



Isla de Calor Urbana Superficial para Tres Megaciudades en África Surface Urban Heat Island for Three Mega cities in Africa

Julio Miguel Angeles Suazo^{1,2}; Jose Luis Flores Rojas³ & Hugo Abi Karam⁴

¹Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa. Vicepresidencia de Investigación.
Av. Perú 612, Pampa del Carmen, 12856 Chanchamayo, Perú

²Universidad Tecnológica del Perú. Facultad de Ingeniería Civil. Av. Circunvalación 449, 12002 El Tambo, Huancayo, Perú.

³Instituto Geofísico del Perú, Calle Badajoz 169, 15498 Urb. Mayorazgo IV Etapa – Ate, Lima-Perú

⁴Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Geociências, Departamento de Meteorologia.
Rua Athos da Silveira Ramos 274, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, 21.941-916, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

E-mails: julio_as_1@hotmail.com; jlflores@igp.gob.pe; hugo@igeo.ufrj.br

Recebido em: 01/10/2019 Aprovado em: 16/03/2020

DOI: http://doi.org/10.11137/2020_2_64_75

Resumo

Esta contribuição estima a Intensidade da Ilha de Calor Urbano Superficial (IICUS), durante o período de 2001 a 2016, para as Áreas Metropolitanas do Cairo (AMC), Johannesburgo (AMJ) e Lagos (AML), localizadas na África. Para quantificar as IICUS foram utilizados dois métodos: o primeiro, o método Gaussiano e, o segundo, o método dos Quantis. Ambos métodos utilizaram dados mensais de sensoriamento remoto da temperatura da superfície (TS) e o produto anual do tipo cobertura do solo (com resolução espacial horizontal de 0,05° ou aproximadamente 5,6 km ao longo do equador), obtidos a partir do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) a bordo dos satélites TERRA e AQUA do EOS/NASA. Nos resultados obtidos para o método Gaussiano, no período diurno a IICUS a máxima mensal ocorreu na AML de 4,82 °C e a mínima mensal também na AML de valor 0,01°C. Já no período noturno, a máxima mensal foi na AMC de 4,64°C e a mínima mensal na AMJ de valor 1,30°C. Para o método dos Quantis, a IICUS diurna máxima mensal foi encontrada na AML de 5,78°C e mínima mensal na AMC de valor -1,56°C. No período noturno, a IICUS máxima mensal foi na AMC de 4,88°C e mínima mensal na AML de valor 2,05°C.

Palavras-chave: Lagos; Cairo; Johannesburgo, Ilha de calor urbana.

Abstract

This contribution estimates the Intensity of Surface Urban Heat Island (SUHI) during the period 2001–2016 for the Metropolitan Areas of Cairo (CMA), Johannesburg (JMA), and Lagos (LMA), located in Africa. To quantify the SUHI, two methods were used: the Gaussian method, and the Quantiles method. Both methods use monthly surface temperature (ST) remote sensing data and annual land cover type product at 0,05° resolution, obtained from the MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor on board the TERRA and AQUA satellites. In the results obtained for the Gaussian method, the maximum daytime IICUS occurred in the AML with 4.82 °C and the minimum in the AML with 0.01 °C. At night, the maximum found was in AMC with 4.64 °C and the minimum in AMJ with 1.30 °C. For the Quantiles method, the maximum monthly daytime IICUS is found in the AML is 5.78 °C and the minimum in the AMC is -1.56 °C. At night, the maximum IICUS was at AMC with 4.88 °C and minimum at AML with 2.05 °C.

Keywords: Lagos, Cairo; Johannesburgo



1 Introducción

El porcentaje de la población mundial, residentes en áreas urbanas aumento continuamente desde 1960, habiendo alcanzado cerca de 55,3% al año 2018 (Organización de las Naciones Unidas, 2018). La isla de calor urbano (ICU) es un fenómeno climático donde las áreas urbanas tienen una temperatura del aire más alta que su entorno rural debido a las modificaciones antropogénicas en las superficies terrestres (Organización de las Naciones Unidas, 2010). En estudios de clima urbano, el fenómeno de ICU indica que tal aumento artificial de la temperatura urbana respecto a la rural; ocurre debido a cambios en el balance de energía y agua en el entorno construido (Oke, 2006).

El desarrollo urbano tiene algunos impactos negativos en la calidad ambiental global, incluida la calidad del aire, el aumento de la temperatura y alteración del paisaje. También conduce a la conversión de tierras agrícolas y la pérdida de biodiversidad (Santamouris *et al.*, 2001). La ICU, define las condiciones superficiales de la capa límite atmosférica sobre la ciudad, nombrada capa límite urbana. Una combinación de factores conduce al desarrollo de la ICU, como la capacidad de retención de energía y almacenamiento de calor en los elementos urbanos, como edificios, calles, pavimentos entre otros. Y, se mide por la temperatura de la superficie y aire, que puede variar entre la ciudad y el área rural hasta 5°C (Organización de las Naciones Unidas, 2010). Los factores que contribuyen a la formación de ICU, tales como: propiedades térmicas de materiales de construcción, geometría de diseño urbano (cañón urbano), factores antropicos (flujos de calor) y alteración de la superficie de tierra. La reflectancia del material de construcción es generalmente baja, por lo que reflejan menos y absorben más energía, lo que conduce a crecientes temperaturas a nivel de la superficie. Los materiales de construcción tienen bajo valor de calor específico, por lo que liberan calor rápidamente y se mantienen más fresco. Los materiales de construcción comunes, como el alquitrán, el asfalto, el ladrillo y el concreto, almacenan energía solar durante el día y liberan por la noche, por lo que se informa que la intensidad de la ICU es más fuerte en general durante la noche en ciudades de

clima frío. La geometría del diseño urbano es uno de los factores principales de la ICU, donde los cañones urbanos son creados por calles estrechas y espacio entre edificios. Estos disminuyen la velocidad del viento y aumentan la reflectancia de la superficie que atrapan el flujo de calor termal emitido (Vereda, 2007; Lai, 2009).

