

**IDENTIFICACION DE ISLAS DE CALOR Y SU INFLUENCIA EN EL AMBIENTE
ATMOSFÉRICO DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA**

MÓNICA LILIANA HERNÁNDEZ PEDRAZA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2013

**IDENTIFICACION DE ISLAS DE CALOR Y SU INFLUENCIA EN EL AMBIENTE
ATMOSFÉRICO DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA**

MÓNICA LILIANA HERNÁNDEZ PEDRAZA

**Trabajo de grado para optar al título de
ESPECIALISTA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Director:
AMÍLCAR RIZZO ALVARADO
MSc. Ingeniería Ambiental**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2013

A mi esposo
Carlos Julián

AGRADECIMIENTOS

A Dios porque fue la luz que iluminó este camino recorrido.

Al profesor Amílcar Rizzo, director de este proyecto, por todos los conocimientos y enseñanzas aportadas para la realización de este trabajo.

Al Dr. Crisóstomo Barajas por sus aportes y recomendaciones durante la evaluación de este trabajo.

A la CDMB por suministrar los datos necesarios para realizar este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	14
2. OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo General	16
2.2 Objetivos Específicos	16
3. MARCO TEÓRICO	17
3.1 LA ISLA DE CALOR	17
3.1.1 Tipos de isla de calor	18
3.1.2 Forma espacial de una isla de calor	20
3.1.3 Intensidad de la isla de calor	21
3.1.4 Características superficiales de la isla de calor	21
3.1.5 Forma temporal de las islas de calor	22
3.1.6 Factores que contribuyen a la ocurrencia de una isla de calor	22
3.1.7 Calidad del aire y Temperatura	25
3.1.8 Ozono troposférico	26
3.2 PARÁMETROS ATMOSFÉRICOS RELACIONADOS CON LA ISLA DE CALOR	28
3.2.1 El viento	28
3.2.2 Radiación solar	28
3.2.3 Temperatura	29
3.2.4 Humedad relativa	30
3.2.5 Lluvias	30
3.2.6 Calentamiento Global y Cambio Climático	31
3.3 EL MUNICIPIO DE BUCARAMANGA	32
3.3.1 Dinámica demográfica de Bucaramanga	32

3.3.2 Flujo vehicular	33
3.3.3 Emisiones atmosféricas	33
3.3.4 Meteorología de la zona	36
4. METODOLOGÍA	37
4.1 Etapa 1. Identificación de Islas de Calor	38
4.2 Etapa 2. Relación Islas de calor- Calidad del aire	41
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
5.1 Variación de la temperatura con el tiempo	42
5.2 Comparación entre las temperaturas rural y urbana	47
5.3 Efecto de la temperatura sobre la calidad del aire	50
5.4 Estrategias de mitigación	55
6. CONCLUSIONES	57
7. RECOMENDACIONES	58
8. BIBLIOGRAFÍA	59

LISTA DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Promedios de la dirección y velocidad del viento en las estaciones del IDEAM para Bucaramanga.	36
Tabla 2	Valores de intensidad de las islas de calor en la zona Centro de Bucaramanga	48
Tabla 3	Valores de intensidad de las islas de calor en la zona Ciudadela Real de Minas de Bucaramanga.	48
Tabla 4	Valores de intensidad de las islas de calor en la zona Norte de Bucaramanga.	48
Tabla 5	Valores concentración de ozono a diferentes horas registrados en las estaciones ECB, ECRM y EHN.	54

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1	Dibujo esquemático de una Isla de Calor urbana.	18
Figura 2	Representación esquemática de los componentes principales de la atmósfera urbana.	19
Figura 3	Representaciones características de las islas urbanas de calor.	20
Figura 4	Evapotranspiración, escorrentía e infiltración según la superficie.	24
Figura 5	Mapa de la ciudad de Bucaramanga.	35
Figura 6	Prevalencias de direcciones de vientos en Bucaramanga.	37
Figura 7	Foto de una estación meteorológica de la CDMB.	39
Figura 8	Ubicación de las estaciones meteorológicas EHN, ECB y ECRM de la CDMB, representadas sobre el mapa de la división por comunas de la ciudad de Bucaramanga	40
Figura 9	Comportamiento de la temperatura desde el año 2009 hasta el año 2012, registrados por la estación ECB en el periodo enero a marzo y comparación con los registros de la estación ERR.	43
Figura 10	Comportamiento de la temperatura desde el año 2009 hasta el año 2012, registrados por la estación ECB en el periodo julio a septiembre y comparación con los registros de la estación ERR.	43
Figura 11	Variación de la temperatura desde 2009 hasta 2012, desde enero a marzo, en la estación ECRM y comparación con los registros de la estación ERR.	44
Figura 12	Variación de la temperatura desde 2009 hasta 2012, desde julio a septiembre, en la estación ECRM y comparación con los	45

	registros de la estación ERR.	
Figura 13	Variación de la temperatura desde 2010 hasta 2012, durante el periodo enero a marzo, en la estación EHN y comparación con los registros de la estación ERR.	46
Figura 14	Variación de la temperatura desde 2010 hasta 2012, durante el periodo julio a septiembre, en la Estación EHN y comparación con los registros de la estación ERR.	46
Figura 15	Relación entre temperatura y concentración de ozono en la zona centro de Bucaramanga, durante el periodo enero a marzo.	51
Figura 16	Relación entre temperatura y concentración de ozono en la zona centro de Bucaramanga, durante el periodo julio a septiembre.	51
Figura 17	Relación entre temperatura y concentración de ozono en la zona Ciudadela Real de Minas de Bucaramanga, durante el periodo enero a marzo.	52
Figura 18	Relación entre temperatura y concentración de ozono en la zona Ciudadela Real de Minas de Bucaramanga, durante el periodo julio a septiembre.	52
Figura 19	Relación entre temperatura y concentración de ozono en la zona Norte de Bucaramanga, durante el periodo enero a marzo.	53
Figura 20	Relación entre temperatura y concentración de ozono en la zona Norte de Bucaramanga, durante el periodo julio a septiembre.	53

RESUMEN

TÍTULO: IDENTIFICACION DE ISLAS DE CALOR Y SU INFLUENCIA EN EL AMBIENTE ATMOSFÉRICO DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA*

AUTOR: HERNÁNDEZ PEDRAZA Mónica Liliana**

PALABRAS CLAVES: Isla de Calor Urbana, Temperatura, Ozono Troposférico.

Este estudio muestra la identificación de Islas de Calor en la ciudad de Bucaramanga, mediante el análisis del comportamiento de la temperatura de la ciudad con respecto a la temperatura en área rural. Los datos de temperatura del área urbana, fueron obtenidos de la base de datos de la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDBM), los cuales se registraron en tres estaciones meteorológicas ubicadas en las comunas Norte, Ciudadela y Centro de Bucaramanga. Los datos de temperatura del área rural corresponden a una estación meteorológica ubicada en zona rural del municipio de Piedecuesta. El periodo de tiempo analizado correspondió a los dos periodos de tiempo seco, definidos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y de Estudios Ambientales (IDEAM), de Enero a Marzo y de Julio a Septiembre, durante los años 2009 a 2012.

Para evaluar la influencia del fenómeno de Islas de Calor en la ciudad se utilizaron los valores de concentración de Ozono Troposférico registrados por las mismas estaciones, durante el mismo periodo de tiempo. El tratamiento de datos se realizó estadísticamente, mediante comparación de series de datos.

Los resultados de este estudio mostraron la existencia de Islas de Calor que se forman a diferentes horas y que tienen diferentes intensidades, en los sectores urbanos comprendidos entre las comunas Norte, Centro y Ciudadela de la ciudad de Bucaramanga. Además se logró evidenciar cierta influencia que ejerce el fenómeno de Isla de Calor en el ambiente atmosférico de la ciudad, sustentada esta apreciación en la naturaleza fotoquímica del proceso de formación del Ozono Troposférico.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Director: Amílcar Rizzo.

ABSTRACT

TITLE: IDENTIFICATION OF HEAT ISLANDS AND THEIR INFLUENCE ON THE ATMOSPHERIC ENVIRONMENT BUCARAMANGA*.

AUTHOR: HERNÁNDEZ PEDRAZA Mónica Liliana**

KEY WORDS: Urban Heat Island, Temperature, Tropospheric Ozone.

This study shows the identification of Heat Island in the city of Bucaramanga, by analyzing the temperature behavior of the city with respect to temperature in rural area. The temperature data of the urban area, were obtained from the database of the Corporation for the Plateau Defense of Bucaramanga (CPDB), which were recorded in three meteorological stations in Center, Citadel and North Bucaramanga communes. Temperature data from rural areas correspond to a meteorological station located in a rural area of the municipality of Piedecuesta. The time period analyzed corresponded to the two dry periods, defined by Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IHMES), from January to March and July to September, during the years 2009-2012.

To evaluate the influence of Heat Island phenomenon in the city we used the values of tropospheric ozone concentration recorded by the same stations during the same time period. Data processing was done statistically, by comparing data sets.

The results of this study showed the existence of Heat Islands that form at different times and with different intensities, in urban communes between North, Central and Citadel of Bucaramanga city. Also evident was achieved some influence of the Heat Island phenomenon in the atmospheric environment of the city, based that assessment on the nature of the process photochemical formation of tropospheric ozone.

* College Thesis.

** Faculty of Engineering physicochemical, School of Chemistry Engineering, Directed by: Amílcar Rizzo.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día existe una gran preocupación por los efectos que tiene en el clima urbano las alteraciones provocadas por el hombre en el medio ambiente. Estas perturbaciones han generado microclimas artificiales, que dan lugar a diferencias claras entre el clima de la ciudad y el clima de los alrededores rurales inmediatos.

Una de las principales alteraciones de origen antrópico es el aumento de la temperatura en las ciudades con el transcurrir de los años, debido a diversos factores como el aumento en la densidad poblacional, el incremento del flujo vehicular y sus emisiones al medio ambiente, la construcción poco planificada de grandes edificios y proyectos, las deficiencias en la malla vial que ocasiona aglomeración de vehículos en diversas partes de las ciudades y, por la tala indiscriminada de árboles y la pérdida continua de material vegetal que cubre el suelo en aras de transformar la ciudades en grandes urbes con estilos modernos.

El fenómeno de aumento de temperatura se le denomina Isla de Calor Urbana. Para detectar la existencia o no de este fenómeno, se debe analizar las diferencias de temperatura entre la ciudad y las temperaturas del área rural circundante. El aumento desmedido en la frecuencia de aparición y la intensidad de las Islas de Calor Urbanas trae consigo consecuencias negativas para el medio ambiente ya que favorece la permanencia en el atmósfera urbana de contaminantes atmosféricos de tipo secundario como el ozono troposférico.

El efecto de las Islas de Calor Urbano puede contrarrestarse mediante el uso de vegetación ya que la presencia de plantas disminuye la intensidad de las islas de calor haciendo que el aire se caliente menos.

En este trabajo se ha probado la presencia de islas de calor en la ciudad de Bucaramanga, mediante observación y análisis de la evolución temporal de la temperatura urbana en comparación con la del área rural circundante. De otro

lado, se ha logrado establecer una relación directa entre la concentración de ozono troposférico en el ambiente urbano y la existencia de Islas de Calor Urbano.

2. OBJETIVOS

2.1 GENERAL

Realizar un análisis retrospectivo del comportamiento meteorológico y de calidad del aire, identificar la presencia de islas de calor y evidenciar la influencia de este fenómeno de degradación en el ambiente atmosférico de la ciudad de Bucaramanga.

