas urbanas y suburbanas, mientras que en las zonas centrales y de mayor actividad se observa un aumento lento y variable de temperatura (Voogt, 2004). La intensidad de CLHI es mayor después del atardecer y en horas previas al alba, debido a la lenta liberación de calor de la infraestructura urbana (United States Environmental Protection Agency, 2008)

La baja capacidad de absorción de agua, bajo albedo, el almacenamiento y la emisión de calor son características de los materiales del uso del suelo urbano que contribuyen al desarrollo de la isla, ya que, están relacionadas con el *discomfort* térmico, el alza en la demanda de energía para el uso de sistemas de refrigeración, aumento de las concentraciones de ozono a nivel del suelo, negativo para la salud humana, y el deterioro de la calidad ambiental. Las principales causas para la formación de las islas de calor apuntan a las relaciones espaciales como lo son la geometría de las calles que conducen a la formación de cañones urbanos, la ubicación geográfica y la vegetación reducida en zonas urbanas (Oke, 1982)

Este es un estudio sin precedentes en la ciudad, que pretende determinar si se puede considerar que se genera una isla de calor urbana en Bucaramanga y cuantificar su magnitud, mediante la implementación de una red de medición de temperatura en tiempo real durante 96 días, entre mayo y agosto de 2018. De esta manera, se contribuye al dimensionamiento de este posible problema en la ciudad, generando una información que mejora el conocimiento de la ciudadanía sobre su región y puede contribuir a orientar la planeación urbanística de la ciudad.

1. Caracterización de las islas de calor urbano

La Isla de Calor Urbano (UHI) se define como la diferencia de temperatura entre el área urbana y su entorno rural. Es el resultado de dos procesos diferentes pero relacionados; el primero son los cambios en la cobertura del suelo como consecuencia del proceso de urbanización que transforma las superficies con materiales impermeables como el concreto y el asfalto. El segundo, menciona las actividades que se adelantan en la ciudad como la industria y el transporte, debido a las emisiones térmicas que contribuyen al calentamiento urbano (Saaroni & Ziv, 2010)

Se suelen dividir las islas de calor urbano de acuerdo a si se registra el cambio de temperatura en la superficie o en la atmósfera. La isla de calor superficial (SHI) es la diferencia de temperatura registrada en las superficies urbanas expuestas a la radiación solar directa como techos y pavimentos en comparación con superficies húmedas presentes en un entorno rural. La magnitud de (SHI) varía de acuerdo a las estaciones, condiciones climáticas, intensidad del sol, cobertura del suelo y se determina mediante información satelital (United States Environmental Protection Agency, 2008). La isla de calor de la capa límite (BLHI) se desarrolla en dirección del viento por encima de la ciudad (Voogt, 2004).

En la atmosfera urbana se desarrolla la isla de calor de la capa de dosel (CLHI). Es el tipo de isla más observado por su cercanía con la superficie y se manifiesta en las horas nocturnas debido a la lenta liberación de calor de las superficies urbanas. Para medir las temperaturas del aire se usan travesías móviles o estaciones meteorológicas fijas y su magnitud depende de las

características de las superficies urbanas y rurales, la temporada y las condiciones climáticas (United States Environmental Protection Agency, 2008).

1.1 Formación de las islas de calor urbano

La causa más importante de la UHI es la urbanización. El constante incremento en superficies duras y absorbentes de calor, la densidad de las ciudades, y la reducción de la vegetación natural son los principales contribuyentes al efecto isla de calor (Mohajerani , Bakaric, & Jeffrey-Bailey, 2017). Así mismo, las funciones de la ciudad y el calor antropogénico generado principalmente por la combustión de combustibles fósiles producen contaminantes para la atmósfera urbana lo que aumenta la temperatura superficial terrestre (Voogt, 2004).

Dentro del clima la variable meteorológica más importante que gobierna la intensidad de la isla de calor es la velocidad del viento, seguida de la cubierta de nubes. Las magnitudes más grandes de UHI se miden bajo condiciones climáticas tranquilas y claras. Los vientos crecientes mezclan el aire y producen un cambio de temperatura, lo mismo ocurre con grandes cantidades de nubes bajas ya que reducen el enfriamiento radiactivo y disminuyen la isla de calor. Por otra parte, los cambios repentinos en los patrones climáticos afectan la frecuencia y magnitud de las islas de calor (Saaroni & Ziv, 2010).

La ubicación geográfica influye en las condiciones climáticas, la topografía de la zona y las características del entorno rural de la ciudad. Las estaciones de verano e invierno favorecen las islas de calor en las ciudades ubicadas en la zona templada, mientras que, la estación seca puede contribuir con la formación de la UHI en climas tropicales (Voogt, 2004).

1.2 Impacto de las islas de calor

1.2.1 Consumo energético La producción y el consumo de energía están creciendo rápidamente a nivel mundial. Las altas temperaturas del aire, principalmente en época de verano, aumenta la demanda de energía para el uso del aire acondicionado lo que aporta calor al medio, así como gases de efecto invernadero que degradan la calidad del ambiente local (Akbari, 2007). Una compilación de estudios sobre impacto energético de las instalaciones de climatización urbana para el período 1970-2010 concluye que el aumento medio de la demanda de refrigeración es del 23%, mientras que la reducción media de calefacción es del 19%. Para el mismo período el aumento total de demanda energética para calefacción y refrigeración registrado es del 11%, lo que revalida al calentamiento urbano como la causa principal del consumo masivo de energía (Santamouris, 2014).

1.2.2 Impacto Ambiental Los edificios y los procesos de urbanización tienen un impacto ambiental significativo en los recursos naturales. La infraestructura urbana reemplaza las superficies naturales con materiales impermeables que alcanzan altas temperaturas y pueden calentar la escorrentía de aguas pluviales en más de 14°C, que luego drenan hacia las alcantarillas y eleva la temperatura del agua a medida que confluye en ríos, arroyos, estanques y lagos. El cambio de temperatura en los ecosistemas acuáticos tiene repercusiones a nivel metabólico y reproductivo de muchas especies. De manera análoga, la escorrentía urbana transporta contaminantes y sedimentos hacia el cauce fluvial lo que la identifica como la cuarta fuente de deterioro en ríos, tercera en lagos y segunda en estuarios (United States Environmental Protection Agency, 2008). Así mismo, la ola de calor en las ciudades conlleva a un aumento de las

concentraciones de ozono a nivel del suelo lo que resulta muy peligroso para la salud humana. Cuando el ozono se acumula en las zonas urbanas crea una neblina visible denominada smog fotoquímico. Un estudio realizado a 60 ciudades de Estados Unidos muestra que las estaciones de verano con mayor índice de temperatura tienen el potencial de elevar las concentraciones de ozono, incluso a medida que disminuyen las emisiones de contaminantes formadores de ozono (Kenward, Yawitz, Sanford, & Wang, 2014).