Cabe señalar que la tasa de crecimiento de la población continuará siendo rápida en muchas áreas urbanas, con un promedio del 2,4 por ciento por año durante 2002–2030, lo que coincide con un tiempo de duplicación en 29 años (Organización de las Naciones Unidas, 2002). De tal manera que para 2030, el 84 por ciento de los habitantes en la mayoría de los países serán habitantes urbanos. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) pronostica que entre 2011 y 2050, se espera que la población mundial aumente en 2,3 mil millones, aumentando de 7 mil millones a 9,3 mil millones (Organización de las Naciones Unidas, 2012). Al mismo tiempo, se prevé que la población que vive en zonas urbanas aumente a 2,6 mil millones, de 3.6 mil millones en 2011, y a 6,3 mil millones para 2050 (Oke, 1976).

En Nigeria, en la ciudad de Idaban el primer estudio completo sobre clima urbano fue el de Adebayo (Adebayo, 1987), quien analizó las características espaciales, diurnas y estacionales de la radiación global, albedo de superficie, radiación neta de onda larga y los flujos de energía. El estudio se basó en una recopilación diaria (06:00 – 18:00 GMT) durante un año en 20 estaciones ubicadas en toda la ciudad. Se observó que hubo una disminución de la radiación (alrededor del 14 por ciento en el centro urbano, lo que se atribuyó a los efectos de la contaminación y al factor reducido de la visibilidad del cielo dentro del dosel. Asimismo, hubo una disminución en balance de radiación y un aumento de la intrusión de radiación en el centro de la ciudad en comparación con las áreas rurales. El aumento de la radiación solar neta se atribuye a un aumento en la cantidad de energía absorbida por la radiación de onda larga en la superficie y a la contaminación atmosférica. El estudio también indicó la disminución de la humedad relativa (alrededor del 5 por ciento) en la temporada húmeda, mientras que, durante la temporada seca, la disminución fue de alrededor de 8 por ciento. Se ob-

servó el efecto de ICU de 1°C a 1,5°C y valores de 8°C en la estación seca y húmeda respectivamente.

La ciudad de Johannesburgo contiene más de 10 millones de árboles y, a menudo, se la denomina bosque urbano. La variabilidad espacial intraurbana de los niveles de vegetación en las regiones residenciales de Johannesburgo influye en el efecto de ICU dentro de la ciudad. Las áreas residenciales con altos niveles de vegetación se benefician del efecto de enfriamiento debido a los procesos de evapotranspiración y, por lo tanto, exhiben efectos de ICU más débiles. Tales efectos describen un fenómeno en el que algunas áreas urbanas exhiben temperaturas que son más cálidas que las de las áreas circundantes. Los factores que influyen en el efecto de ICU incluye la alta densidad de personas, edificios y los bajos niveles de cobertura vegetal dentro de las áreas urbanas pobladas (Hardy & Nel, 2015).

Por ello, según El Hattab *et al.* (2018), la investigación realizada en El Cairo, donde utilizó imágenes del satélite Landsat TM/ETM+/OLI con banda termal, estimó la ICU, para los años 1984, 2000 y 2015, obteniendo valores promedios de 1,27, 2,13 y 2,84°C respectivamente. Esto se debe al incremento del área urbana y disminución del área de cobertura vegetal. Asimismo, según Hardy & Nel (2015); para la ciudad de Johannesburg en el periodo 2002-2012; utilizó los satélites Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ y ENVISAT AATSR, y estimó la media mensual de ICU durante el periodo nocturno, y obtuvo un rango de valores de 2 a 3,5°C, valores que están asociados a la alta densidad de construcciones urbanas. No obstante, según Simwanda *et al.* (2019), estimó la IICUS utilizando datos de Temperatura Superficial (TS) del satélite Landsat 8 OLI/TIRS a una resolución espacial de 10 km*10km, con cobertura de nubes menor a 10%. Donde la IICUS calculada incrementa de 0,5 a 4°C, lo cual indica un alta media de TS alrededor del centro de la ciudad comparando con otras zonas a lo largo del gradiente urbano-rural.

La presente investigación comprende estimar la IICUS para las áreas metropolitanas de Lagos, El Cairo y Johannesburgo durante el periodo 2001-2016, utilizando las metodologías propuestas por Streutker (2002) y Flores *et al.* (2016).