2.2 ESPECÍFICOS

1. Revisar la bibliografía técnico-científica relacionada con el fenómeno de formación de islas de calor e identificar las variables climáticas, topográficas y antropogénicas que rigen su formación.
2. Definir y desarrollar un procedimiento metodológico que permita evidenciar la presencia de islas de calor en Bucaramanga.
3. Detectar la posible influencia de las islas de calor en el ambiente atmosférico urbano.
4. Proponer estrategias ambiental o ecológicamente prácticas que permitan mitigar la presencia fenómeno.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 LAS ISLAS DE CALOR

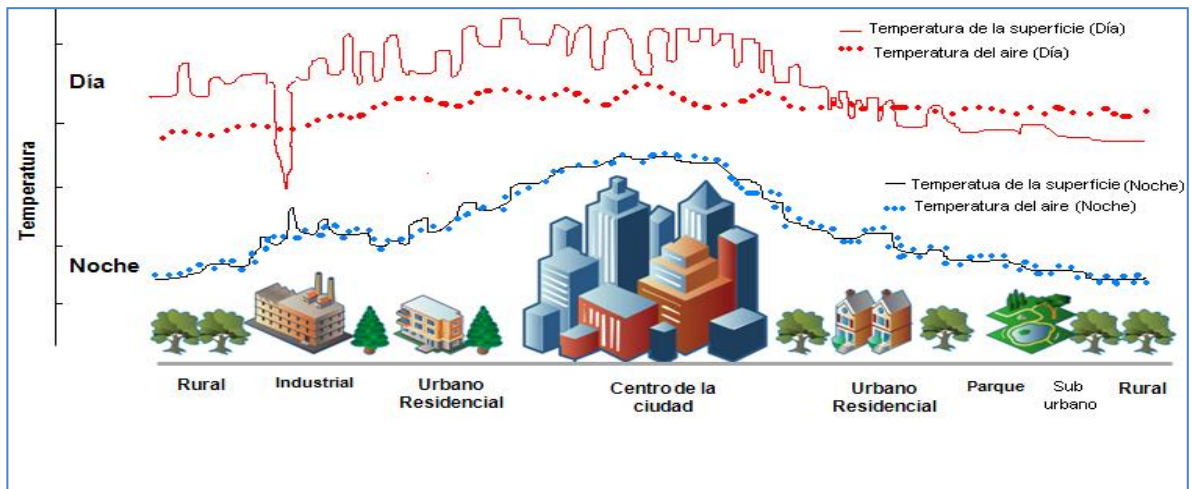
Se denomina Isla de Calor al fenómeno de origen antrópico de ocurrencia urbana caracterizado por presentar un aumento de las temperaturas medias de la ciudad, en comparación con su entorno rural inmediato. La isla de calor es un ejemplo de modificación climática no intencional, cuando la urbanización le cambia las características a la superficie y al ambiente atmosférico próximo a la superficie terrestre¹. La isla de calor se forma cuando el aire caliente tiende a acumularse en el centro de la ciudad, debido a la concentración de edificios y de calles pavimentadas. Este aire caliente se eleva arrastrando consigo la carga de contaminantes; luego, se expande hacia los bordes de la ciudad y se enfría. De este modo, en los bordes de la ciudad el aire más frío fluye de nuevo hacia el centro, cerca de la superficie del suelo, formando así un sistema circulatorio autocontenido, que sólo se puede alterar o romper por el efecto de un viento fuerte¹. . La Figura 1 es un dibujo esquemático que representa la presencia de una isla de calor urbana. Como se puede observar en el perfil de temperaturas, estas aumentan en el sector urbano, comparadas con las del sector semi urbano o rural de la ciudad.

Diversos factores favorecen la formación de una isla de calor; por ejemplo, las superficies de las ciudades las cuales son impermeables, con rápidas escorrentías y espacios verdes reducidos. La presencia además, de automóviles, la calefacción y la industria, entre otros² factores.

¹ FERGUSON, B., FISHER, K., GOLDEN J., *et al*, (2005). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Basics. EPA, p.p. 1-37.

² GIRIDHARAN, R., LAU, Y., GANESAN, S., (2005). Nocturnal heat island Effect in urban Residential Developments of Hong Kong. Energy and Buildings, Vol 37, pp 964-971.

Figura 1. Dibujo esquemático de una Isla de Calor Urbana.



Fuente: El Autor.

3.1.1 Tipos de isla de calor

Existen tres tipos de isla de calor, isla de calor de la capa de dosel (ICCD), isla de calor de la capa de perímetro (ICCP) e isla de calor de superficie (ICS). Las dos primeras se refieren a un calentamiento de la atmósfera urbana; la última se refiere al calor radiativo de las superficies urbanas.

La capa de dosel urbana (CDU) es la capa de aire de las ciudades que está más cercana a la superficie, la cual se extiende hacia arriba aproximadamente hasta la altura media de las edificaciones (Figura 2).

Por encima de la capa de dosel se encuentra la capa de perímetro urbana, la cual puede ser de 1 kilómetro (km) o más de espesor durante el día, y encogerse a cientos de metros o menos durante la noche (Figura 1)³. La ICCP es la que forma una cúpula de aire más caliente que se extiende en dirección del viento más allá

³ OKE, T.R., (1995). The heat island characteristics of the urban boundary layer: Characteristics, causes and effects, Wind Climate in Cities, Vol 54, pp. 81-107.

3.1.2 Forma espacial de una isla de calor

En general la forma espacial de una isla de calor se representa mediante isotermas, o líneas de igual temperatura, las cuales forman un patrón semejante al de una “isla” que sigue aproximadamente la forma de la región urbanizada, rodeada por zonas más frías. A menudo hay un aumento intenso de la temperatura del aire en la capa de dosel, en el límite entre áreas rurales y suburbanas, seguido por un aumento lento y a menudo variable hacia el núcleo de la ciudad donde ocurren las temperaturas más altas, como se observa en la figura 2.

Las islas de calor de la capa de perímetro muestran mucho menos variabilidad que los otros tipos de islas de calor, y un corte transversal muestra que en su forma, se parece a una simple cúpula o pluma, donde el aire más caliente es transportado por el viento hacia afuera de la ciudad⁷.

Figura 3. Representaciones características de las islas urbanas de calor, cada número representa una isoterma.



Fuente: www.epa.gov.co

⁷ COLE, D., DIETSCH, N., GERO, G., *et al*, (2005). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies- Heat Islands Reduction Activities, EPA, p.p. 1-20.

3.1.3 Intensidad de la isla de calor

La intensidad de la isla de calor es una medida de la fuerza o magnitud de la isla de calor. Por la noche la intensidad de la isla de calor de la capa de dosel típicamente se encuentra en un rango de entre 1° y 3°C, por encima. Bajo condiciones óptimas, se han registrado intensidades hasta de 12°C^{3,8}. La ICCP tiende a mantener una intensidad de isla de calor más constante tanto durante el día como en la noche (~1.5° a 2°C). La ICS es generalmente más definida durante el día cuando el fuerte calentamiento solar puede llevar a mayores diferencias de temperatura entre las superficies secas y las mojadas, sombreadas o con vegetación⁹.

3.1.4 Características de la superficie y la isla de calor

El tipo de superficie es un factor importante en cuanto a los patrones espaciales de las capas de temperatura del aire superficial y de dosel en la ciudad. Las temperaturas son más altas en aquellas zonas con mayor densidad de construcción y bajo factor de albedo, y son más bajas cerca a parques o zonas más abiertas y arborizadas (Figura 2)^{10,11}. Las temperaturas de la superficie son especialmente susceptibles a las condiciones de la superficie: durante el día las superficies secas y oscuras que absorben luz solar fuertemente se vuelven muy calientes, mientras que las superficies más claras y/o mojadas son mucho más frías^{5,6}. El sombreado de la superficie debido a la presencia de arborización, por ejemplo, ayuda también a controlar la temperatura⁹.

⁸ OKE, T.R., (1997). Urban climates and global change. In Perry A and Thompson R eds. Applied Climatology: Principles and Practices, pp. 273-287.

⁹ BELL, R., COLE, D., DE ANGELO, B., *et al*, (2005) Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies- Trees and Vegetation, EPA, p.p. 1-26.

¹⁰ ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR EN COLOMBIA, (2005). Unidad de Planeación Minero Energética (UMPE), Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), p.p. 157-165.

¹¹ AKBARI, H., POMERANTZ, M. and TAHA, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. Elsevier Science, Vol 70, p.p. 275-310.

3.1.5 Forma temporal de las islas de calor

Todas las islas de calor se forman en las ciudades debido a las diferencias entre las tasas de calentamiento y de enfriamiento con relación a sus entornos. A continuación se presentan algunos aspectos relevantes de los diferentes tipos de isla de calor:

- Islas de calor de dosel ICCD: la intensidad de la isla de calor aumenta con el tiempo, partiendo desde la puesta del sol hasta un máximo entre un período unas pocas horas después de la puesta del sol y las horas previas a la madrugada. Generalmente durante el día la intensidad de la ICCD es bastante débil, y a veces es negativa (*una isla fría*) en algunas partes de la ciudad donde altos edificios u otras estructuras proveen sombra extensa, y donde hay una carencia de calentamiento debido al almacenamiento de calor en los materiales de construcción.
- ICS: es fuertemente positiva tanto durante el día como durante la noche debido a superficies urbanas más calientes. La ICS diurna es generalmente mayor puesto que la radiación solar afecta las temperaturas de las superficies.
- ICCP: es generalmente positiva tanto en el día como en la noche pero mucho menor en magnitud que la ICCD o la ICS³.

3.1.6 Factores que contribuyen a la ocurrencia e intensidad de las islas de calor

Entre los factores atmosféricos que influyen en la formación y aumento de la intensidad de las islas de calor se encuentran: el clima, la localización geográfica,

la hora del día y el periodo estacional del año, la forma o distribución urbanística de la ciudad y las actividades industriales que en ella se realicen.

De manera combinada, el clima, en particular el viento y las nubes, influyen en la formación de islas de calor. Las magnitudes de la isla de calor son mayores bajo condiciones climáticas calmadas y claras. A medida que los vientos aumentan, mezclan el aire y reducen la isla de calor. A medida que las nubes aumentan reducen el enfriamiento nocturno por radiación, y también reducen la isla de calor. Las variaciones estacionales de los patrones climáticos afectan la frecuencia y magnitud de la isla de calor¹².

La localización geográfica de la ciudad influye sobre el clima y la topografía de la zona, así como sobre las características de los alrededores rurales de la ciudad. Como se mencionó antes, el clima regional o local y en especial los sistemas locales de vientos, pueden afectar las islas de calor; por ejemplo, las ciudades costeras pueden experimentar un enfriamiento de las temperaturas urbanas durante el verano cuando las temperaturas de la superficie del océano están más frías que las de la tierra y el viento sopla hacia tierra firme.

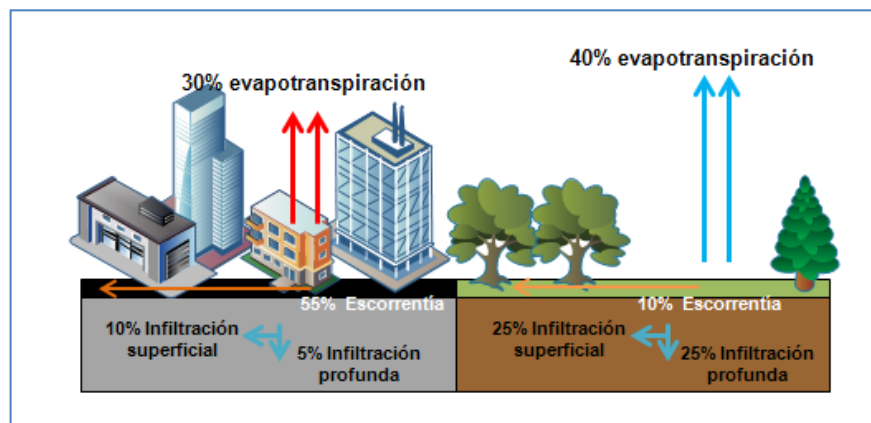
Donde las ciudades están rodeadas por superficies rurales mojadas, el enfriamiento más lento de estas superficies puede reducir las magnitudes de la isla de calor, especialmente en climas cálidos y húmedos^{7,11}. Las islas de calor de ciudades localizadas en latitudes medias, generalmente son más fuertes en el verano o en el invierno. En climas tropicales, la estación seca puede la presencia de las islas de calor.

Al mencionar la forma de la ciudad se incluye los materiales usados en la construcción, las características de las superficies de la ciudad, tales como las dimensiones y espaciamiento de las edificaciones, las propiedades térmicas, y la

¹² SARROCOLEA, P., ALISTE, E., CASTRO, P. y ESCOBEDO, C., (2008). Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. Revista de Climatología, Vol 8, pp 71-84.

cantidad de espacios verdes. La formación de islas de calor es favorecida por materiales de construcción relativamente densos que son lentos en calentarse y enfriarse, y almacenan una cantidad de energía, el reemplazo de las superficies naturales por superficies impermeables o a prueba de agua, lo que induce un área urbana más seca, en donde hay menos agua disponible para la evaporación, lo cual contrarresta el calentamiento del aire y una menor capacidad de las superficies de reverberar la radiación solar; las superficies oscuras, tales como las carreteras de asfalto, absorben más luz solar y se calientan más que las superficies de color claro¹³. La figura 4 es un esquema que representa el porcentaje de evapotranspiración, escorrentía e infiltración superficial y profunda según la superficie.

Figura 4. Evapotranspiración, escorrentía e infiltración según la superficie.