1.2.3 Efectos sobre la salud humana La exposición humana a los aumentos abruptos de la temperatura, pueden resultar en tasas de mortalidad superiores a la media. Un estudio del impacto del cambio climático en la salud en Sudáfrica analizó datos nacionales de mortalidad y temperatura durante 17 años y encontró que el 3,4 % de las muertes en el país están relacionadas con el incremento de temperatura (Chersich, y otros, 2018). Así mismo, el aumento de la temperatura y los cambios en la precipitación tienen importantes implicaciones para la transmisión de enfermedades transmitidas por vectores (Wolfgang, y otros, 2014).

Otros síntomas relacionados con el incremento en las temperaturas del aire, especialmente durante el verano son: estrés por calor, calambres por calor, agotamiento por calor, síncope por calor, edema por calor y golpe de calor (Manik & Syaukat, 2015)

1.3 Medición de temperatura

La Organización Mundial Meteorológica (WMO) define la temperatura de un gas como la magnitud física que se relaciona con el movimiento aleatorio de las moléculas en un cuerpo físico. La temperatura está relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico y se mide

con termómetros (World Meteorological Organization, 1992). Según su principio de medición, hoy en día existe variedad de termómetros, hay termómetros de líquido en vidrio, termómetros mecánicos y termómetros electrónicos. Los termómetros de líquido en vidrio utilizan como principio de medición la expansión térmica del líquido sobre vidrio graduado y calibrado. Los termógrafos mecánicos, son más precisos y guardan todas las mediciones obtenidas, existen dos grandes clases, los bimetálicos y los del tubo Bourdon; los termógrafos bimetálicos utilizan como principio de medición dos aleaciones de bajo y alto coeficiente de dilatación que según determinada temperatura se deforman y transmiten un movimiento giratorio a una aguja indicadora, mientras que los termógrafos de tubo Bourdon, aunque tienen un arreglo parecido el elemento sensible a la temperatura toma la forma de un tubo curvo plano lleno de alcohol. Los termómetros electrónicos pueden ser de resistencia eléctrica, termistor o termocuplas, el principio de medición de los termómetros de resistencia eléctrica es la medida de como varía la resistencia con la temperatura del material; el termistor utiliza el mismo principio sólo que el tipo de resistencia es un material semiconductor, lo que le provee, varias ventajas sobre el primero, y las termocuplas funcionan por la medición de la corriente producida en el circuito con un galvanómetro sensible, dicha corriente producida es función de la temperatura (World Meteorological Organization, 2008).

1.4 Redes de medición en tiempo real

Tiempo real significa que, durante la operación de un sistema de computación, los programas de procesamiento de datos están siempre operativos, de manera que los resultados estén disponibles dentro de un período de tiempo determinado. Un sistema de medición en tiempo real interactúa

activamente en un entorno dinámico en relación con sus entradas, salidas y restricciones temporales, es decir, para este caso: el sensor mide las variables de interés, guarda la información y la envía a un *cloud storage* o almacenamiento en la nube, el hardware y el software deben garantizar que no haya retrasos. La información climatológica y de calidad ambiental, se genera a partir de redes de observación que permiten la captura, procesamiento y difusión de la misma en tiempo real (Daponte, Grimaldi, & Marinov, 2002).

1.5. Big data y procesamiento de datos

Big data es un conjunto de datos demasiado grande y complejo para que un software de procesamiento de datos tradicional los opere. En general, los datos almacenados en estas bases de datos no son útiles hasta que son limpiados y transformados, puesto que sólo así, se logra obtener una gran cantidad de tendencias y análisis. Normalmente, la limpieza de datos consta de cuatro pasos: detección de datos atípicos, interpolación de datos faltantes, eliminación de ruido, estimación del retraso y alineación en el tiempo (Xu, y otros, 2015).

Utilizar técnicas para detección de valores atípicos inadecuadas puede llevar a que no se detecten valores o que se detecten valores dudosos que no lo son, lo que puede traer consecuencias sobre la calidad de los datos y sobre los procesos realizados posteriormente. Existen diversas técnicas para tratar con valores atípicos, algunas de estas técnicas son la prueba de Dixon, la prueba de Grubbs, la prueba de Tukey, la distancia de Mahalanobis y la regresión lineal simple. La prueba de Dixon define la relación entre la diferencia del mínimo/máximo valor y su vecino más cercano y la diferencia entre el máximo y el mínimo valor aplicado (Li & Edwards, 2001). La prueba de Grubbs se utiliza para detectar valores atípicos en un conjunto de datos univariante y se basa en el

supuesto de normalidad, por lo que primero debe verificarse que los datos pueden aproximarse razonablemente a una distribución normal (Iglewicz & Hoaglin, 1993). El análisis de valores atípicos de Mahalanobis (MOA), es un método basado en una distancia llamada distancia de Mahalanobis, calculada con base en la varianza de cada punto; es un enfoque multivariable y es calculado para cada observación en el conjunto de datos (Iglewicz & Hoaglin, 1993). La prueba de Tukey se basa en cinco medidas descriptivas del conjunto de datos: primer cuartil (Q1), mediana (Q2), tercer cuartil (Q3), el valor máximo y el valor mínimo; para la detección de valores atípicos se halla el rango intercuartílico (IQR) el cual es la diferencia entre el tercer y el primer cuartil, las observaciones que están entre 1,5 y 3,0 veces el rango intercuartil (por encima y por debajo) son considerados atípicos leves, y las observaciones que están a más de 3 veces el rango intercuartil se le conocen como atípicos graves (Tukey, 1977). Se destaca varias ventajas de la prueba de Tukey, como la versatilidad para usarse en bancos de datos dispersos y de alta complejidad, facilidad de cálculo y la capacidad para manejar gran número de valores (Iglewicz & Hoaglin, 1993).

El procedimiento de interpolación ayuda a retener la naturaleza dinámica del objetivo variable ajustando un polinomio basado en puntos vecinos y usarse para reemplazar datos atípicos y/o datos inexistentes. Según las aplicaciones que se buscan en datos por muestreo o experimentación y el ajuste requerido a estos datos, se puede hacer interpolación por mínimos cuadrados (regresión lineal, polinomial, lineal múltiple o no lineal), interpolación polinomial de Newton en diferencias divididas, polinomios de interpolación de Lagrange, interpolación inversa, interpolación mediante trazadores (splines), entre otros (Chapra & Canale, 2011).

Para facilitar la comparación entre los conjuntos de datos se hace necesario eliminar el ruido mediante un filtro de suavizado. Entre las técnicas de eliminación de ruido podemos destacar dos grandes grupos, las técnicas basadas en modelos y las técnicas impulsadas por datos. Entre las

técnicas basadas en modelos la más ampliamente utilizada es el filtro de Kalman y entre las técnicas impulsadas por datos encontramos la media móvil, los filtros Wiener, el filtro de Savitzky-Golay, entre otros (Xu, y otros, 2015). El filtro de Kalman estima el estado oculto de un sistema dinámico lineal discretizado a partir de observaciones ruidosas a través de un proceso iterativo de predicción-corrección (Anderson & Moore, 1979).