2 Materiales y Métodos

2.1 Sitio y Localización

El Gran Cairo incluye las gobernaciones de El Cairo, Giza y Qalubiyah. El Gran Cairo es el área metropolitana más grande de Egipto y el área urbana más grande de África. La región está situada entre las latitudes 29,72°N y 30,43°N y las longitudes 30,717°E y 31,883°E con un área de 1,09 millones de acres. El Área Metropolitana de El Cairo (AMC), la topografía de la región es casi plana, limitada por colinas al este y al oeste (Ver Figura 1); posee clima subtropical y seco. En invierno (diciembre a febrero), el clima general de la región es frío, húmedo y lluvioso, con una temperatura media mínima de 13°C, mientras que durante el verano (junio a agosto), es cálido y seco con temperatura media máxima de 28°C. En la primavera (marzo a mayo) y en otoño (septiembre a noviembre) el polvo y las tormentas de arena son muy frecuentes (Roba, 2003).

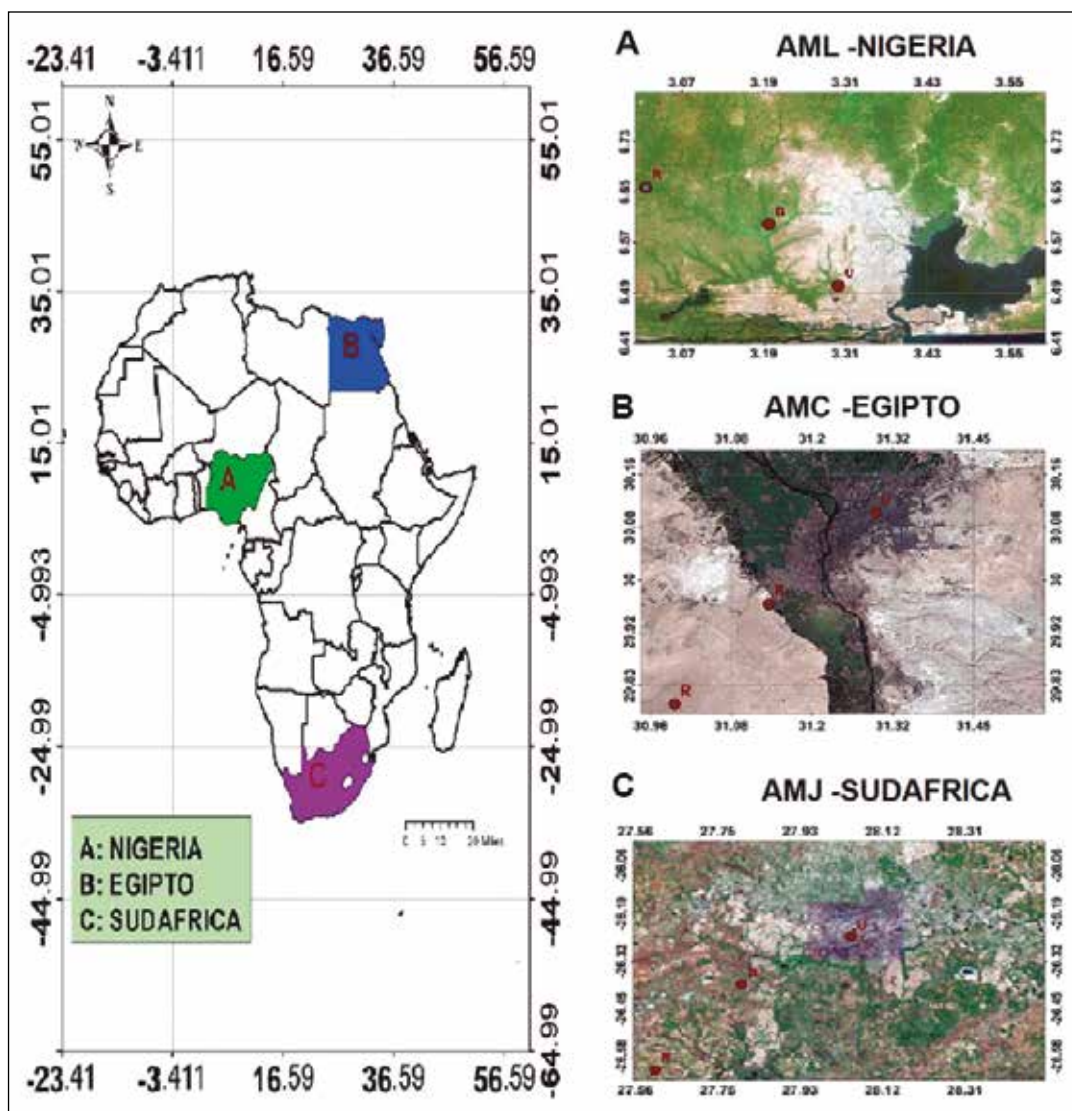
Johannesburgo, es la ciudad más poblada y popular de la capital provincial de Gauteng, perteneciente del país de Sudáfrica. Según Banco Mundial (2012), en 2011, Johannesburgo tenía una población de 4434827 personas que vivían en un área de 1645 km². La población de Johannesburgo está creciendo a un ritmo acelerado; en la década entre el Censo de 2001 y 2011, la población aumentó en más de un millón de habitantes.

El Área Metropolitana de Johannesburgo (AMJ) está sujeto al crecimiento urbano y al cambio ambiental, particularmente en los asentamientos informales de la región. La urbanización tiene una influencia en el ambiente natural ya que las superficies naturales son reemplazadas por estructuras hechas por el hombre, y el aumento de la actividad antropogénica conduce a mayores emisiones de aerosoles y gases traza a la atmósfera. El resultado es el desarrollo de ICU dentro de la ciudad.