Fuente: www.epa.gov.co

Las actividades económicas e industriales de la ciudad regulan la emisión de contaminantes a la atmósfera urbana, el calor por uso de energía, y el uso de agua en irrigación. El calor antropogénico, o calor generado por las actividades humanas, principalmente la combustión de combustibles fósiles, es importante

¹³ RUIZ, P., ROMERO, M. L., SUÁREZ, M. y HERNÁNDEZ, A., (2008). Isla de Calor en las palmas de Gran Canaria: Intensidad, distribución y factores condicionantes. Boletín de la A.G. E. N° 47, p.p. 157-173.

para la formación de islas de calor¹⁴. En casos selectos, ciudades construidas en forma muy densa pueden presentar calentamiento antropogénico severo durante la época de verano, como consecuencia de un alto uso de energía para enfriar las edificaciones^{9,15}.

3.1.7 Calidad del Aire y Temperatura

Una mayor temperatura en el ambiente urbano puede incrementar la demanda de energía, que generalmente genera mayores niveles de contaminación del aire y las emisiones de gases de efecto invernadero. Actualmente, la mayor parte de energía eléctrica del mundo es producida a partir de la combustión de combustibles fósiles. Por lo tanto, contaminantes emitidos por tales centrales o plantas de energía incluyen dióxidos de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas en suspensión (PM), monóxido de carbono (CO). Estos contaminantes son perjudiciales para la salud humana y contribuyen a los complejos problemas de calidad del aire, tales como la lluvia ácida. Más aún, el uso de combustibles fósiles, aumenta emisión de gases de efecto invernadero, particularmente de dióxido de carbono (CO₂), que contribuyen al cambio climático global.

Además de los aumentos de las emisiones al aire, temperaturas elevadas en el ambiente aumentan la tasa de formación de ozono a nivel del suelo, lo que se produce cuando los NO_x y los compuestos orgánicos volátiles (COV) reaccionan en la presencia de luz solar. Si todas las demás variables se mantienen constantes, tal como el nivel de precursores, la velocidad del viento y dirección a nivel del suelo, la formación de ozono será superior en un clima más soleado y más caliente¹⁵.

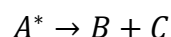
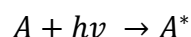
¹⁴ TAHA, H., (1997). Urban climates and heat islands: Albedo, Evapotranspiration and Anthropogenic Heat. *Energy and Buildings*, Vol 25, p.p. 99-103.

¹⁵ AKBARI, H., (2001). Energy Saving Potentials and Air Quality Benefits of Urban Heat Island Mitigation, Heat Island Group Lawrence Berkeley National Laboratory, *Solar energy*, Vol 510, p.p. 1-19.

3.1.8 Ozono troposférico

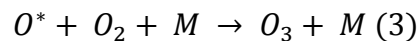
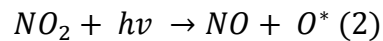
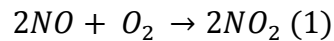
El ozono es la sustancia que desde las capas altas de la atmósfera nos protege de la radiación ultravioleta, pero que en la tropósfera se ha convertido en un contaminante de primer orden. Es el principal protagonista de la contaminación por “smog” fotoquímico y participa con un porcentaje considerable en el calentamiento global del planeta y como consecuencia de su contribución al denominado “efecto invernadero”. El ozono troposférico es un típico contaminante secundario, ya que se forma por la reacción de otros contaminantes, con los componentes naturales de la atmósfera y a expensas de la radiación solar. Junto al ozono, se ha identificado una gran familia de sustancias que participan en complejos procesos de naturaleza fotoquímica, entre las que cabe citar a aldehídos, cetonas, ácidos, peróxido de hidrógeno, nitrato de peroxiacetilo, radicales libres y otras de diverso origen como sulfatos y nitratos.

Esta nueva forma de contaminación en las grandes áreas urbanas es el denominado Smog Fotoquímico, el cual se caracteriza por un nivel relativamente alto de oxidantes que irritan ojos y garganta, ataca a las plantas, produce olores y disminuye la visibilidad. Su origen está en la interacción de la luz solar ultravioleta (UV) de 400 a 200 nm (energías de 290 a 580 kJ/mol) con algunos componentes de la atmósfera. La disociación fotoquímica se puede considerar como un proceso de dos etapas, cuyo mecanismo se resume en las siguientes ecuaciones:

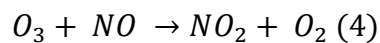


Frecuentemente, el estado excitado A^* es muy inestable por lo que la segunda reacción ocurre rápidamente. Por otro lado, B o C (o ambos) pueden ser altamente reactivos, por lo que originarían una cadena de reacciones químicas responsables del Smog Fotoquímico. Sustancias emitidas por la industria pesada y por las fuentes móviles (vehículos a motor), como el óxido nítrico, NO, y los compuestos

orgánicos volátiles, COVs/VOCs, bajo la acción de la luz solar, constituyen gran parte de la contaminación fotoquímica en la troposfera. Este fenómeno se acrecienta en épocas de gran insolación con bajo régimen de vientos. El óxido nítrico tiene su origen en las combustiones a elevadas temperaturas (como consecuencia de la reacción entre el nitrógeno y el oxígeno presentes en el comburente) y es emitido a la atmósfera, donde se oxida para formar NO_2 , el cual se considera como el principal precursor del ozono, según se observa en las siguientes ecuaciones:



Como se puede apreciar, la presencia de O monoatómico puede dar lugar a la formación de ozono según la ecuación [3] y por tanto se puede concluir que en la tropósfera la presencia de NO, y su lenta conversión en NO_2 , actúa como precursor del O_3 , aquí ya como contaminante, el cual a su vez puede reaccionar con el NO.



Se observa como la presencia de óxidos de nitrógeno, por sí solo, no garantiza la formación de ozono, ya que, a la vez que se está formando a expensas del O liberado en la reacción [2], también se está destruyendo como se indica en la reacción [4]¹⁶.

¹⁶ PEPPER, I.L.; GERBA, C.P.; BRUSSEAU, M.L.; MATHIAS, A.D.; y otros, (1996). Pollution Science. Academic Press. San Diego.

3.2 PARÁMETROS ATMOSFÉRICOS

3.2.1 Viento

El viento es la variable de estado de movimiento del aire, es causado por las diferencias de temperatura existentes al producirse un desigual calentamiento de las diversas zonas de la tierra y de la atmósfera. Las masas de aire más caliente tienden a ascender, y su lugar es ocupado entonces por las masas de aire circundante, más frío y, por tanto, más denso¹⁷.

La dirección del viento depende de la distribución y evolución de los centros isobáricos; se desplaza de los centros de alta presión (anticiclones) hacia los de baja presión (depresiones) y su fuerza es tanto mayor cuanto mayor es el gradiente de presiones. En su movimiento, el viento se ve alterado por diversos factores tales como el relieve, la rugosidad del terreno, la altura de las edificaciones y la turbulencia entre otros¹⁸.

3.2.2 Radiación Solar

La energía liberada del Sol se transmite al exterior mediante la radiación solar, en forma de ondas electromagnéticas. Solo una parte de la radiación alcanza la superficie de la tierra, porque las ondas ultravioletas más cortas, son absorbidas por los gases de la atmósfera fundamentalmente por el ozono.

La radiación terrestre hace parte de la radiación solar, la cual es dispersada o absorbida en la atmósfera y finalmente es reflejada en las nubes o superficie terrestre. En un día soleado con el firmamento descubierto, más de la mitad de la

¹⁷BENAVIDES, H. O. y AYALA L., (2010). Análisis descriptivo de variables meteorológicas que influyen en la calidad del aire de los principales centros industriales del país. Instituto de hidrología, Meteorología y estudios Ambientales, (IDEAM).

¹⁸ Ibid, p.p. 14.

radiación del rango azul (longitud de onda largo $0,45 \mu\text{m}$) se dispersa, produciendo un cielo azul, mientras que el rojo (con $0,65 \mu\text{m}$) hay poca dispersión. La cantidad reflejada depende especialmente de la cantidad y tipo de nubes presentes y de su albedo (relación entre la cantidad de radiación solar reflejada por una superficie y la cantidad incidente en ella expresada en porcentaje)¹⁰.

3.2.3 Temperatura

En general la temperatura del aire en la superficie tiende a ser mayor en latitudes bajas y disminuye en dirección de los polos. No obstante, esta tendencia se ve distorsionada por la influencia de las masas de tierra y agua, la topografía y la vegetación. En el interior de grandes islas y continentes las temperaturas son más altas durante el verano y menores durante el invierno si se comparan con las temperaturas de las zonas costeras de la misma latitud. Las temperaturas en sitios elevados son inferiores a las de los niveles bajos y las vertientes meridionales tienen temperaturas más elevadas que las vertientes septentrionales.

La disminución promedio de la temperatura del aire en contacto con la tierra varía entre $0,1$ y 1°C por cada 100 m de altura (3 a 5°F por cada 1000 pies). Las áreas boscosas presentan valores mínimos más elevados y máximos más bajos que en las zonas desérticas. La temperatura promedio en un área boscosa puede ser 1° o 2°C (2 a 4°F) más baja que la temperatura en campo abierto en condiciones similares; la diferencia aumenta durante el verano^{16,17}.

El calor producido por una gran ciudad, que puede ser aproximadamente igual a la tercera parte de la radiación solar incidente, produce distorsiones locales en el patrón de temperaturas registradas. El promedio anual de temperaturas para ciudades es aproximadamente 1°C (2°F) más alta que para las regiones vecinas; la mayor parte de esta diferencia se debe a los valores más elevados de la temperatura mínima diaria en las ciudades¹⁶.

3.2.4 Humedad Relativa

La humedad relativa se define como la relación entre la cantidad de humedad del aire y la cantidad que el aire contendría a la misma temperatura y presión si estuviese saturado, suele expresarse en porcentaje. En forma similar a la temperatura, el contenido de vapor de agua en la atmósfera alcanza su mínimo en el invierno y su máximo en verano. En el hemisferio norte los meses más secos son enero y febrero, y los más húmedos julio y agosto. La variación diurna del contenido de humedad en la atmósfera es normalmente pequeña, excepto cuando brisas continentales o marinas traen consigo aire con características diferentes. La humedad relativa, se comporta de una manera opuesta a la temperatura, teniendo su máximo temprano por la mañana y el mínimo por la tarde¹⁶.

3.2.5 Lluvias

La lluvia es una precipitación de agua en forma de gotas, se produce por la condensación del vapor de agua que contienen las nubes, cuando las gotas alcanzan un diámetro superior a los 0,5 mm caen a la tierra por la gravedad a una velocidad superior a los 3 m/seg produciendo la lluvia. Al caer la lluvia se distribuye de forma irregular, parte aprovechará para las plantas, parte aumentará los caudales de los ríos por medio de los barrancos y escorrentías que, a su vez aumentaran las reservas de pantanos y embalses y la mayor parte se infiltrará a través del suelo, y discurriendo por zonas de texturas más o menos porosas formará corrientes subterráneas que irán a parar o bien a depósitos naturales con paredes y fondos arcillosos y que constituirán los llamados yacimientos o pozos naturales, o acabarán desembocando en el mar. También disminuye la temperatura de la superficie terrestre.

3.2.6 Calentamiento global y cambio climático

El calentamiento global se refiere al aumento de la temperatura media global de cerca de la superficie de la tierra, es decir de la baja atmósfera terrestre y los océanos. Si bien el fenómeno denominado efecto de invernadero se da de manera natural, ya que algunos de los gases que lo producen tienen su origen en la atmósfera y son los encargados de mantener una adecuada temperatura superficial del planeta permitiendo el desarrollo normal de los seres vivos, el calentamiento global es consecuencia del aporte adicional de los gases denominados de invernadero hacia la atmósfera, debido al desarrollo de ciertas actividades de carácter natural como erupciones volcánicas o de actividades de origen antropogénicas. Sin embargo desde hace algunas décadas el calentamiento global se ha acelerado principalmente por acción antrópica, causando un aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, principalmente H₂O, CO₂ y O₃.

El cambio climático se refiere a cualquier cambio significativo duradero en las medidas del clima, durante un período prolongado de tiempo. En otras palabras, el cambio climático implica cambios importantes en la temperatura, la precipitación, o patrones de viento, entre otros efectos, que se producen durante varias décadas o más tiempo. El IDEAM define el cambio climático como el cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial, y que viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables^{19,20,21}.

¹⁹ REVISIÓN DE LAS CONDICIONES ACTUALES DE LAS REDES DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE EN EL PAÍS, (2005). Convenio Asociación Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

²⁰ DEMEZHKO, D. and GOLOVANOVA, I., (2007). Climatic changes in the Urals over the past millennium – an analysis of geothermal and meteorological data. *Climate of the Past*, Vol 3, p.p. 237–242.

²¹ SCHAEFER, D. and DOMROES, M., (2009). Recent Climate Change in Japan – Spatial and Temporal Characteristics of Trends of Temperature. *Climate of the Past*, Vol 5, p.p. 13–19.