El filtro de media móvil crea series de promedios a partir de n datos anteriores; en esta predicción entre más grande sea n , mayor será la influencia de los datos antiguos. El filtro de media móvil desliza una ventana de longitud L a lo largo de los datos, calculando los promedios de los datos contenidos (MathWorks®, 2019). La siguiente ecuación define la media móvil del vector x :

$$y(n) = \frac{1}{L} * [x_{(n)} + x_{(n-1)} + \dots + x_{(n-L+1)}]$$

El filtro de Savitzky-Golay es un filtro de promedio móvil ponderado que ajusta un polinomio de orden definido sobre un número fijo de muestras (Savitzky & Golay, 1964) en las que se debe especificar un segmento de longitud impar de datos y un orden polinomial estrictamente menor a la longitud del segmento. La función calcula internamente los coeficientes polinomiales de suavizado, realiza la alineación de retardo y cuida los efectos transitorios al inicio y al final del registro de datos (MathWorks®, 2019).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Implementar una red de mediciones de temperatura en tiempo real para el estudio de la isla de calor urbana en Bucaramanga en varios puntos de la ciudad y alrededores para adquirir los datos para su posterior interpretación.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar si existe la isla de calor urbana en zonas de Bucaramanga, con el fin de hacer un estudio de este fenómeno.
- Cuantificar la magnitud del fenómeno, mediante sensores electrónicos para la medición de temperatura en tiempo real.
- Interpretar y analizar los datos obtenidos en la investigación y así determinar el impacto sobre los recursos naturales y la salud pública.

3. Metodología

A continuación, se presenta un esquema general de las etapas consideradas en éste trabajo:

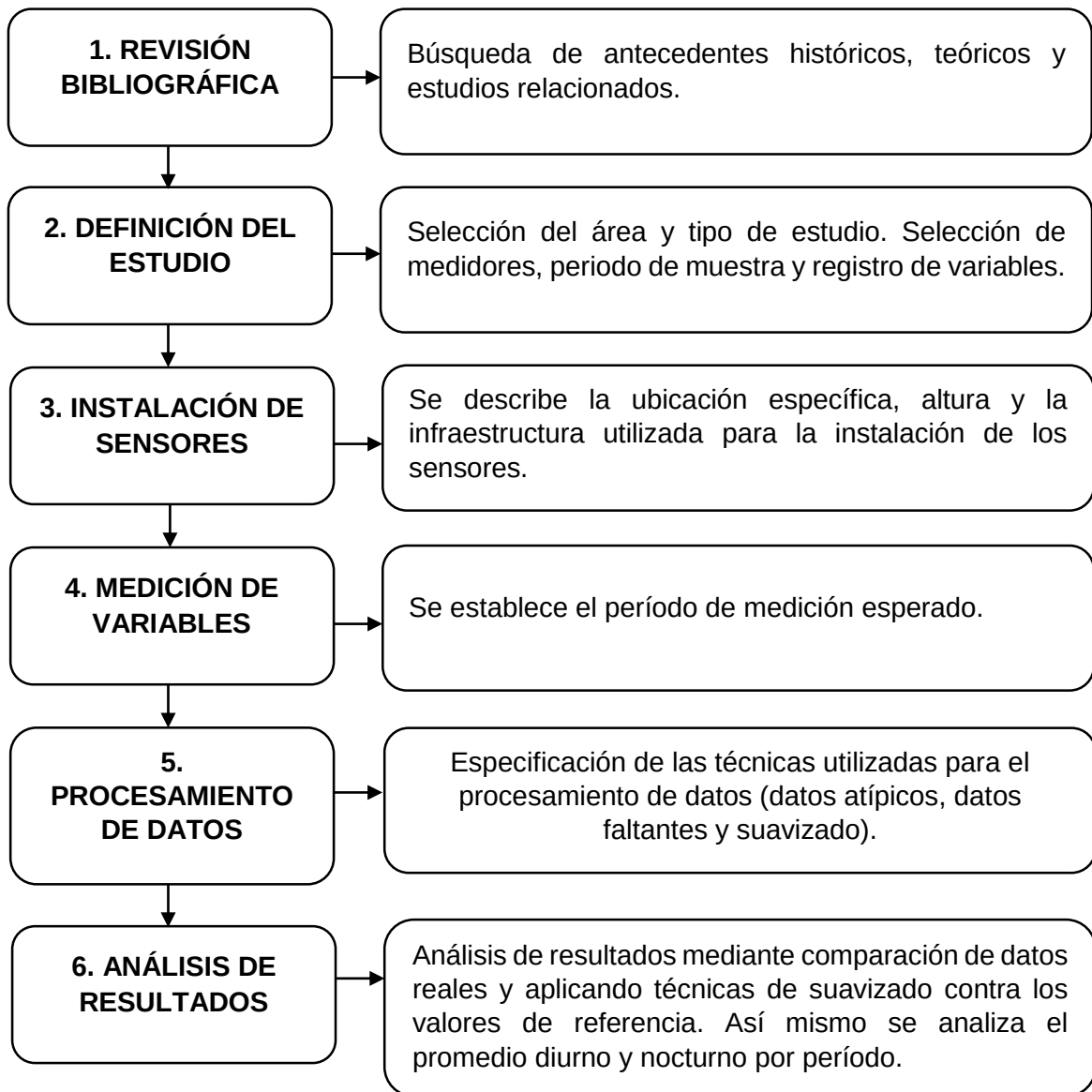


Figura 1. Diagrama de bloques. Descripción metodológica.

3.1 Revisión bibliográfica

En la primera etapa se realizó la búsqueda de fundamentos teóricos, con el fin de adquirir la mayor información posible, a cerca de los instrumentos, metodologías y técnicas existentes para la determinación de la Isla de Calor Urbana.

3.2 Definición del estudio

La ciudad de Bucaramanga está ubicada en la región noreste de Colombia. Tiene una población estimada de 528 683 habitantes y junto con los municipios que conforman su área metropolitana (Girón, Piedecuesta y Floridablanca) alcanzan una población aproximada de 1,1 millones de habitantes (DANE, 2018). Bucaramanga tiene una altitud media de 959 m sobre el nivel del mar y su clima es tropical de tipo monzónico. Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales IDEAM el clima varía de acuerdo a la altitud, presentando clima cálido-seco en las zonas de menor altitud y clima templado en las partes de mayor altitud de la ciudad. La temperatura media anual es de 23 °C y presenta una elevada humedad relativa promedio de 83,4% lo que aumenta la sensación de calor. El régimen de lluvias se divide en estación seca (diciembre-marzo y junio-agosto) y estación de lluvias (abril-mayo y septiembre-noviembre). En la estación seca las temperaturas medias pueden ser 2 o 3 grados superiores.