Lagos es el estado más pequeño de Nigeria. Es la sexta ciudad más grande del mundo y la ciudad más grande de África subsahariana. Está compuesto por 20 áreas de gobierno local, de las cuales 16 forman la región metropolitana de alta densidad (Nkeki *et al.*, 2014). El Área Metropolitana de Lagos (AML) se encuentra en el suroeste de Nigeria, en la costa atlántica; y está ubicada a longitud 2,42°E a 3,42°E y entre las latitudes 6,22°N a 6,42°N (Ver Figura 1). El límite sur del Área Metropolitana está formado por la costa atlántica de 180 km de largo, mientras que sus

límites Norte y Este comparte con el estado de Ogun. La región se encuentra dentro del cinturón de la selva tropical y de las zonas ecológicas, que predomina humedales y selvas tropicales. La vegetación dominante es el bosque tropical y pantano, que consiste en los bosques de agua dulce y manglar, los cuales están influenciados por el patrón de lluvia, que hace del medio ambiente una región de humedales, de ahí la referencia a Lagos como entorno de esplendor acuático. Su ambiente de humedal se caracteriza por un rico suelo aluvial y terrallítico rojo-amarillo, en el que se encontraría denso exuberante maleza, escaladores, epifitas y maderas duras tropicales. Los tipos de vegetación que se encuentran fuera del área urbanizada son en su mayoría bosques secundarios, manglares, pantanos de agua dulce y cultivos (BNRCC, 2016).

Asimismo, para el AML se da la interacción entre la masa de aire tropical marítimo húmedo - cálido y la masa de aire continental caliente - seca; lo que origina dos estaciones; una estación húmeda de abril a octubre y una estación seca de noviembre a marzo (Fasona *et al.*, 2005). La precipitación media anual es de aproximadamente 1657 mm; precipita todos los meses del año con la cantidad más alta en el mes de junio como resultado del fuerte viento del sur con lluvia que prevalece en el área del Océano Atlántico. El aire es muy húmedo durante todo el año, con promedio mensual de temperatura máxima que van de 28,6°C en julio/agosto a 33,7°C en febrero/marzo.



2.2 MODIS Data

Se utilizó el sensor MODIS del Satélite AQUA y TERRA, donde se utilizó datos de TS (Dousset & Gourmelon, 2003), con una resolución temporal diaria. En el presente estudio, se realizó un promedio mensual a una resolución espacial de 5 km (0,05°), para analizar los efectos de reescalar en los patrones estadísticos de TS y luego compararlos con el producto MOD11C3, Global Climate Modeling Grid (CMG).

Para la separación de píxeles de áreas urbanas y rurales, se utilizó el producto MCD12C1 MODIS de cobertura terrestre tipo MCD12C1 con resolución 0,05° para clasificar la superficie terrestre de acuerdo con el proyecto internacional Geosphere-Biosphere Project (IGBP). El esquema de cobertura del suelo primario identifica 17 clases de cubierta terrestre definidas por el IGBP como lo indica Schneider *et al.* (2002). Asimismo, se muestra en la Figura 2, la clasificación de la cobertura vegetal para las 3 áreas metropolitanas, en el cual los píxeles de la categoría 13, nos indica el área urbana.

Clases	IGBP(TIPO 1) INDICE DE COBERTURA DE SUELO
0	Agua
1	bosque de hoja perenne
2	bosque de hoja ancha de hoja perenne
3	bosque de hoja caduca
4	bosques caducifolios de hoja caduca
5	bosque mixto
6	arbustos cerrados
7	arbustos abiertos
8	sabanas leñosas
9	Sabanas
10	Pastizales
11	humedales permanentes
12	Tierras de cultivo
13	Urbana y construcciones
14	Tierras de cultivo / mosaico de vegetación natural
15	nieve y hielo
16	estéril o vegetación escasa

Tabla 1 Esquema de clasificación global de vegetación tipo 1 según, International Geosphere Biosphere Programme (IGBP).