3.3 LA CIUDAD DE BUCARAMANGA

Bucaramanga es la capital del departamento de Santander, ubicada al nororiente de Colombia, sobre una meseta aluvial a unos 930 msnm y dista unos 384 km de la capital del país. Su población asciende a 525.056 habitantes²² y el clima oscila entre cálido y medio. Bucaramanga es una ciudad eminentemente urbana, su población rural solo representa el 1,3% de los habitantes. Está rodeada por los municipios de Girón, Floridablanca y Piedecuesta con los cuales conforma el Área Metropolitana de Bucaramanga, cuya población urbana asciende a 1.033.142 de habitantes.

3.3.1 Dinámica demográfica de Bucaramanga

La población total de Bucaramanga, proyectada por el DANE a 2012 fue de 526.056 habitantes, equivalente al 1,1% del total de la población nacional, de los cuales 519.384 (98,7%) habitan en el casco urbano y 6,672 (1,3%) viven en la zona rural. Por género, el 52,2% de los habitantes son mujeres y el 47,8% son hombres. La desagregación por género y zona es similar a nivel nacional y departamental, al observarse mayor concentración de la población en la zona urbana y representación de las mujeres. Las mujeres en edad fértil, entre los 15 y 49 años representan el 53,9%. En relación a la esperanza de vida al nacer estimada para los años 2010 a 2015, corresponde a 78,5 años en las mujeres y 72,3 años para los hombres, similares a los datos reportados a nivel nacional²¹.

La población de Bucaramanga, en edad productiva representa el 65,2%. La población entre 0 y 14 años disminuyó en 120.475 habitantes en 2011. La caída más importante en materia poblacional se da en los niños y niñas entre 0 y 4 años. Aunado a esto en Santander, Bucaramanga notificó el mayor número de casos de

²² VARGAS, F., FERNÁNDEZ, R. y PRADILLA, G., (2010). Plan de ordenamiento territorial, Bucaramanga herencia de todos. Oficina asesora de planeación- Alcaldía de Bucaramanga.

muerres perinatales en 2010, tasa de 10,3 por mnv, lo cual aumenta dicha problemática²¹.

3.3.2 Flujo Vehicular

Desde febrero de 2010 el Sistema Integrado de Transporte Masivo del Área Metropolitana de Bucaramanga llamado Metrolínea, empezó a funcionar en Bucaramanga, variando significativamente el flujo vehicular de las principales carreteras de la ciudad. Actualmente la avenida El Libertador también llamada carrera 15, es de uso exclusivo del sistema Metrolínea, por tanto otras vías antiguamente no muy transitadas han sido habilitadas para el desplazamiento del resto de vehículos. Por la carrera 27 circulan el sistema Metrolínea y autos particulares y por la carrera 33 el todo el transporte de servicio público y vehículos particulares, lo que hace que esta importante vía se encuentre congestionada la mayor parte del tiempo. En la actualidad existen diferentes puntos críticos de la malla vial de la ciudad en donde se concentra la mayoría de las rutas que conservan buses convencionales, además de automóviles particulares, estos lugares llamados de sitios de embotellamiento se evidencian especialmente en las horas pico (7-8 am, 12-2 pm y 6-7 pm) en las carreras 33, 36, 27, 15, 13, calles 45, 36, 34 y autopistas.

3.3.3 Emisiones atmosféricas

El aumento de la población asentada en la ciudad, el crecimiento indiscriminado del parque automotor y una malla vial deficiente ha producido altos índices de contaminación en la ciudad de Bucaramanga. El índice de la calidad del aire IBUCA, medido por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa para la Meseta de Bucaramanga (CDMB), está entre 2,51 y 7,50 en una gama de medición de 0 a 10, dicho valor debe permanecer en un intervalo de 0 a 1,25 para que el ambiente sea saludable y se eviten enfermedades respiratorias o de la piel.

Los últimos informes sobre contaminación visual y auditiva no son buenos ya que se plantea necesario bajar los niveles de ruido en las principales vías. Los informes revelaron que fueron las fuentes móviles tales como buses, los camiones, las motos y los carros los que más aportan al problema. A los aproximadamente 150 mil vehículos que a diario rodaron por la ciudad durante 2011, se les atribuyó el 80% de la polución²³.

Según el informe presentado por la CDMB, en el caso de Cabecera, la calidad del aire en el sector de la carrera 33 desmejoró debido a que se mantuvo la circulación de gran cantidad de buses antiguos, los cuales tienen procesos de combustión nocivos para el medio ambiente. Las motocicletas están aportando una gran cuota en la disminución de calidad del aire, ya que implica la presencia de más vehículos en las vías añadiendo más contaminación al aire. Las 90 mil motos que aproximadamente circularon a diario por las calles en 2011, representaron una seria amenaza para la sostenibilidad ambiental en la ciudad, debido a que tal medio de transporte no posee el mismo sistema, ni la misma tecnología de control de emisión de gases que sí ofrecen los automotores. Por ejemplo, una moto emite 16 veces más hidrocarburos que un carro, tres veces más monóxido de carbono y una cantidad desproporcionadamente alta de otros contaminantes^{21,24}.

²³ PLAN DE DESARROLLO DE BUCARAMANGA, vigencia del 2012 al 2015.

²⁴ ORTIZ, H., (2010). Informe anual de la calidad del aire en Bucaramanga. Coordinación de información e investigación ambiental, CDMB, p.p. 1-75.

3.3.4 Comportamiento de los vientos en Bucaramanga

En Bucaramanga los vientos en promedio proceden del norte y nororiente (ver figura No. 11), con promedios de velocidades relativamente bajas, mientras que en el aeropuerto (que está ubicado en el municipio de Lebrija, que queda al occidente de la ciudad), los vientos proceden del noroccidente y presentan velocidades un poco más altas.

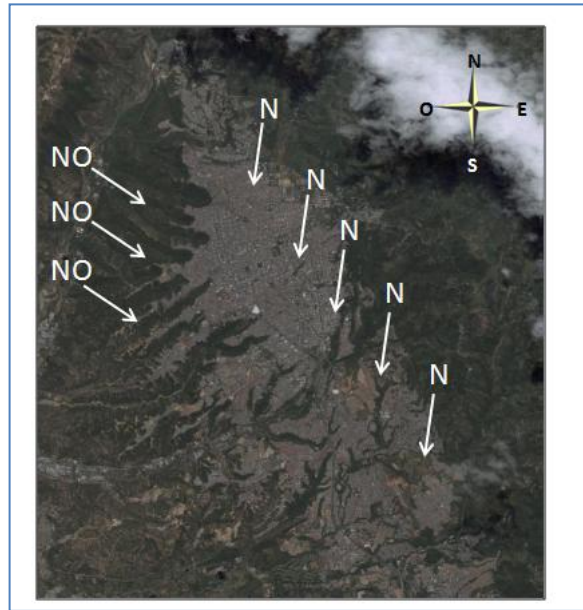
En Bucaramanga los vientos más fuertes se presentan entre los meses de agosto a octubre, mientras que, los más bajos se presentan en enero, marzo y junio. Durante el día, las velocidades más altas se dan al mediodía y en la tarde y las más bajas se presentan al final del día y en la madrugada¹⁶. La tabla 1 muestra los promedios de la dirección y velocidad del viento en Bucaramanga registrados en las estaciones del IDEAM.

Tabla 1. Promedios de la dirección y velocidad del viento en las estaciones del IDEAM para Bucaramanga¹⁶.

Estación	Periodo analizado	Promedio de velocidad (m/s)	Promedio de dirección (Grados)	Persistencia (%)
Apto. Palonegro / Lebrija (Conv.)	1981 - 2009	1,37	303,2	46,6
UIS / Bucaramanga (Conv.)	1974 - 2006	0,89	0,5	50,5
Neomundo / Bucaramanga (Auto.)	2005 - 2009	0,71	16,0	52,7
San Antonio / Floridablanca (Auto.)	2005 - 2009	0,39	13,8	33,8

Fuente: Informe anual de la calidad del aire en Bucaramanga 2010, Coordinación de información e investigación ambiental, CDMB.

Figura 6. Prevalencias de direcciones de vientos en Bucaramanga



Fuente: Adaptado de www.google.earth.com.co

4. METODOLOGÍA

A continuación se presenta el procedimiento metodológico para desarrollar el presente trabajo de análisis retrospectivo para identificar la presencia de islas de calor en la ciudad de Bucaramanga. La metodología consta de dos etapas: en la primera se identifica el fenómeno de Islas de Calor y en la segunda se relaciona la presencia de este fenómeno con la calidad del aire ambiente de la ciudad. A continuación se detallan aspectos de la obtención y el tratamiento de los datos, al igual que su relación con los parámetros de calidad del aire. Aspectos relacionados con el tratamiento estadístico de los datos meteorológicos, de calidad del aire y su representación gráfica se detallan en el capítulo 5.

4.1 Etapa 1. Identificación del fenómeno de Islas de Calor.

Se efectuó una revisión bibliografía relacionada con el fenómeno de formación de islas de calor identificando las variables climáticas, topográficas y antropogénicas que rigen su formación. Aspectos significativos relacionados con el fenómeno y algunas consideraciones climáticas y urbanísticas fundamentales, fueron precisados en el capítulo del marco teórico.

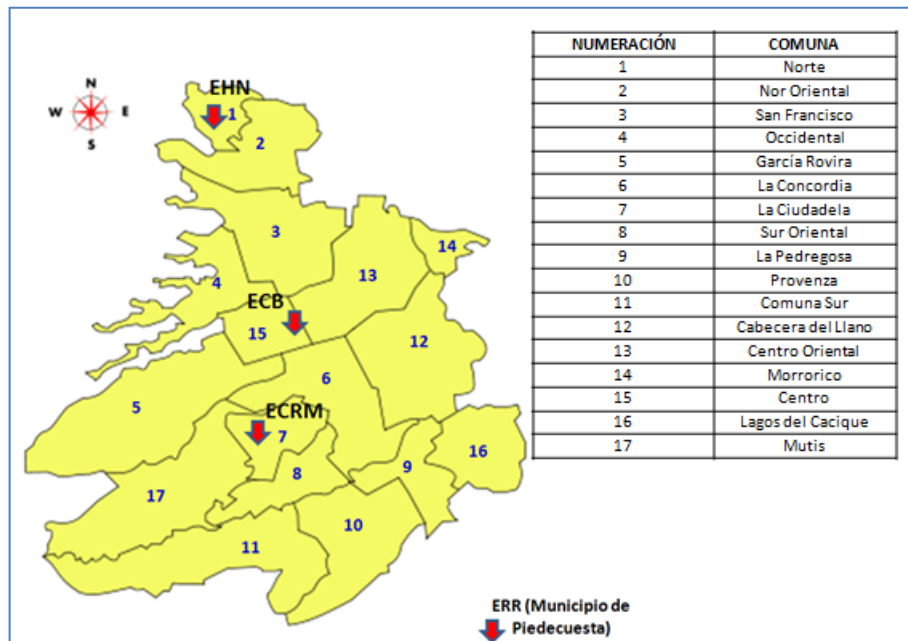
Para evidenciar la presencia de islas de calor en la ciudad de Bucaramanga, se eligieron los sitios de la ciudad en donde se encuentran instaladas y operando las estaciones de medición de los parámetros meteorológicos y de calidad del aire. Se tomó la Temperatura como indicador clave dentro del proceso de identificación y se procedió a analizar estadísticamente los datos respectivos.

Obtención de datos: Los datos elegidos para determinar la presencia de islas de calor, correspondieron a las temperaturas registradas cada hora durante los últimos cuatro años (de 2009 hasta 2012) por los equipos de monitoreo de la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). En cada uno de los equipos de monitoreo se hallan ubicadas estaciones meteorológicas.

Los valores de temperatura registrados por las respectivas estaciones meteorológicas corresponden a mediciones hechas en la capa de dosel urbana (CDU). La base de datos total de la CDMB cuenta con registros de temperatura desde el año 2000, pero solo se consideraron los años 2009 a 2012 porque estos datos presentan una mayor homogeneidad y además, son totalmente confiables debido a que en los últimos años se tuvo una mayor continuidad en los programas de calibración y mantenimiento general de los equipos de medición. Las estaciones consideradas fueron las siguientes:

- Estación ubicada en la Carrera 15 con Calle 34 Terraza Nor Occidental, llamada Estación Centro de Bucaramanga, la cual se identificó con las letras ECB, para facilitar la presentación de resultados.
- Estación ubicada en la Calle de los Estudiantes específicamente en la terraza del Colegio Aurelio Martínez Mutis, llamada Estación Ciudadela Real de Minas, la cual se identificó con las letras ECRM.
- Estación ubicada en la terraza del Hospital Local del Norte, llamada Estación del Hospital del Norte, que se identificó como EHN.
- Una cuarta estación de referencia definida como punto de comparación, ubicada en las afueras de la ciudad por la vía hacia el nor occidente del municipio de Piedecuesta que en adelante se denotará como Estación Rural de Referencia, identificada con las letras ERR.