Este proyecto se desarrolló en el área central de la ciudad de Bucaramanga, Colombia, porque es una zona urbana edificada que ofrece grandes superficies de absorción y retención de calor y donde se adelantan actividades comerciales, industriales y de servicios que, de la misma manera, aportan calor al medio. Como consecuencia de la discontinua planificación del crecimiento urbano

que resiste la ciudad, el sector comercial se ha desarrollado sobre los principales ejes viales y de mayor flujo peatonal, en donde se evidencian los mayores índices de invasión del espacio público por la presencia de ventas ambulantes sobre el insuficiente perfil vial y la ausencia de áreas especializadas para el estacionamiento. Esto contribuye de manera directa a la acumulación de calor y al aumento de la temperatura. Por otra parte, los sistemas de refrigeración usados en la actividad industrial y doméstica generan calor extra. Adicionalmente, la gran cantidad de vehículos que transitan por el sector, aumenta la cápsula de gases contaminantes y la carencia de áreas públicas reduce la presencia de arborización en la zona, generando un negativo efecto en la calidad del ambiente urbano.

En contraste, según información del plan de ordenamiento territorial de Bucaramanga la estación de referencia rural se encuentra dentro de una zona del Sistema Nacional de Áreas protegidas SINAP en el sector DRMI occidental y se clasifica como Bosque Seco Basal Tropical por su importancia ecológica. La mayor extensión del bosque está cubierta por pastos naturales y presenta vegetación de tipo boscosa en las riberas de los cuerpos de agua. En el Anexo A se presenta una fotografía de las áreas de estudio.

De acuerdo con la literatura, se asume un estudio original de la Isla de Calor de la capa de dosel (CLHI) porque las temperaturas se miden en la capa de aire más cercana a la superficie, concretamente, a 5,5 m sobre el nivel del suelo. Durante un tiempo estimado de doce semanas, siete sensores en tiempo real registran y transmiten los datos mediante un sistema de comunicación inalámbrico y se almacenan en un servidor. Los datos son sincronizados cada minuto a través de la red celular GSM con siete puntos (nodos) de muestreo en estaciones fijas, seis de los cuales se ubican en la zona urbana y uno de referencia. Cada nodo tiene dos termómetros digitales para medir la temperatura con una precisión referida del fabricante de 0,5 °C y fueron previamente

calibrados en un laboratorio acreditado ISO / IEC 17025. Los equipos fueron desarrollados por el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas y la energía requerida por la red es proporcionada por paneles solares.

3.3 Instalación de sensores

El proceso de montaje e instalación de los instrumentos de monitoreo fue posible gracias a la colaboración de Alumbrado Público de Bucaramanga, quienes facilitaron los trámites y permisos, así como la maquinaria, personal técnico e infraestructura requerida. Los sensores se sujetaron con cinta en acero inoxidable a los postes metálicos del alumbrado público a una altura aproximada de 5,5 m. La altura de los sensores cumple con la definición de la capa de dosel urbana y además evita robos y daños en los equipos. El siguiente cuadro muestra la localización geográfica de los nodos utilizados para cuantificar la isla de calor urbana y la fotografía aérea (ver anexo B) permite visualizar la ubicación de los mismos.

Tabla 1.

Ubicación de los nodos de medición.

Código de nodo	Ubicación	Zona	Coordenadas
EQ-229	Cra. 9 & Cl. 33	Referencia	7°07'07.06"N 73°07'55.13"W
EQ-230	Cl. 36 & Cra. 15	Urbana	7°07'04.70"N 73°07'34.10"W
EQ-231	Cl. 36 & Cra. 20	Urbana	7°07'10.22"N 73°07'19.41"W

Código de nodo	Ubicación	Zona	Coordenadas
EQ-232	Cra. 9 & Cl. 42	Urbana	7°06'51.67"N 73°07'49.31"W
EQ-233	Cra. 9 & Cl. 43	Urbana	7°06'48.14"N 73°07'47.90"W
EQ-234	Cl. 36 & Cra. 13	Urbana	7°07'02.41"N 73°07'42.47"W
EQ-235	Cl. 36 & Cra. 17	Urbana	7°07'06.22"N 73°07'29.02"W

3.4 Medición de variables

De acuerdo al objetivo de ésta investigación se consideraron doce semanas consecutivas para el registro de un número suficientemente grande de observaciones que incluye el final de una temporada lluviosa y casi toda la temporada seca siguiente y así obtener estimaciones representativas y confiables de la magnitud de UHI.

3.5 Procesamiento de datos

Los sensores reportaron una cantidad considerable de datos atípicos y datos inexistentes (que se reportaron como ceros o como NAN) por lo que es necesario eliminar los datos atípicos, interpolar los datos faltantes y eliminar el ruido con métodos de suavizado. En la sección 1.5 se explicaron brevemente algunas técnicas para el procesamiento de datos. La escogencia de los métodos se basó en cuales son más benéficos en cuanto a facilidad de cálculo, no alteración de la dinámica y la capacidad para manejar gran número de mediciones. Para la eliminación de datos atípicos se

programó la prueba de Tukey, para reemplazar estos datos y los valores inexistentes se utilizó interpolación mediante trazadores (*splines*) de tercer grado y por último los datos se suavizaron por el filtro de media móvil y el filtro de Savitzky-Golay. El software seleccionado para hacer estos cálculos es MATLAB® interface de cuarta generación, versión R2018a, desarrollado por The MathWorks.

3.6 Análisis de resultados

Posterior al procesamiento de datos, se hizo un análisis gráfico comparando las observaciones urbanas con las del nodo rural para identificar y analizar las diferentes tendencias. Finalmente, con el fin de cuantificar la isla de calor urbana en la ciudad se calculó la temperatura media diurna y nocturna y la diferencia entre la zona de referencia y las zonas urbanas.

4. Resultados y Análisis

La etapa de monitoreo logró obtener 96 días de medición de temperatura y con ello más de 620.000 observaciones reportadas por los sensores instalados (1 por cada minuto transcurrido). La Figura 2 muestra un ejemplo de cómo los sensores reportaron los datos, en este caso entre las 0500 h y las 0900 h el 28 de mayo de 2018. Se puede observar intermitencia en las mediciones, datos atípicos y ruido por lo que es necesario el procesamiento de datos.