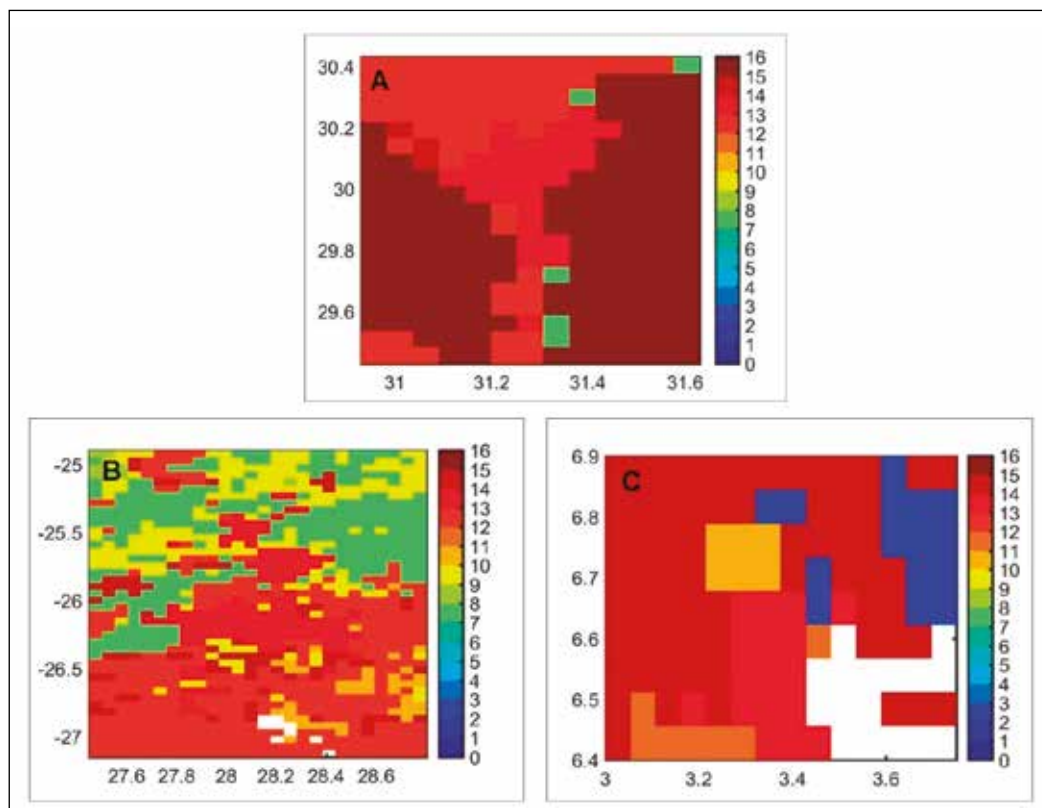


Figura 2 Tipo de cobertura de suelo: A. AMC; B. AMJ; C. AML para diciembre del 2006 según el IGBP.

2.4 Estimación de la IICUS

Para determinar la IICUS se utilizó el Método Gaussiano propuesta por Streutker (2002), la técnica usa un ajuste por mínimos cuadrados, modelizando la isla de calor por una función bi-dimensional gaussiana de la forma:

$$T_{(x,y)} = T_0 + a_1x + a_2y + a_0e^{\left(\frac{-(x-x_0)^2}{2a_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2a_y^2}\right)} \quad (1)$$

Donde $T_{(x,y)}$ es la temperatura superficial total, incluidos los píxeles urbanos y rurales. T_0 , a_1 y a_2 son los componentes constante y lineal de la temperatura rural, respectivamente. (e.g. Flores *et al.*, 2016).

2.5 Método de Cuantiles

Este método propuesto por Flores *et al.* (2016) para estimar la IICUS, donde se basa en el análisis estadístico de Cuantiles de TS urbano y rural:

$$SUHI = Q_5^{urbano} - Q_3^{rural} \quad (2)$$

Donde Q_5^{urbano} es el cuantil 0.95 de la distribución TS sobre el área urbana y Q_3^{rural} es la mediana de la distribución TS sobre el área rural, donde se empleó el método a una resolución de 5 km.

Asimismo, ambos métodos se utilizaron en la estimación de isla de calor urbano superficial en las ciudades de Arequipa, Huancayo e Iquitos (e.g. Angeles, *et al.*, 2019).

3 Resultados

3.1 Isla de Calor Urbana Superficial

La relevancia del estudio de las islas de calor urbana de las tres importantes ciudades de África consideradas en este trabajo se debe al hecho de que las islas de calor son agravantes de las ondas de calor que ocurren sobre condiciones de bloqueo atmosférico, cuando la baja nubosidad implica al aumento del flujo de radiación solar llegando en superficie, como consecuencia el aumento de la temperatura superficial y de la capa límite urbana. Asimismo, los resul-

tados para las magnitudes de IICUS diurna a largo plazo (2001-2016) y las extensiones espaciales para todos los meses sobre el AMC, AMJ y AML usando el método Gaussiano, se presentan en la Tabla 2, 3 y 4 respectivamente. La IICUS para el AMC, el valor más alto para el periodo diurno ocurrió en marzo (3,82°C) y la más baja en setiembre (0,01°C). En esta ciudad el área de la huella presenta un máximo valor en julio (5171 km²) y mínimo en junio (27,6 km²). Asimismo, la IICUS para el AMJ, el valor más alto para el periodo diurno ocurrió en setiembre (2,72°C) y la más baja en diciembre (0,04°C). El área de la máxima intensidad de la isla de calor se produjo en marzo (49186 km²) y mínimo en setiembre (588 km²). No obstante, la IICUS para el AML, el valor más alto para el periodo diurno ocurrió en octubre (4,82°C) y la más baja en febrero (3,37°C). El área de la máxima intensidad de la isla de calor se produjo en noviembre (886,2 km²) y mínimo en febrero (110,87 km²). Por lo tanto, la extensión de la isla de calor urbano es mayor en el AMJ, seguida por el AMC y AML; pero la IICUS diurno el mayor valor se presenta en el AML, seguido de AMC y AMJ.