Figura 7. Ubicación de las estaciones meteorológicas EHN, ECB y ECRM de la CDMB, representadas sobre el mapa de la división por comunas de la ciudad de Bucaramanga. La estación ERR se encuentra en área rural del municipio de Piedecuesta fuera del área de la ciudad



Fuente: El Autor.

Las estaciones meteorológicas de la CDMB utilizadas para este trabajo poseen instrumentos que constan de una estación electrónica digital, con un sistema de adquisición de datos y registro histórico digital, cuyos datos almacenados en sus respectivas bibliotecas fueron accedidos desde un computador.

Figura 8. Foto de una estación meteorológica de la CDMB.



Fuente: www.cdmb.gov.co

Tratamiento de datos: La información proveniente de cada estación de monitoreo se analizó mediante tratamiento estadístico. Se definieron dos periodos de tiempo correspondientes a los periodos secos definidos por el IDEAM, el primer periodo corresponde a los meses de Enero a Marzo en el primer semestre del año y el segundo periodo seco corresponde a los meses de Julio a Septiembre. Los datos de temperatura se organizaron en forma de tablas, dicha información se transformó a gráficos cuya interpretación permitió ver claramente la variación de temperatura en el mismo punto de la ciudad con el transcurrir de los años.

La identificación de las islas de calor se realizó mediante comparación de series de datos entre las temperaturas registradas en las estaciones urbanas y las registradas en la estación rural cercana tomada como referencia. Las horas escogidas para realizar los cálculos de las intensidades de la islas de calor fueron

aquellas donde se presentaron puntos de inflexión en las curvas que muestran el cambio de la temperatura con los años, estos puntos representan cambios significativos o tendencias marcadas durante el tiempo. En el siguiente capítulo se presenta el manejo estadístico de los datos y se relaciona un breve análisis de los resultados para los mismos.

4.2 Etapa 2. Relación Islas de calor- Calidad del aire.

Para detectar la posible influencia de las islas de calor en el ambiente atmosférico urbano, se contrastó el resultado de la identificación y ubicación de estas las islas de calor, con los valores de concentración de ozono registrados en dichas zonas durante los últimos años. Los valores de concentración de ozono provienen de la base de datos de la CDMB, y también se registraron cada hora. Al igual que los datos de temperatura la información obtenida para el ozono fue organizada en tablas y graficada.

Para proponer posibles estrategias de mitigación del fenómeno Islas de Calor se tuvo en cuenta, información sobre las condiciones geográficas, económicas, climatológicas, demográficas y sociales de la ciudad de Bucaramanga, todas ellas contempladas en el Plan de Ordenamiento Territorial elaborado por la alcaldía en el año 2011 y en Plan de desarrollo de Bucaramanga con vigencia del 2012 al 2015, para poder evidenciar las fortalezas y debilidades de cada estrategia.

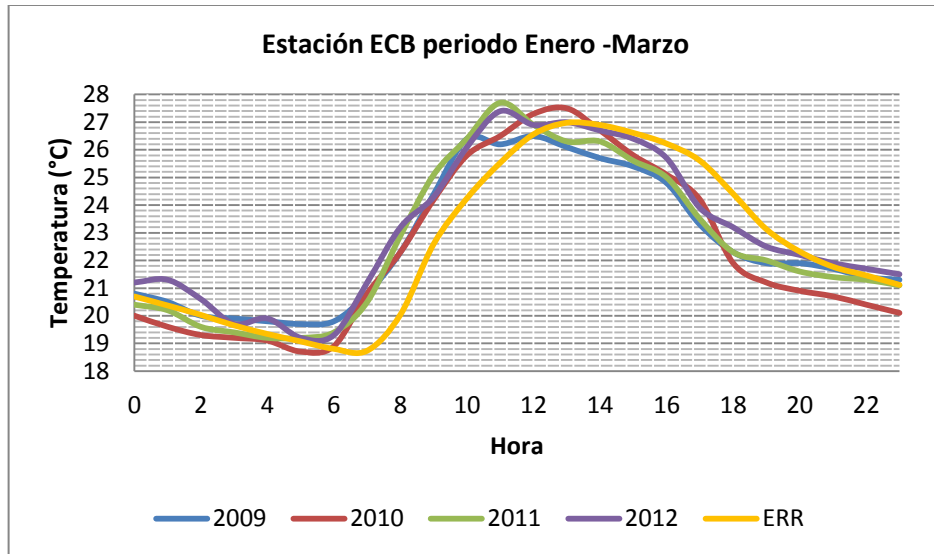
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Variación de temperatura con el tiempo

Según las estaciones de medición ubicadas en la figura 7, para la estación ECB durante el primer periodo seco del año, es decir, desde el mes de enero hasta marzo, la temperatura registrada en este punto de la ciudad mostró un comportamiento bastante homogéneo en las primeras horas de la mañana durante los cuatro años. Sin embargo, es posible notar un aumento progresivo de la temperatura entre las 11 de la mañana y la una de la tarde si se considera el comportamiento general del periodo de tiempo, este aumento gradual consiste en 1°C de diferencia desde un año a otro (Ver figura 9).

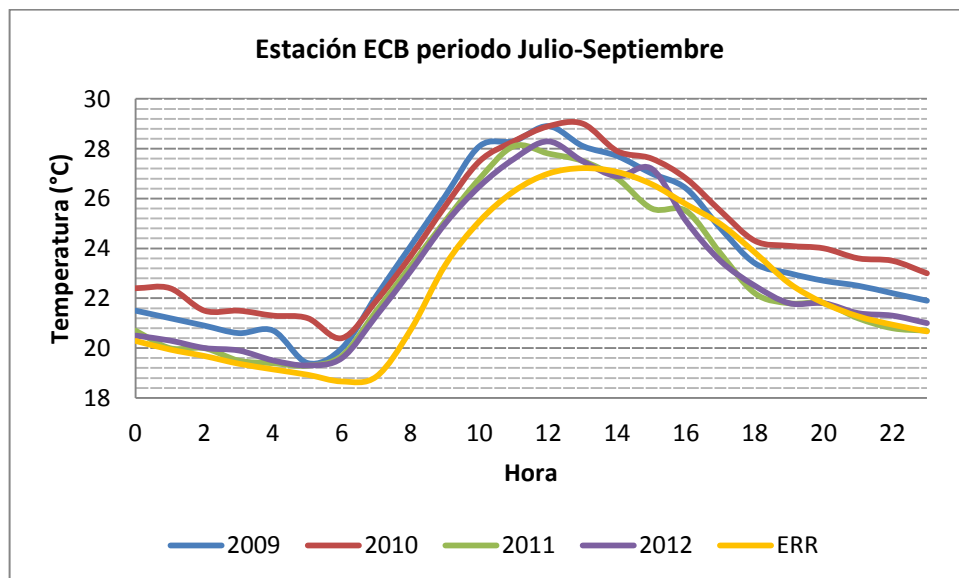
Como se puede ver en la Figura 10, para el segundo periodo seco del año, comprendido entre los meses de julio y septiembre la temperatura aumentó desde el 2010 hasta el 2012, los valores más altos se registraron entre las 10 y las 12 de la mañana. Para este periodo fue el año 2009 el que registró las temperaturas más altas. En resumen, en ambas figuras se observa un incremento de la temperatura según las horas del día para la estación ECB que va desde los 19°C a las 6 am hasta los 25°C al medio día para bajar después a partir de las 2 pm y llegar nuevamente a valores medios de 20°C durante la noche. Este comportamiento se observa como típico para cada uno de los años del estudio es decir, del 2009 al año 2012.

Figura 9. Comportamiento de la temperatura desde el año 2009 hasta el año 2012, registrados por la estación ECB en el periodo enero a marzo y comparación con los registros de la estación ERR.



Fuente: El Autor.

Figura 10. Comportamiento de la temperatura desde el año 2009 hasta el año 2012, registrados por la estación ECB en el periodo julio a septiembre y comparación con los registros de la estación ERR.

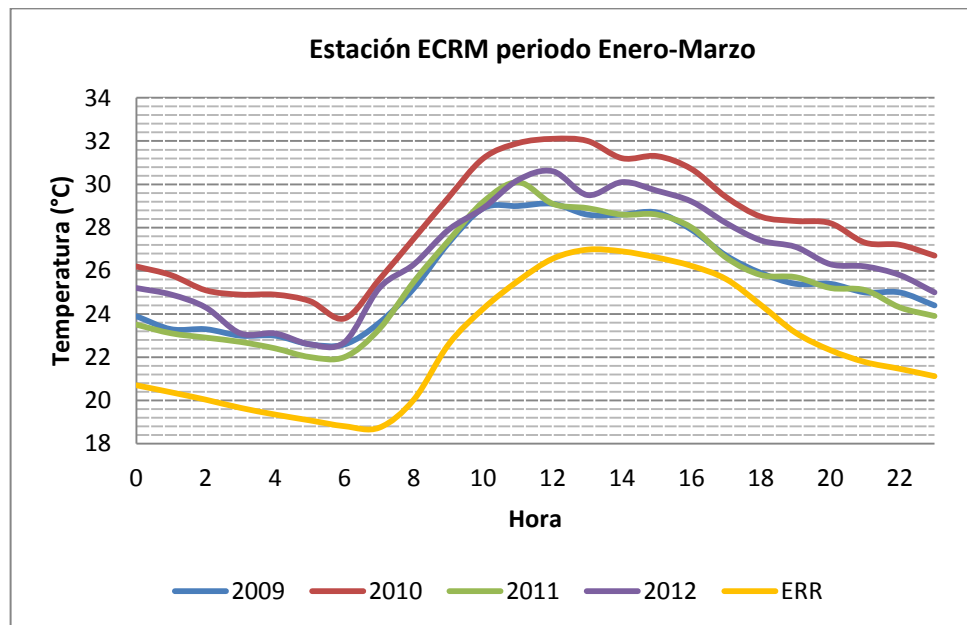


Fuente: El Autor.

Al observar las gráficas correspondientes a la estación ECRM (figuras 11 y 12), es posible ver que durante el periodo de enero a marzo, la temperatura registrada por la estación mostró un comportamiento sin tendencia fija notándose claramente que las temperaturas más altas se dieron durante el año 2010. Aún así, es posible observar que desde las 10 de la mañana hasta las 3 de la tarde la temperatura tuvo tendencia máxima y constante durante la mayoría de los días del año.

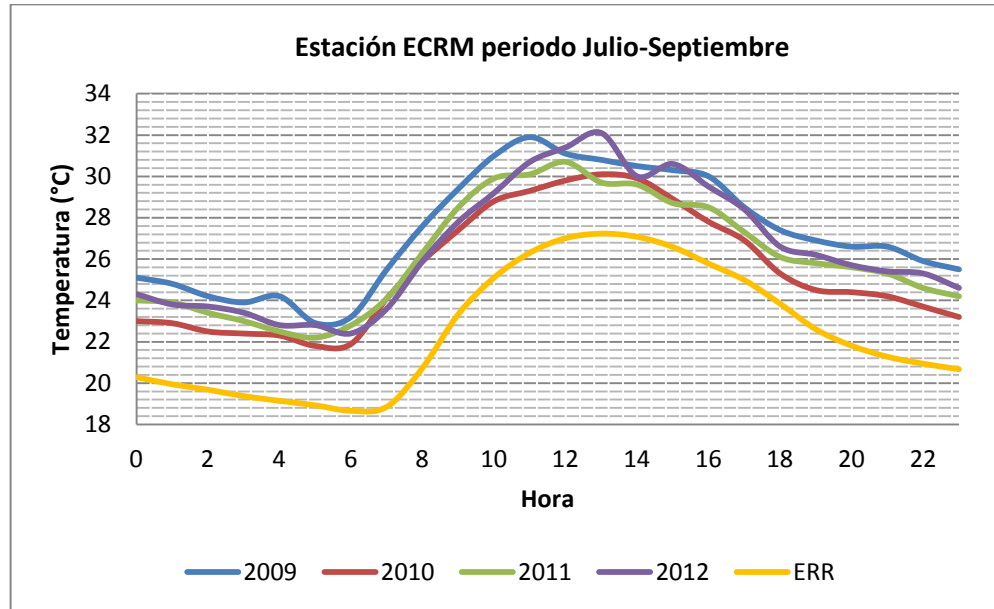
En contraposición para el periodo comprendido entre los meses julio y septiembre la temperatura muestra una tendencia clara ascendente desde el año 2009 hasta el 2012, el valor más alto de temperatura se registró a las 12 de la mañana durante los 4 años. El año 2012 presentó mayor temperatura durante este periodo de tiempo.