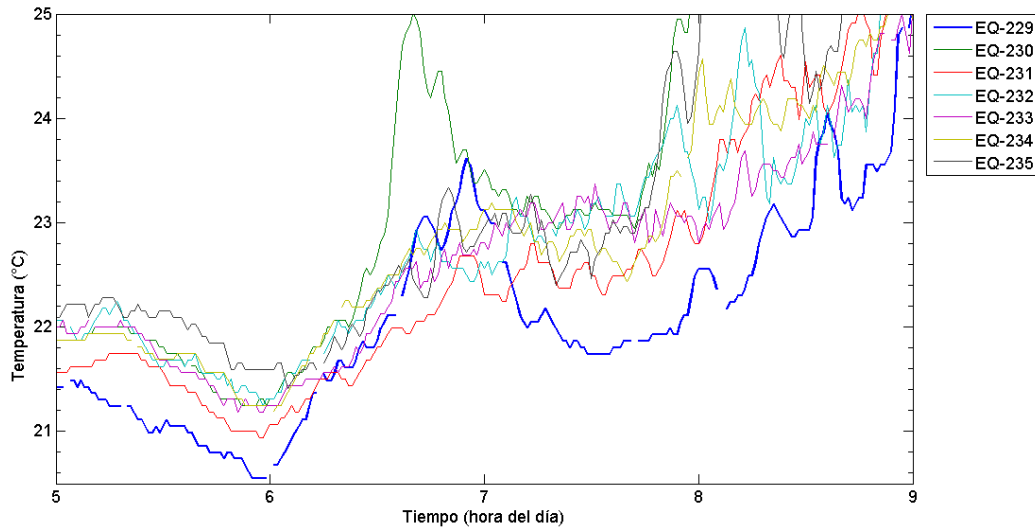


Figura 2. Datos de temperatura reportados por los siete sensores entre las 0500 h y las 0900 h el 28 de mayo de 2018. Los valores de referencia están representados por la línea azul (EQ-229)

4.1 Procesamiento de datos

El primer ítem para tener en cuenta fue la carga de la batería de los sensores, debido a que afecta directamente la medición: baja carga en la batería disminuiría la calidad en la medición de la temperatura y hasta podría no tomarla. Es importante tener en cuenta que los datos de carga de batería reportados por el sensor registran cero cuando la batería está completamente cargada. Posteriormente se trabajó el mismo procedimiento con las mediciones de temperatura.

4.2 Eliminación de datos atípicos

Para la eliminación de valores atípicos se aplicó la prueba de Tukey a los datos de temperatura y los datos reportados por la carga de la batería. La prueba se hizo necesaria únicamente para los valores atípicos que reportó la carga de la batería ya que no se detectaron en los datos de

temperatura. La Figura 3 muestra la eliminación de estos valores en el nivel de carga de la batería del nodo EQ-233 el 1 de junio de 2018.

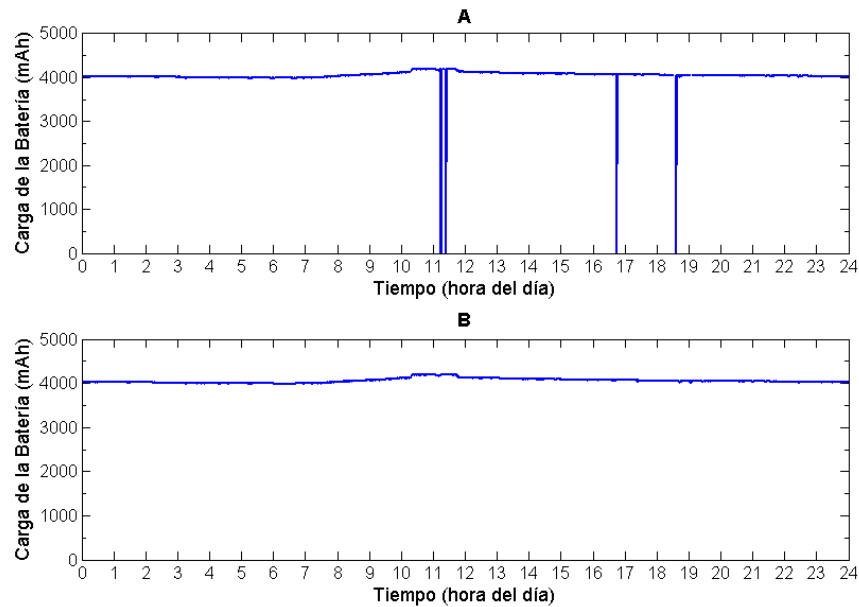


Figura 3. Eliminación de valores atípicos. A. Datos brutos de carga de la batería del nodo EQ-233 el 1 de junio de 2018. B. Los mismos datos, después de la eliminación de valores atípicos.

4.3 Manejo de datos faltantes

Los registros advierten que se presentaron algunas discontinuidades en los datos de temperatura en los diversos sensores en varios días, debido a fallas puntuales en la comunicación e inconvenientes con la incidencia de luz solar en el panel, principalmente. Esto produjo intermitencias puntuales en las mediciones. Con el fin de lograr continuidad completa de los conjuntos de temperatura y una comparación completa entre los datos durante cada uno de los períodos de tiempo fue necesario hacer una interpolación sobre los datos reales para aproximar las mediciones faltantes. La interpolación de los datos se llevó a cabo utilizando un trazador cúbico

(*cubic spline*). La Figura 4 muestra un ejemplo del resultado de la aplicación del trazador cúbico para imputar los datos faltantes.

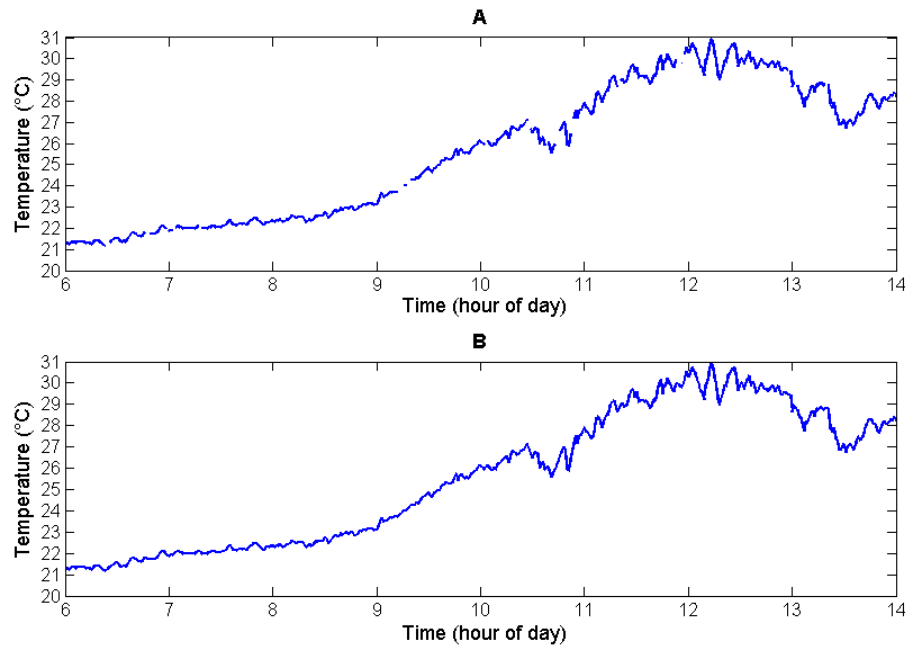


Figura 4. Imputación de datos faltantes usando un trazador cúbico. Los datos mostrados corresponden a las temperaturas informadas por el nodo EQ-233 entre las 0600 h y las 1400 h del 1 de junio de 2018.