MES	Area de Huella (km ²)	Método Gaussiano, IICUS diurno (°C)	Método Gaussiano, IICUS nocturno (°C)	Método de Cuantiles, IICUS diurno (°C)	Método de Cuantiles, IICUS nocturno (°C)
Enero	1042,1	0,30	4,59	0,23	4,88
Febrero	1242,5	0,85	4,64	0,21	4,79
Marzo	1326,7	2,45	4,52	-0,03	4,49
Abril	NaN	3,82	4,48	0,09	4,40
Mayo	NaN	1,09	4,20	-0,23	4,04
Junio	27,6	1,30	3,63	-0,77	3,41
Julio	5171	1,40	3,17	-1,37	2,76
Agosto	2303,6	1,82	2,98	-1,56	2,49
Setiembre	523,8	-0,01	3,04	-1,17	2,74
Octubre	185,8	-1,04	3,47	-0,68	3,46
Noviembre	418,8	-0,43	4,19	-0,17	4,21
Diciembre	591,3	-1,08	4,53	-0,05	4,64

Tabla 2 Media Diurna y nocturna de la IICUS(°C) y extensión espacial con desviación estándar para el AMC usando el método desarrollado por Streutker (2002) y Flores (2016) del periodo 2001-2016. Se nota que en abril y mayo el IICUS diurno, no fue posible el ajuste Gaussiano.

MES	Area de Huella (km ²)	Método Gaussiano, IICUS diurno (°C)	Método Gaussiano, IICUS nocturno (°C)	Método de Cuantiles, IICUS diurno (°C)	Método de Cuantiles, IICUS nocturno (°C)
Enero	21777	1,71	1,81	2,98	3,49
Febrero	12075	0,79	1,95	3,26	3,71
Marzo	49186	0,73	1,49	3,13	3,89
Abril	41386	-0,69	1,53	2,39	3,80
Mayo	6888	-1,15	2,08	2,22	4,14
Junio	14327	-1,77	1,98	2,15	4,31
Julio	649	-1,75	2,01	2,33	4,40
Agosto	708	-2,11	1,96	2,59	4,42
Setiembre	588	-2,72	1,87	2,70	4,53
Octubre	1907	-2,37	1,64	3,03	4,17
Noviembre	7147	-0,26	1,99	2,95	3,96
Diciembre	8449	0,04	1,30	3,08	3,51

Tabla 3 Media Diurna y nocturna de la IICUS(°C) y extensión espacial con desviación estándar para el AMJ usando el método desarrollado por Streutker (2002) y Flores (2016) del periodo 2001-2016.

MES	Area de Huella (km ²)	Método Gaussiano, IICUS diurno (°C)	Método Gaussiano, IICUS nocturno (°C)	Método de Cuantiles, IICUS diurno (°C)	Método de Cuantiles, IICUS nocturno (°C)
Enero	151,39	3,55	1,77	3,45	2,64
Febrero	110,87	3,37	1,550,36	3,04	2,09
Marzo	290,31	3,91	1,620,76	4,32	2,20
Abril	94,81	3,97	2,080,47	4,47	2,45
Mayo	135,23	4,67	1,740,69	4,98	2,46
Junio	122,76	4,02	1,590,73	5,78	2,12
Julio	205,02	3,86	1,690,43	4,39	1,99
Agosto	141,94	4,22	1,71	4,79	2,05
Setiembre	106,87	4,13	1,92	4,44	2,10
Octubre	111,69	4,82	1,66	5,05	2,39
Noviembre	886,20	3,93	1,57	3,83	2,40
Diciembre	152,24	4,08	NaN	4,03	2,95

Tabla 4 Media Diurna y nocturna de la IICUS(°C) y extensión espacial con desviación estándar para el AML usando el método desarrollado por Streutker (2002) y Flores (2016) del periodo 2001-2016. Se nota que en diciembre el IICUS nocturno, no fue posible el ajuste Gaussiano.

Con el fin de mostrar variaciones estacionales de la IICUS del AMC, AMJ y AML, la Figura 3 presenta la evolución de la TS (día y noche) para 3 diferentes localizaciones: urbano, frontera y rural. Estos gráficos muestran los valores promedios a largo plazo (2001-2016) y las desviaciones estándar de TS para las 3 localizaciones.

La evolución temporal de la TS para el periodo diurno (Figura 3A, 3C y 3E) muestra un bien marcado variación estacional para el AMC, AMJ y AML respectivamente, con amplitudes más altas en la ubicación central urbana y menor en zonas rurales. La TS del AMC máxima se observa en julio para el centro urbano (42°C), frontera (41°C) y rural (45°C), esto se debe a la predominancia de la categoría 16 del IGBP (suelo estéril o desértico), ya que las propiedades térmicas de la arena, que es almacenar altas cantidades de energía y producir una liberación de energía lenta; en comparación al asfalto donde predomina en las áreas urbanas.

Los valores del promedio mínimo se observan en enero para todas las ubicaciones, centro urbano (20°C), frontera (20°C) y rural (21°C). En el periodo de la noche, la evolución temporal de TS (Figura 3B) muestra una variación estacional con amplitudes similares para todas las ubicaciones, con valores máximos en julio para central urbano (28°C), frontera (27°C) y rural (25°C). Los valores de promedio mínimo se observan en enero para el centro urbano (12°C), frontera (7°C) y rural (5°C). La TS (Figura 3C) del AMJ máxima se observa en octubre para el centro urbano (33°C), frontera (35°C) y rural (35°C). Los valores del promedio mínimo se observan en junio para todas las ubicaciones, centro urbano (28°C), frontera (30°C) y rural (30°C).