Figura 11. Variación de la temperatura desde 2009 hasta 2012, desde enero a marzo, en la estación ECRM y comparación con los registros de la estación ERR.



Fuente: El Autor.

Figura 12. Variación de la temperatura desde 2009 hasta 2012, desde julio a septiembre, en la estación ECRM y comparación con los registros de la estación ERR.



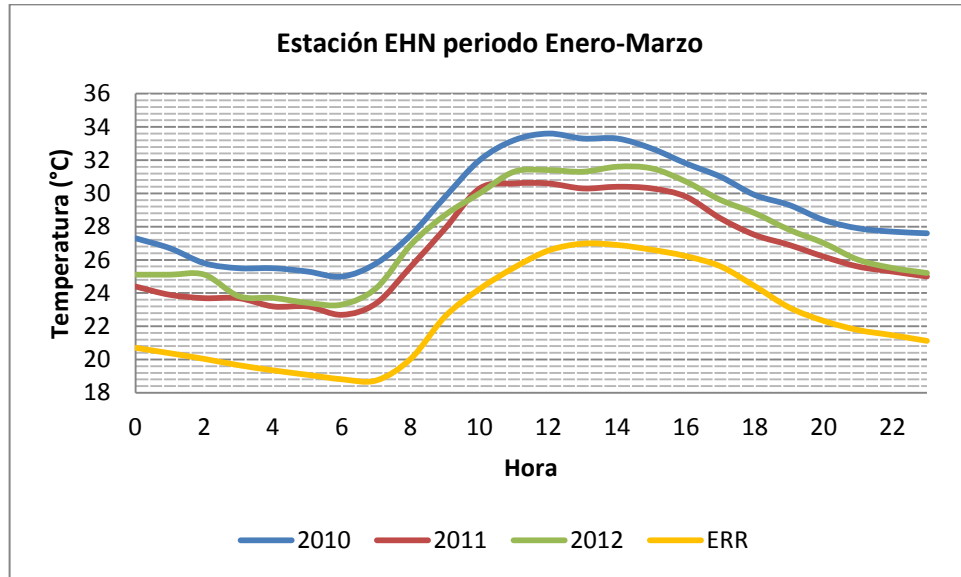
Fuente: El Autor.

Al igual que en los casos anteriores, para la estación EHN el periodo de tiempo comprendido entre enero y marzo, presenta un comportamiento de la temperatura sin tendencia fija, en donde luego de registrarse temperaturas altas durante el 2010, éstas disminuyen en el 2011 y en el 2012 aumentaron nuevamente.

Los valores colectados en la estación EHN muestran el incremento de la temperatura desde el 2010 hasta el 2012 para el segundo periodo seco del año. Cada año, el valor más alto de temperatura se registró alrededor de las 12 del medio día (figuras 13 y 14).

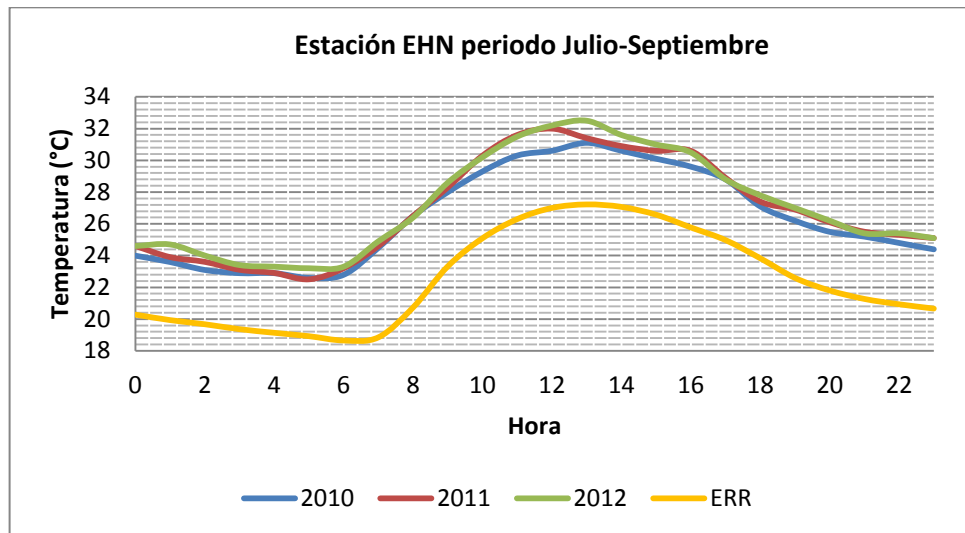
Estas gráficas dejan ver que a medida que pasan los años la temperatura registrada en el mismo lugar y a la misma hora se ha incrementado en al menos 2°C, principalmente durante el segundo periodo seco de cada año en los meses julio, agosto y septiembre

Figura 13. Variación de la temperatura desde 2010 hasta 2012, durante el periodo enero a marzo, en la estación EHN y comparación con los registros de la estación ERR.



Fuente: El Autor.

Figura 14. Variación de la temperatura desde 2010 hasta 2012, durante el periodo julio a septiembre, en la Estación EHN y comparación con los registros del a estación ERR.



Fuente: El Autor.

.La curva en color amarillo dibujada en todas las gráficas, representa el comportamiento horario de la temperatura reportado por la estación ERR, en todos los casos se observa claramente que las temperaturas registradas en las zonas urbanas superan en varios grados a las registradas en zona rural en los dos periodos de tiempo seco que se presentan cada año.

5.2 Comparación entre temperatura urbana y rural

Este paso del análisis permite observar la presencia de la isla de calor. Por consiguiente, al aplicar el procedimiento metodológico, y al tomar como referencia una estación ubicada en zona rural del municipio de Piedecuesta, es posible calcular la intensidad de la isla de calor por diferencia entre los datos de temperatura de las estaciones urbanas y la estación rural.

De este modo, la intensidad de las islas de calor denotada por ΔT , a la hora a la que se registran las temperaturas máximas se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta T = T_{um\acute{a}x} - T_{rm\acute{a}x} \quad [^{\circ}C]$$

Donde $T_{um\acute{a}x}$ es el valor máximo de temperatura registrado en una estación urbana y $T_{rm\acute{a}x}$ es el valor máximo de temperatura registrado en una estación ubicada en área rural. Los resultados obtenidos para cada una de las estaciones urbanas, a diferentes horas se muestran en las tablas 2, 3 y 4.

Tabla 2. Valores de intensidad de las islas de calor en la zona Centro de Bucaramanga.

Estación	ECB											
	Enero a Marzo						Julio a Septiembre					
Periodo												
Hora	0am	3am	6am	10am	16pm	22pm	0 am	3am	6am	10am	16pm	22pm
$T_{umáx}$	21.8	21.5	26.4	27.5	25.7	22.8	21.5	20.6	20	28.1	26.4	21.3
$T_{rmáx}$	22.9	21.9	20.4	26.2	29.4	23.3	22.9	22.4	20.8	28.4	29.2	22.4
$\Delta T \text{ } ^\circ\text{C}$	-1.1	-0.4	6	1.3	-3.7	-0.5	-1.4	-1.8	-0.8	-0.3	-2.8	-1.1
Fuente: El Autor.												

Tabla 3. Valores de intensidad de las islas de calor en la zona Ciudadela Real de Minas de Bucaramanga.

Estación	ECRM											
	Enero a Marzo						Julio a Septiembre					
Periodo												
Hora	0am	3am	6am	10am	16pm	22pm	0 am	3am	6am	10am	16pm	22pm
$T_{umáx}$	26.2	24.3	23.4	31.1	30.7	27.2	24.9	23.9	23.6	31	29	25.4
$T_{rmáx}$	22.9	21.9	20.4	26.2	29.4	23.3	22.9	22.4	20.8	28.4	29.2	22.4
$\Delta T \text{ } ^\circ\text{C}$	3.3	2.4	3	4.9	1.3	3.9	2	1.5	2.8	2.6	-0.2	3
Fuente: El Autor.												

Tabla 4. Valores de intensidad de las islas de calor en la zona Norte de Bucaramanga.

Estación	EHN											
	Enero a Marzo						Julio a Septiembre					
Periodo												
Hora	0am	3am	6am	10am	16pm	22pm	0 am	3am	6am	10am	16pm	22pm
$T_{umáx}$	27.3	25.3	24.3	32	31.8	27.7	24.6	23.2	22.8	30.3	30.6	25.4
$T_{rmáx}$	22.9	21.9	20.4	26.2	29.4	23.3	22.9	22.4	20.8	28.4	29.2	22.4
$\Delta T \text{ } ^\circ\text{C}$	4.4	3.4	3.9	5.8	2.4	4.4	1.7	0.8	2	1.9	1.4	3
Fuente: El Autor.												

Al observar los resultados obtenidos en los dos periodos secos del año, es posible notar que los valores de ΔT son diferentes de cero independientemente del signo, lo cual indica que efectivamente existe presencia de islas de calor con diferente intensidad en las zonas Centro, Ciudadela Real de Minas y Norte.

La tabla 2, muestra que en la estación ECB ubicada en el sector Centro de la ciudad, la mayoría de las horas consideradas tienen valores de intensidad de isla de calor con signo negativo, lo cual indica que el calentamiento en la zona rural supera el calentamiento en la zona urbana, este hecho se conoce como inversión de la isla de calor. Esto puede deberse a que la radiación solar alcanza más fácilmente la superficie terrestre en zona rural debido a que existen menos obstáculos, con respecto a la zona urbana en donde hay presencia de muchas edificaciones. De esta forma la radiación solar causará un aumento de temperatura en campo abierto mayor que la ciudad.

Los factores atmosféricos durante el día son muy inestables, por ejemplo la velocidad del viento aumenta y teóricamente disminuiría la intensidad de la isla, efecto que sucede tanto en zona urbana como rural, entonces es posible decir estos factores no influyen tanto como si lo hace la morfología urbana, que en este caso es el factor más influyente en la variación negativa en la isla de calor.

Los resultados de ΔT positivos registrados en las estaciones ECRM y EHN indican que la temperatura en el área urbana es mayor de la que se registra en el área rural, lo cual evidencia la presencia de las islas de calor acentuadas a las 6 am y 10 am en los sectores Norte y Ciudadela Real de Minas de la ciudad para los dos periodos secos (Ver tablas 3 y 4). Los valores de ΔT a las cero horas (12 pm) en las estaciones ECRM y EHN durante el periodo de enero a marzo, indican la formación de una isla de calor muy acentuada a esta hora lo cual se debe a que cuando la radiación solar incide sobre los materiales que componen el área rural, gran parte de esta radiación es reflejada, no sucede lo mismo para el área urbana en donde, los materiales que componen la ciudad absorben la radiación solar

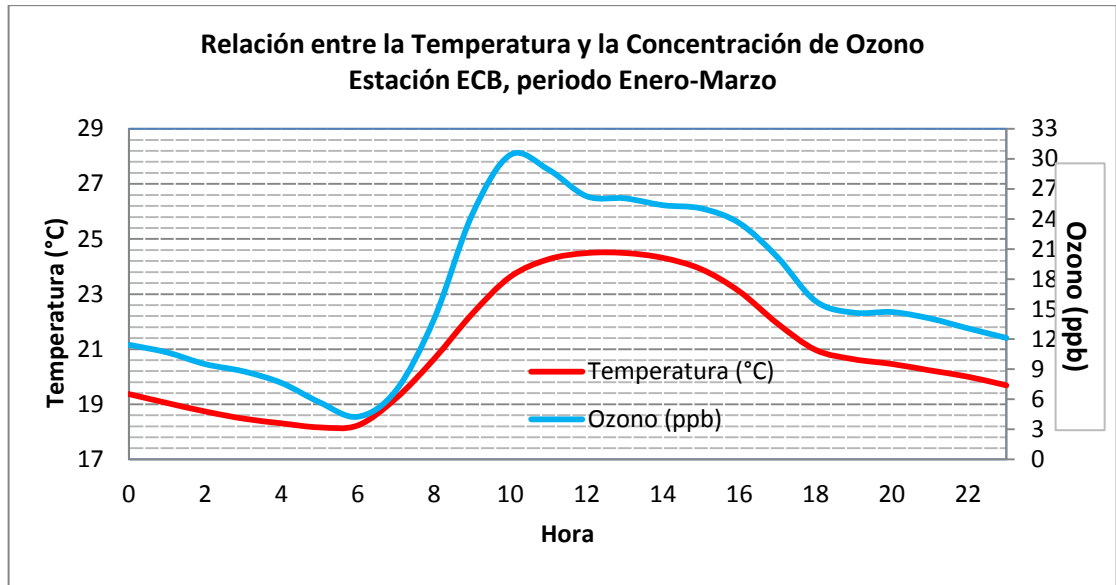
durante el día y posteriormente la emiten lentamente durante la noche, como radiación de onda larga. Los perfiles de temperatura de las figura 7 a 12 muestran el comportamiento de esta variable meteorológica y por consiguiente la existencia de fenómeno de isla de calor.