4.4 Suavizado de los datos

Con la reducción de ruido se finalizó el procesamiento de datos. Se implementaron y compararon dos técnicas de filtrado de ruido: media móvil y filtro de Savitzky-Golay. La Figura 5 muestra que el filtro de media móvil conserva los mínimos y máximos locales pronunciados y no reporta los primeros datos de medición, mientras que, el segundo método presenta mejores resultados en cuanto a suavizado de la gráfica y al modelamiento de los datos. Este último se eligió para la eliminación del ruido.

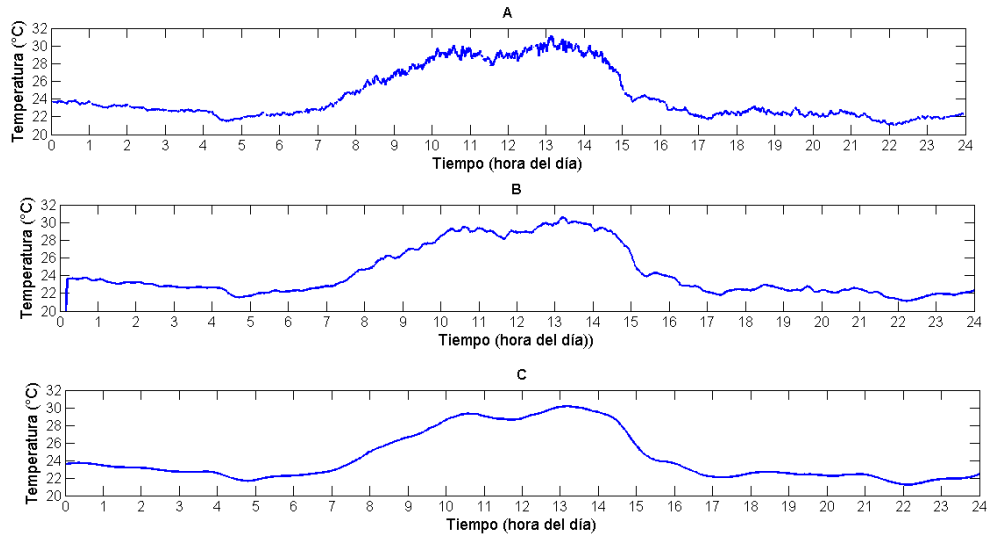


Figura 5. Comparación entre las técnicas de reducción de ruido, para los datos de temperatura recopilados por EQ-233 el 1 de junio de 2018. A. Datos sin procesar. B. Datos después de la aplicación de la media móvil. C. Datos después de la aplicación del filtro Savitzky-Golay.

4.5 Análisis de resultados

Con el fin de facilitar los análisis, se dividió la etapa de monitoreo en tres periodos, en los cuales trabajaron diferentes combinaciones de sensores: el primer periodo (P1) va desde el 18 de mayo hasta el 28 de mayo (11 días), el segundo periodo va desde el 29 de mayo hasta el 19 de junio (22 días), y el tercer periodo va desde el 20 de junio al 29 de junio y desde el 7 de julio al 21 de agosto (56 días). En la Tabla 2 se observa los sensores que trabajaron en cada uno de estos periodos, se puede observar que en el P1 trabajaron todos los sensores instalados, y que por fallas en la batería los sensores EQ-231, EQ-232 y EQ-234 dejaron de hacerlo. La fracción del día comprendida entre las 0601 h y las 1800 h se definió como diurna y entre las 1801 h y las 0600 h se definió como nocturna.

Tabla 2.

Sensores que reportaron resultados en cada uno de los periodos de medición.

Sensor Período	EQ-229	EQ-230	EQ-231	EQ-232	EQ-233	EQ-234	EQ-235
P1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
P2	✓	✓	-	✓	✓	-	✓
P3	✓	✓	-	-	✓	-	✓

Para obtener una visión más general, se promediaron los valores diarios de temperatura a cada hora del día, durante los tres periodos de la etapa de monitoreo, la Figura 6 muestra la comparación de las temperaturas medias en el período P1.

Es importante resaltar que la temperatura media diurna que reporta el nodo 231 es más baja que la del nodo de referencia, sobre todo de 9:00 am a 2:00 pm, el sensor está ubicado en la esquina de la calle 36 y carrera 20 cerca al parque Santander, esto se debe a que las masas de árboles aparte de crear espacios de sombra, ayudan a aumentar la humedad relativa del aire, y al evaporarse el agua, ésta absorbe calor, lo que hace que se reduzca la temperatura del ambiente (Manabe & Wetherald, 1967) en comparación con los demás nodos, que se ubicaron en donde no había, o había muy pocas zonas verdes.

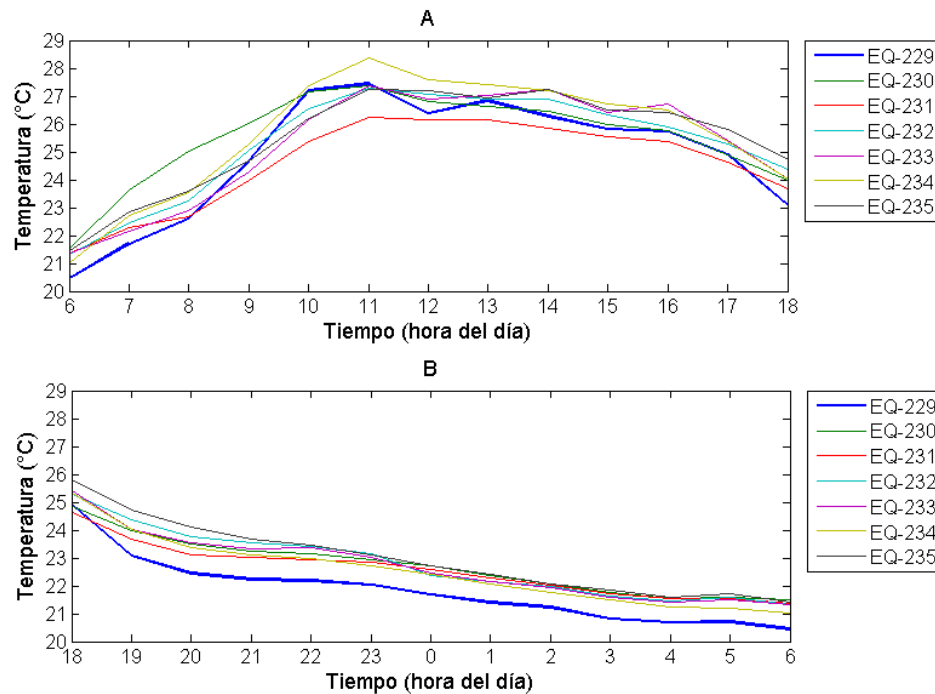


Figura 6. Temperatura media de los nodos reportados en el P1. Diurno (A) y nocturno (B).