En el periodo de la noche, la evolución temporal de TS (Figura 3D) muestra una variación estacional con amplitudes similares para todas las ubicaciones, con valores máximos en enero para central urbano (17°C), frontera (17°C) y rural (16°C). Los valores de promedio mínimo se observan en julio para el centro urbano (5°C), frontera (4°C) y rural (1°C). Asimismo, la TS (Figura 3E) del AML máxima se observa en abril para el centro urbano (30°C), frontera (30°C) y rural (27°C). Los valores del pro-

medio mínimo se observan en julio para todas las ubicaciones, centro urbano (27°C), frontera (25°C) y rural (24°C). En el periodo de la noche, la evolución temporal de TS (Figura 3F) muestra una variación estacional con amplitudes similares para todas las

ubicaciones, con valores máximos en febrero para el centro urbano (24°C), frontera (23°C) y rural (22°C). Los valores de promedio mínimo se observan en julio para el centro urbano (22°C), frontera (21°C) y rural (20°C).

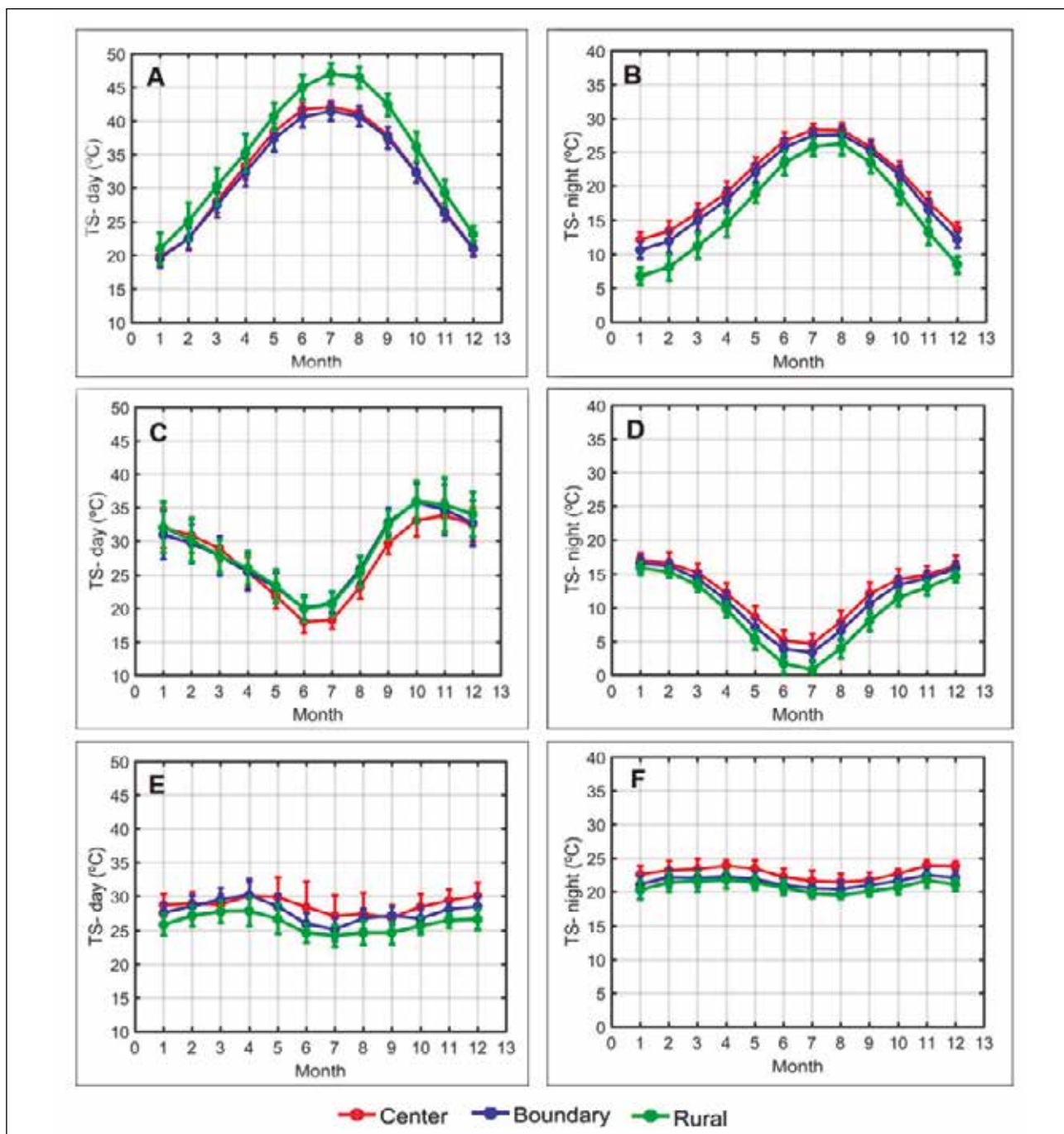


Figura 3 Evolución temporal del TS(°C) para el AMC A. periodo diurno; B. periodo nocturno; C. del mismo modo para el AMJ, C. periodo diurno; D. periodo nocturno; lo mismo para el AML; E. periodo diurno y F. periodo nocturno. En los gráficos: el centro urbano (líneas rojas), frontera (línea azul) y rural (línea verde).