5.3 Evaluación del efecto del aumento de temperatura en la calidad del aire

Las figuras 15 a 20 muestran la concentración de ozono y la temperatura horaria en las tres estaciones, dejando ver claramente que en las horas en donde se registran los valores de máxima temperatura se registran también los valores de mayor concentración de ozono, durante el día. En todos los casos la forma de la gráfica obedece a una línea curva que inicia mostrando tendencia constante, con valores pequeños de concentración de ozono, continúa con un incremento de alta pendiente hasta llegar a un valor máximo generalmente entre las 10 y 11 de la mañana, posteriormente la curva tiene comportamiento descendente con pendientes suaves (desde las 2 pm hasta las 7 pm aproximadamente), hasta volver a mostrar tendencia constante con valores bajos de concentración de ozono.

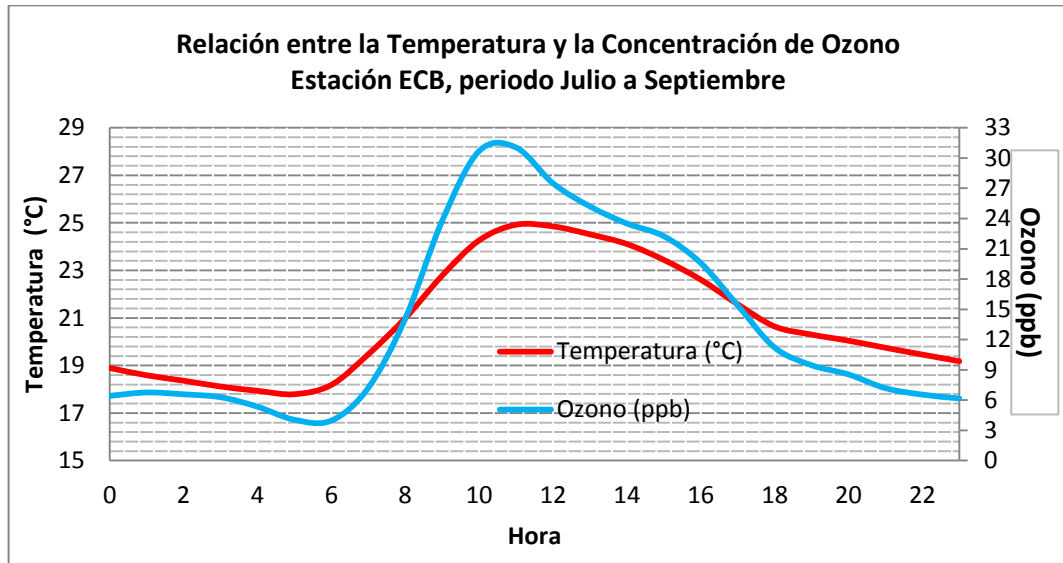
La tendencia de la curva se observa mejor durante el segundo periodo seco del año, comprendido entre los meses de julio a septiembre, en donde se hacen muy evidentes los máximos de temperatura y concentración de ozono, paralelamente. Este comportamiento se explica ya que los niveles de ozono troposférico son con frecuencia más altos en los días calurosos del verano o en zonas densamente pobladas en donde se emiten sus precursores el óxido de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), provenientes de fuentes como la quema de combustible, que al reaccionar con la luz del sol mediante procesos fotoquímicos forman ozono troposférico.

Figura 15. Relación entre temperatura y concentración de ozono en la zona centro de Bucaramanga, durante el periodo enero a marzo.



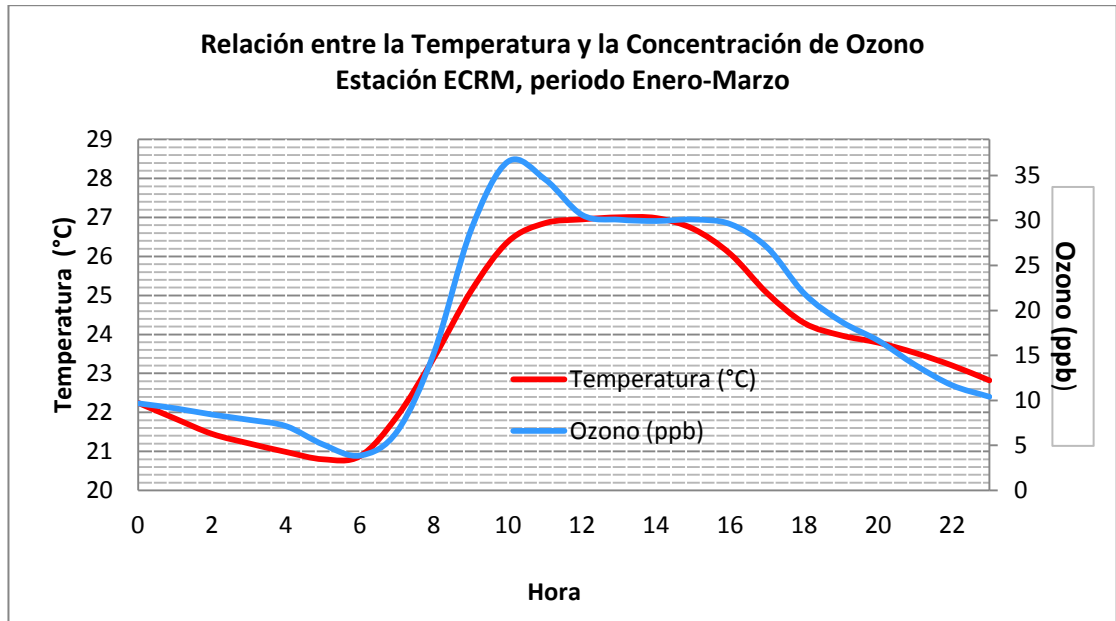
Fuente: El Autor.

Figura 16. Relación entre temperatura y concentración de ozono en la zona centro de Bucaramanga, durante el periodo julio a septiembre.



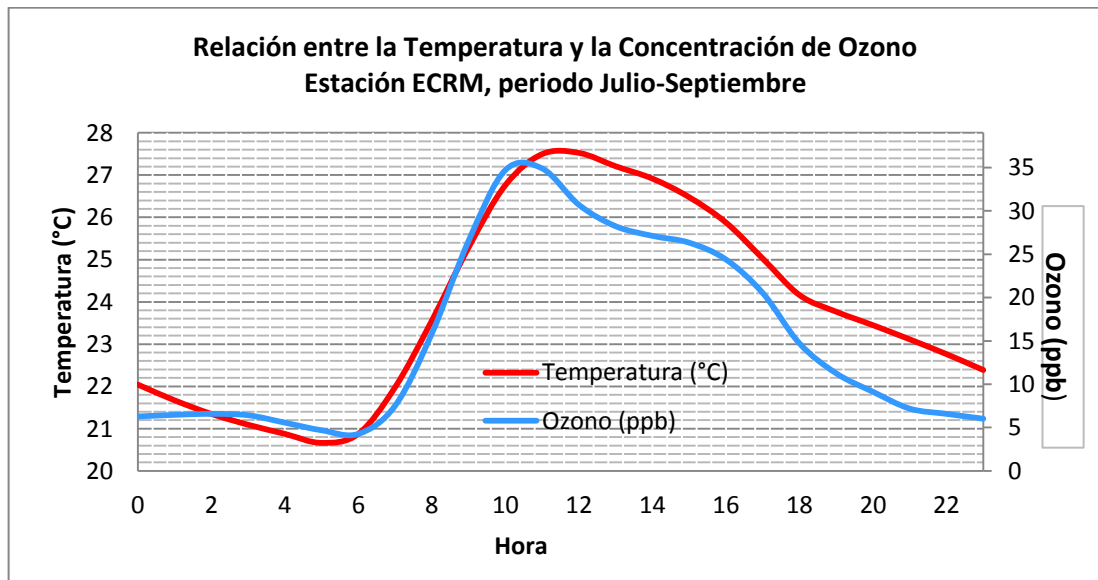
Fuente: El Autor.

Figura 17. Relación entre temperatura y concentración de ozono en la zona Ciudadela Real de Minas de Bucaramanga, durante el periodo enero a marzo.



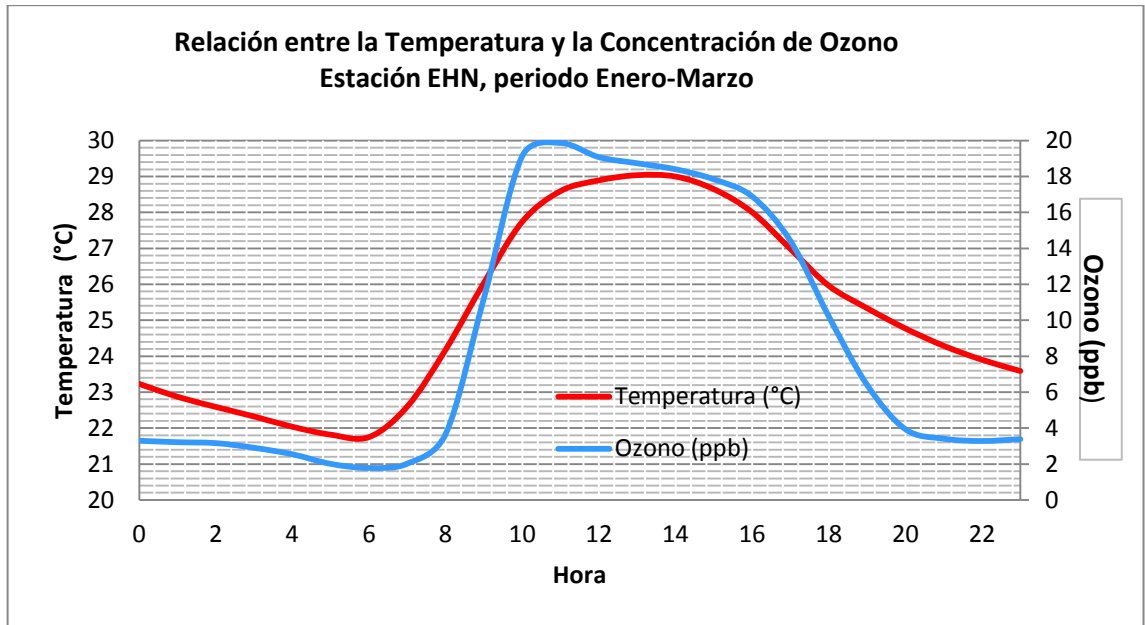
Fuente: El Autor.

Figura 18. Relación entre temperatura y concentración de ozono en la zona Ciudadela Real de Minas de Bucaramanga, durante el periodo julio a septiembre.



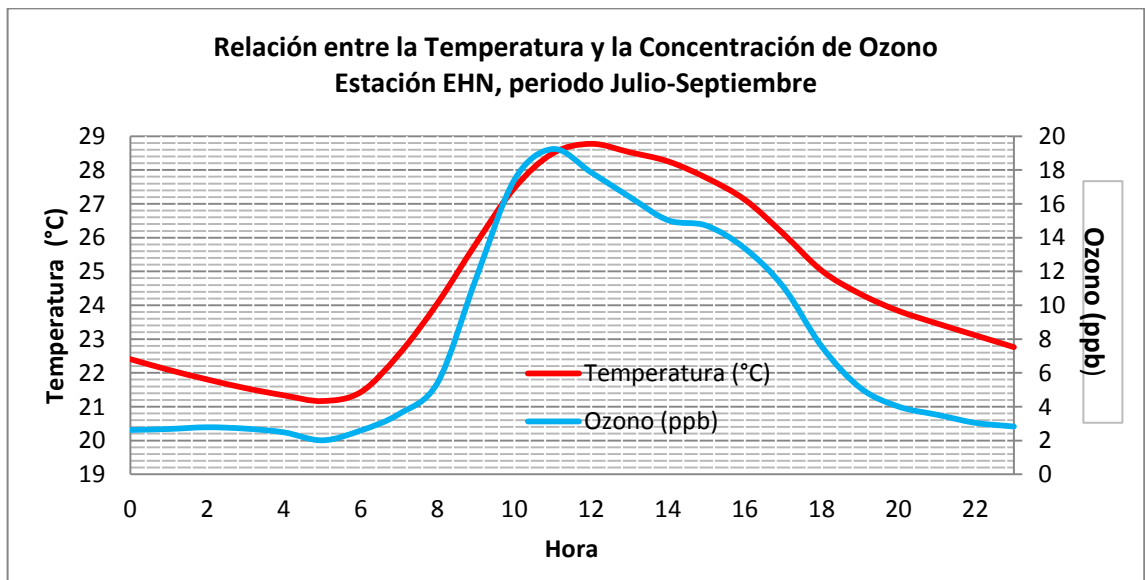
Fuente: El Autor.