Las Figuras 7 y 8 muestran la comparación de las temperaturas medias en cada momento del día, durante el período P2 y P3 respectivamente, en ellas encontramos similitudes, como la velocidad de elevación de la temperatura media en el nodo 230 al inicio del día, vemos que este se encuentra ubicado en la calle 36 con carrera 15, un espacio abierto aunque con grandes edificios a su alrededor, (como lo son el de Colseguros, Telebucaramanga y Davivienda) es un claro ejemplo de como el pavimento absorbe rápidamente el calor y la poca circulación de aire debida a los grandes edificios elevan precipitadamente la temperatura de la zona.

En las Figuras 6, 7 y 8 es posible ver también la dificultad que tienen los materiales urbanos de liberar en la noche el calor absorbido durante el día, apreciándose marcadas diferencias desde 1 °C hasta 2 °C. Durante el día no se evidencian grandes diferencias de temperatura entre los nodos urbanos y el nodo de referencia, sus comportamientos en cuanto a la fase de calentamiento son similares.

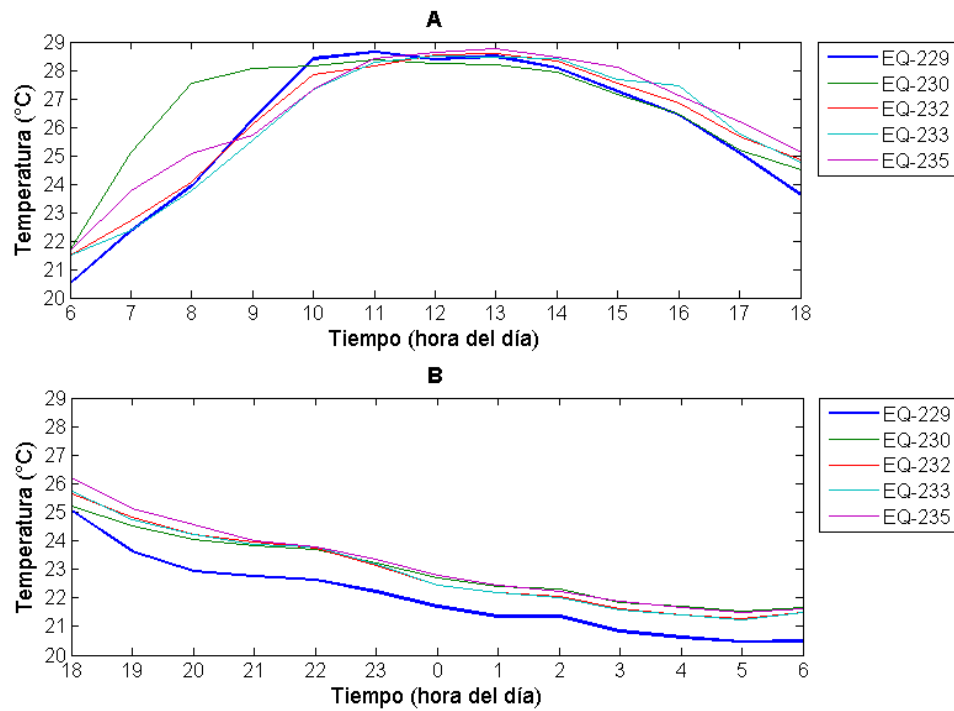


Figura 7. Temperatura media de los nodos reportados en el P2.

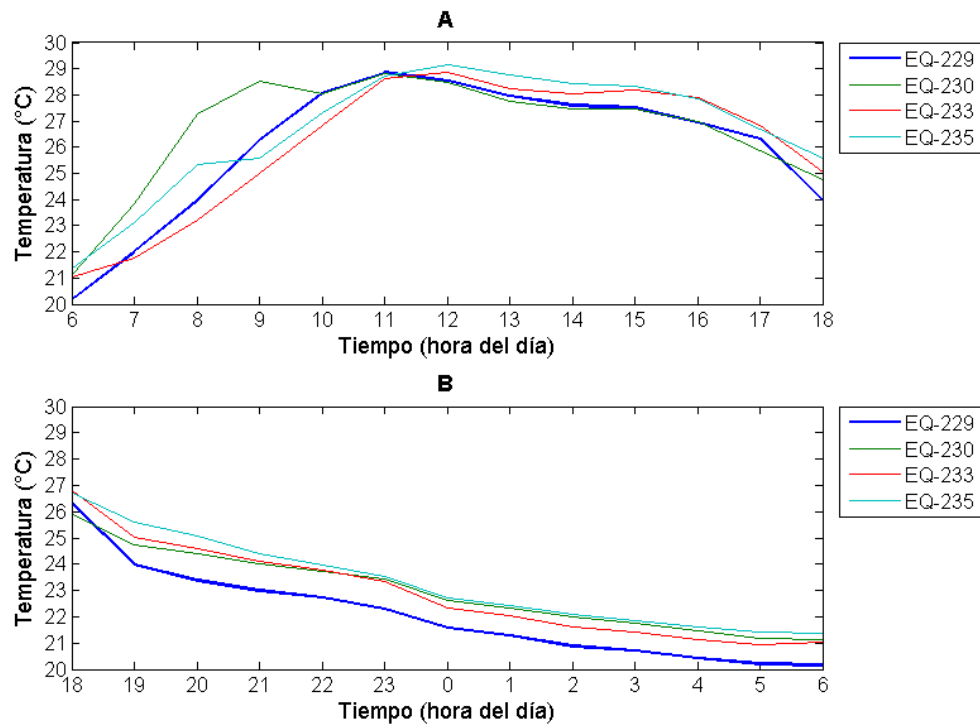


Figura 8. Temperatura media de los nodos reportados en el P3.

Finalmente, se calcularon los valores medios de temperatura diurna y nocturna para todos los nodos de medición, en cada uno de los tres períodos y se halló la diferencia de temperatura con respecto al nodo de referencia. De esta manera se logra una cuantificación más apropiada de la magnitud de la isla de calor urbana.

Tabla 3.

Temperatura media del aire medida por los diferentes nodos en cada periodo del estudio. ΔT : diferencia entre la temperatura media del nodo y la temperatura media del nodo de referencia. NA: no aplicable. ND: no hay datos.