Figura 19. Relación entre temperatura y concentración de ozono en la zona Norte de Bucaramanga, durante el periodo enero a marzo.



Fuente: El Autor.

Figura 20. Relación entre temperatura y concentración de ozono en la zona Norte de Bucaramanga, durante el periodo julio a septiembre.



Fuente: El Autor.

En general, durante los periodos de tiempo seco analizados no hubo concentraciones de ozono que superaran el valor máximo permitido según la norma local que es 54 ppb, con excepción de la estación ECB en donde se superó este valor en 64 oportunidades, principalmente en el rango entre 10 las y las 11 de la mañana.

Tabla 5. Valores concentración de ozono a diferentes horas registrados en las estaciones ECB, ECRM y EHN.

Concentraciones de Ozono (ppb)												
Estación	Periodo Enero a Marzo (Hora)						Periodo Julio a Septiembre (Hora)					
	0am	3am	6am	10am	16pm	22pm	0 am	3am	6am	10am	16pm	22pm
ECB	9.60	8.07	4.63	26.9	22.4	14.39	6.93	6.63	4.17	30.87	19.55	7.00
ECRM	7.95	7.12	4.15	31.86	27.20	13.07	6.29	6.42	4.27	34.71	24.38	6.58
EHN	3.62	3.19	1.96	19.50	17.39	3.62	2.62	2.70	2.59	17.47	13.36	3.04

Fuente: El Autor.

Los valores de concentración de ozono más altos se registraron durante los periodos secos de enero a marzo, los cuales presentaron temperaturas más altas y por tanto islas de calor con intensidades mayores, esto confirma la influencia de la presencia de isla de calor en la formación de ozono troposférico, lo cual indica que de continuar el aumento en la intensidad de la isla calórica formada a medida que transcurren los años, también aumentará la formación de ozono.

La tabla 5 muestra los valores de concentración de ozono reportados en las horas que mostraron variación o tendencias significativas en el comportamiento de la temperatura, con el fin de mostrar con cifras la relación entre estos dos parámetros.

5.4 Estrategias de mitigación

Para proponer estrategias de mitigación al fenómeno de islas de calor en Bucaramanga, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos de la ciudad:

- Bucaramanga es una ciudad con tendencia al crecimiento y desarrollo urbanístico acelerados.
- En la actualidad esta ciudad, afronta problemas de movilidad por falta de vías y espacio público. Situación que se ha visto afectada por el aumento del parque automotor cautivo en la ciudad o en tránsito por las vías arterias o autopistas que la comunican con los cuatro puntos cardinales del país.
- Por su geografía la ciudad de Bucaramanga cuenta con muy poca área disponible para construir y como consecuencia de esto en muchos de los lugares en donde hace años existían edificaciones de 2 niveles hoy existen edificios de 5 y más niveles.
- La población ha aumentado durante la última década, ya que su tasa de crecimiento es de alrededor de un 0.65% anual.

Teniendo en cuenta estos diversos aspectos una estrategia de mitigación para la ciudad de Bucaramanga puede ser la implementación de políticas que estimulen a aquellos constructores que incluyan materiales para construcción con coeficientes bajos de absorción, es decir que absorban pocas cantidades de radiación y con colores brillantes que favorezcan la rápida reflexión de la energía solar.

Otra opción y quizá la más viable es la construcción de techos verdes, que consiste en sembrar y mantener una capa de material vegetal sobre el techo de los edificios y construcciones, esta es considerada una tecnología verde ya que los techos verdes eliminan el calor del aire a través de evapotranspiración. La superficie de un tejado con vegetación puede ser más frío que el aire del ambiente circundante, mientras que en el tejado convencional las superficies pueden exceder de la temperatura del ambiente en hasta 50 °C. Esta estrategia de

mitigación resulta bastante ventajosa si se considera que los techos verdes se pueden instalar en una amplia gama de construcciones, incluyendo las de tipo industrial, educativas, y las instalaciones gubernamentales y también edificaciones privadas como centros comerciales y residencias, además aportan confort ya que el ambiente dentro de la construcción con techos verdes se hace más fresco.

La tendencia actual a la arborización, adecuación de parques y la creación de pulmones o comúnmente denominadas zonas verdes o parques ecológicos en centros urbanos, también es una estrategia sugerida ya que resulta de fácil aplicación y económicamente viable para la ciudad.

6. CONCLUSIONES

1. Se ha logrado identificar el fenómeno de Islas de Calor y su presencia en la ciudad de Bucaramanga, acorde con el objetivo propuesto, dado que durante los años de 2009 al 2012, período en el cual se realizó la presente investigación, se observaron incrementos promedio de temperatura entre 1°C y 2°C en el primer periodo seco del año y de entre 1°C y 2.8°C durante el segundo periodo seco, para los sectores urbanos comprendidos entre las comunas Centro y Ciudadela y Norte con respecto a los valores registrados en sector rural del municipio de Piedecuesta.
2. Existen islas de calor urbano en la ciudad de Bucaramanga, que se forman a diferentes horas las cuales se clasifican como Islas de Calor de Superficie debido a que los datos de temperatura que las describen, corresponden a la capa de dosel urbana.
3. La estrecha similitud que existe entre la isoterma que registra la presencia de isla de calor, observada con la curva de concentración de ozono como elemento centinela durante los años estudiados, permite evidenciar cierta influencia que ejerce el fenómeno de isla de calor en el ambiente atmosférico de la ciudad, sustentada esta apreciación en la naturaleza fotoquímica del proceso de formación del ozono.
4. La estrategia de mitigación de las islas de calor urbana más viable en Bucaramanga es la implementación de techos verdes, unida a la arborización y creación de zonas verdes o pulmones ecológicos, debido a las ventajas que tienen como facilidad de construcción, bajo costo económico de mantenimiento, fácil adaptabilidad de las construcciones existentes y aporte a la belleza del paisaje.

7. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda contrastar los resultados obtenidos en el presente trabajo con los que arroje otra metodología diferente para la determinación de las islas de calor, a fin de validar la metodología empleada y poder delimitar el área de influencia de las islas de calor según su ubicación en la ciudad.
- ✓ Se recomienda analizar la formación de islas de calor en la ciudad de Bucaramanga con respecto al crecimiento poblacional sectorizado, incorporando variables como en aumento en la construcción de obras civiles y arquitectónicas y su localización, a fin de establecer la influencia de estos factores en el fenómeno de Islas de Calor urbano.
- ✓ Se recomienda analizar la presencia del fenómeno islas de calor con respecto a la deforestación, tala de árboles y reducción de espacios verdes en la ciudad de Bucaramanga, fin de establecer la influencia de esta variable en la formación de islas de calor urbano.

8. BIBLIOGRAFÍA

AKBARI, H., (2001). Energy Saving Potentials and Air Quality Benefits of Urban Heat Island Mitigation, Heat Island Group Lawrence Berkeley National Laboratory, Solar energy, Vol 510, p.p. 1-19.

AKBARI, H., POMERANTZ, M. and TAHA, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. Elsevier Science, Vol 70, p.p. 275-310.

ANGEL L, RAMÍREZ A. y DOMINGUEZ E., (2010). Isla de Calor y cambios espacio temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá. Revista Académica Colombia. Ciencias, Vol 31, p.p. 173-183.

ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR EN COLOMBIA, (2005). Unidad de Planeación Minero Energética (UMPE), Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), p.p. 157-165.

BELL, R., COLE, D., DE ANGELO, B., *et al*, (2005) Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies- Trees and Vegetation, EPA, p.p. 1-26.

BELL, R., BERGHAGE, R., DOSHI, H., *et al*, (2005). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Green Roofs. EPA, p.p. 1-37.

BENAVIDES, H. y AYALA L., (2010). Análisis descriptivo de variables meteorológicas que influyen en la calidad del aire de los principales centros industriales del país. Subdirección de Meteorología, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

COLE, D., DIETSCH, N., GERO, G., *et al*, (2005). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies- Heat Islands Reduction Activities, EPA, p.p. 1-20.

DEMEZHKO, D. and GOLOVANOVA, I., (2007). Climatic changes in the Urals over the past millennium – an analysis of geothermal and meteorological data. *Climate of the Past*, Vol 3, p.p. 237–242.

FERGUSON, B., FISHER, K., GOLDEN J., *et al*, (2005). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Basics. EPA, p.p. 1-37.

FONG SU, Y., FOODY G. and SHENG K., (2012). Spatial non-stationary in the relationships between land cover and surface temperature in an urban heat island and its impacts on thermally sensitive populations. *Landscape and urban planning*, Vol 107, p.p. 172-180.

GIRIDHARAN, R., LAU, Y., GANESAN, S., (2005). Nocturnal heat island Effect in urban Residential Developments of Hong Kong. *Energy and Buildings*, Vol 37, pp 964-971.

IHARA, T., KIKEGAWA, Y., ASAH, K., GENCHI, Y., *et al*, (2008). Changes in year-round air temperature and annual energy consumption in office building areas by urban heat- island counter measures and energy-saving measures. *Applied Energy*, Vol 85, p.p. 12-25.

KIKEGAWA, Y., GENCHI, Y., and HANAKI K., (2006). Impacts of city-block-scale counter measures against urban heat-island phenomena upon a building's energy-consumption for air-conditioning. *Applied energy*, Vol 83, p.p. 649-668.

MEMON, R., LEUNG, D., LIU, C., (2009). An investigation of urban heat island intensity (UHI) as an indicator of urban heating. Atmospheric Research, Vol 94, p.p. 491-500.

OKE, T.R. and EMERY W. J., (1989). Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. International Journal of Remote Sensing, Vol 10, pp 1699-1720.

OKE, T.R., (1995). The heat island characteristics of the urban boundary layer: Characteristics, causes and effects, Wind Climate in Cities, Vol 54, pp. 81-107.

OKE, T.R., (1997). Urban climates and global change. In Perry A and Thompson R eds. Applied Climatology: Principles and Practices, pp. 273-287.

ORTIZ, H., (2010). Informe anual de la calidad del aire en Bucaramanga. Coordinación de información e investigación ambiental, CDMB, p.p. 1-75.

PEPPER, I.L.; GERBA, C.P.; BRUSSEAU, M.L.; MATHIAS, A.D.; y otros, (1996). Pollution Science. Academic Press. San Diego.

PLAN DE DESARROLLO DE BUCARAMANGA, vigencia del 2012 al 2015.

REVISIÓN DE LAS CONDICIONES ACTUALES DE LAS REDES DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE EN EL PAÍS, (2005). Convenio Asociación Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

RUIZ, P., ROMERO, M. L., SUÁREZ, M., HERNÁNDEZ, A., (2008). Isla de Calor en las palmas de Gran Canaria: Intensidad, distribución y factores condicionantes. Boletín de la A.G. E. N° 47, p.p. 157-173.

SARROCOLEA, P., ALISTE, E., CASTRO, P. y ESCOBEDO, C., (2008). Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. *Revista de Climatología*, Vol 8, pp 71-84.

SCHAEFER, D. and DOMROES, M., (2009). Recent Climate Change in Japan – Spatial and Temporal Characteristics of Trends of Temperature. *Climate of the Past*, Vol 5, p.p. 13–19.

SUSCA, Y., GAFFIN, S. and DELL’OSSO, R., (2011). Positive Effects of vegetation Urban Heat Island and Green Roofs. *Environmental Pollution*, Vol 159, p.p. 2119-2126.

TAHA, H., (1997). Urban climates and heat islands: Albedo, Evapotranspiration and Anthropogenic Heat. *Energy and Buildings*, Vol 25, p.p. 99-103.

VARGAS, F., FERNÁNDEZ, R. y PRADILLA, G., (2010). Plan de ordenamiento territorial, Bucaramanga herencia de todos. Oficina asesora de planeación- Alcaldía de Bucaramanga.

VELÁZQUEZ A., GONZÁLEZ J. Y WINTER, A., (2006). Urban Heat Island effect analysis for San Juan, Puerto Rico. *Atmospheric Environment*, Vol 40, p.p. 1731-1741.

VOOGT, J.A., and OKE, T.R., (2003). Thermal remote sensing of urban areas. *Remote Sensing of Environment*, Vol 86, p.p. 370-384.

WONG, N. AND CHEN Y., (2005). Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat International*, Vol 29, p.p. 547-558.

ZAKSEK, K. and OSTIR K., (2012). Downscaling land surface temperature for urban heat island diurnal cycle analysis. *Remote Sensing of Environment*, Vol 117, p.p. 144-124.