Nodo	P1				P2				P3			
	Diurno		Nocturno		Diurno		Nocturno		Diurno		Nocturno	
	Prom	ΔT	Prom	ΔT	Prom	ΔT	Prom	ΔT	Prom	ΔT	Prom	ΔT
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
EQ-229	24.9	NA	21.5	NA	26.0	NA	21.8	NA	26.5	NA	21.7	NA
EQ-230	25.5	0.6	22.5	1.0	26.6	0.6	22.8	1.0	26.6	0.1	22.7	1.0
EQ-231	24.6	-0.3	22.4	0.9	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
EQ-232	25.3	0.4	22.5	1.0	26.2	0.2	22.7	0.9	ND	ND	ND	ND
EQ-233	25.2	0.3	22.4	0.9	26.1	0.1	22.7	0.9	26.1	-0.4	22.6	0.9
EQ-234	25.6	0.7	22.2	0.7	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
EQ-235	25.5	0.6	22.7	1.2	26.5	0.5	22.9	1.1	26.6	0.1	23.0	1.3

La Tabla 3 muestra valores de intensidad nocturna superiores a los valores de la intensidad registrada durante el día. Así mismo, se observan algunas temperaturas del sensor de referencia por encima de las temperaturas urbanas, estas son características encontradas en la literatura sobre la isla de calor de la capa de dosel, ya que, los valores más altos de temperatura del aire se registran en el límite de las áreas urbanas y suburbanas comparado con el aumento lento y variable de la temperatura en la ciudad (United States Environmental Protection Agency, 2008).

A partir del período 2 se observa un aumento en los valores de la temperatura diurna, lo cual señala una reducción en los flujos de aire característicos de la temporada de lluvia para dar paso a la estación seca en donde predomina el cielo claro y despejado y se alcanzan intensidades especialmente elevadas (Voogt, 2004). Así mismo, es posible determinar una magnitud promedio nocturna de la UHI de 1.0 °C durante los tres períodos.

5. Conclusiones

Se implementó una red de medición de temperatura en tiempo real para determinar la posible existencia de UHI en el centro urbano de Bucaramanga a través del procesamiento de un conjunto de datos por minuto. Se aplicaron algunas técnicas de procesamiento de datos: eliminación de datos atípicos, imputación de datos faltantes y filtrado de ruido.

Se determinó la existencia de la isla de calor urbano en la ciudad con una intensidad nocturna constante de 1.0 °C para los tres periodos. Por el contrario, la magnitud de la intensidad diurna está relacionada a las variaciones estacionales, intensidad solar y a las características superficiales de los materiales urbanos como la capacidad de almacenamiento y emisión de calor. La presencia de este fenómeno se convierte en un problema ambiental que afecta a toda la población urbana principalmente por el discomfort térmico, lo que conlleva a un aumento en el consumo de energía para el uso de sistemas de aire acondicionado y refrigeración y en paralelo afectando los recursos naturales.

6. Recomendaciones

La ciudad de Bucaramanga requiere de la preservación de las zonas verdes que se encuentran en el área urbana, así como de estudios detallados en el diseño y parámetros de planificación para reducir los efectos del fenómeno UHI y lograr un ambiente mejor para sus habitantes.

Referencias Bibliográficas

Akbari, H. (2007). Opportunities for saving energy and improving air quality in urban heat islands. *U.S. Department of Energy Office of Scientific and technical Information*, 1-62.

Anderson, B., & Moore, J. B. (1979). *Optimal Filtering*. New Jersey: Prentice-Hall Inc.

Chapra, S. C., & Canale, R. (2011). *Métodos numéricos para ingenieros* (6 ed.). McGraw Hill.

Chersich, M., Wright, C., Venter, F., Rees, H., Scorgie, F., & Erasmus, B. (2018). Impacts of Climate Change on Health and Wellbeing in South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 1-14.

DANE. (2018). Colombia, Proyecciones de población municipales por área. Bucaramanga, Santander, Colombia.

Daponte, P., Grimaldi, D., & Marinov, M. (2002). Real-time measurement and control of an industrial system over a standard network: implementation of a prototype for educational purposes. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 962-969.

Iglewicz, B., & Hoaglin, D. C. (1993). *How to detect and handle outliers* (Vol. 16). Toronto: American Society for Quality.

Kenward, A., Yawitz, D., Sanford, T., & Wang, R. (2014). Summer in the city: Hot and getting hotter. *Climate Central*, 1-29.

Li, D., & Edwards, E. (2001). Automatic Estimation of Dixon's test for extreme values using a SAS Macro Driven Program. *PharmaSug*.

Manabe, S., & Wetherald, R. (1967). Thermal Equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *Journal of the atmospheric sciences*, 241-259.

- Manik, T. K., & Syaukat, S. (2015). The impact of urban heat island: Assessing vulnerability in Indonesia. *Asian Cities Climate Resilience*, 1-83.
- MathWorks®. (27 de Enero de 2019). *Filter*. Obtenido de MathWorks Documentation: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/filter.html>
- MathWorks®. (27 de Enero de 2019). *sgolayfilt*. Obtenido de MathWorks Documentation: <https://la.mathworks.com/help/signal/ref/sgolayfilt.html>
- Mills, G. (2008). Luke Howard and The Climate of London. *Royal Meteorological Society*, 153-157.
- Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The Urban Heat Island effects, it's causes and mitigation with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 522-538.
- Oke, T. R. (1982). The Energetic Basis of the Urban Heat Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1-24.
- Saaroni, H., & Ziv, B. (2010). Estimating the urban heat island contribution to urban and rural air temperature differences over complex terrain. *American Meteorological Society*, 2159-2166.
- Santamouris, M. (2014). On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. *Energy and Buildings*, 100-113.
- Savitzky, A., & Golay, M. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, 1627-1623.
- Tukey, J. W. (1977). *Data Analysis Exploratory*. London: Addison-Wesley Publishing Co.
- United States Environmental Protection Agency. (2008). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. 2-22.
- Voogt, J. A. (2004). Urban Heat Island: Hotter Cities. *Actionbioscience*.

Wolfgang, C., Yohe, G., Auffhammer, C., Huggel, C., Molau, U., Da Silva, M. A., . . . Tibing, L. (2014). Detection and attribution of observed impacts. En I. P. (IPCC), *Climate Change 2014: Impact, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspect. Contribution of working Group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (págs. 979-1037). Cambridge & NY. Obtenido de IPCC ().

World Meteorological Organization. (1992). Measurement of Temperature and Humidity. (196).

World Meteorological Organization. (2008). Guide to meteorological instruments and methods of observation. (2300).

Xu, S., Lu, B., Michael, B., Edgar, T. F., Blevins, T., & Nixon, M. (2015). Data Cleaning in the process industries. *Reviews in Chemical Engineering - De Gruyter*, 1-30.

Apéndices

Apéndice A. Áreas de estudio



Fotografía carrera 15



Panorámica carrera novena



Fotografía área de referencia

Apéndice B. Fotografía aérea del área de estudio

Fuente: Google Earth. (2018). Google Earth. Bucaramanga, Santander, Colombia.