3.3 Intensidad de la IICUS Diurno y Nocturno

La Figura 4 A, B y C muestra el diagrama de dispersión entre ambos métodos por todos los meses para el AMC, AMJ y AML respectivamente. Para el AMC la pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos es igual a 0,47, la intersección es igual a 1,07 y el índice de correlación es igual a 0,04. Asimismo, en la Figura 5A para el periodo nocturno, la pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos es igual a 0,75, la intersección es igual a 1,04 y el índice de correlación es igual a 0,92.

No obstante, para el AMJ en la Figura 4B, la pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos es igual a 0,48, la intersección es igual a -2,27 y el índice de correlación es igual a 0,03. Asimismo, en la Figura 5B para el periodo nocturno, la pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos es igual a 0,31, la intersección es igual a 0,55 y el índice de correlación es igual a 0,04.

Asimismo, para el AML en la Figura 4C, la pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos

es igual a 0,70, la intersección es igual a 0,93 y el índice de correlación es igual a 0,47. Asimismo, en la Figura 5C para el periodo nocturno, la pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos es igual a 0,62, la intersección es igual a 0,32 y el índice de correlación es igual a 0,26. Consecuentemente, para las AMC y AMJ durante el periodo diurno los métodos, no existe correlación, debido a que la distribución térmica máxima no es bien definida, como se espera en una distribución heterogénea, caso contrario ocurre en el AML, donde existe correlación.

Para el AMC, los resultados que utilizan el método estadístico de Cuantiles en periodos diurnos son que se muestra en la Tabla 2. La IICUS diurna, (Figura 6A), muestra el valor máximo en enero (0,23°C) y mínimo en agosto (-1,56°C). Durante el periodo nocturno, (Figura 6B), la IICUS nocturna, presenta valor máximo en enero (4,88°C) y mínimos en agosto (2,49°C).

Para el AMJ, los resultados que utilizan el método estadístico de Cuantiles en periodos diurnos (Ver Tabla 3). La IICUS diurna, (Fi-

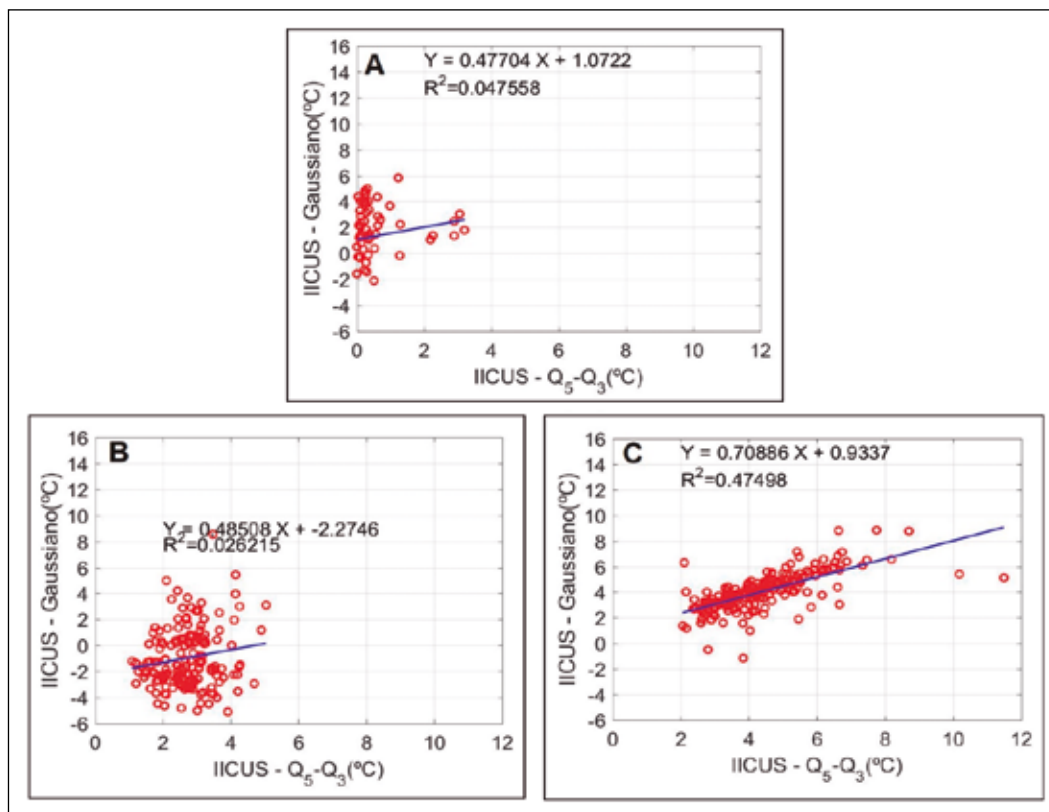


Figura 4 Gráficas de dispersión de la IICUS(°C) en periodos diurno, obtenido con el método Gaussiano vs IICUS(°C) con la diferencia de Cuantiles $Q_{5urban} - Q_{3rural}$ (°C) para el A. AMC; B. AMJ y C. AML.

Figura 5 Gráfica de dispersión de la IICUS(°C) en periodos nocturno, obtenido con el método Gaussiano vs IICUS(°C) con la diferencia de Cuantiles Q_5 - Q_3 rural(°C), para el A. AMC; B. AMJ y C. AML. Se Nota que en la figura 5B, se presenta un problema con el método Gaussiano con 4 puntos, que representa altos valores e implica la subestimación del coeficiente de determinación.

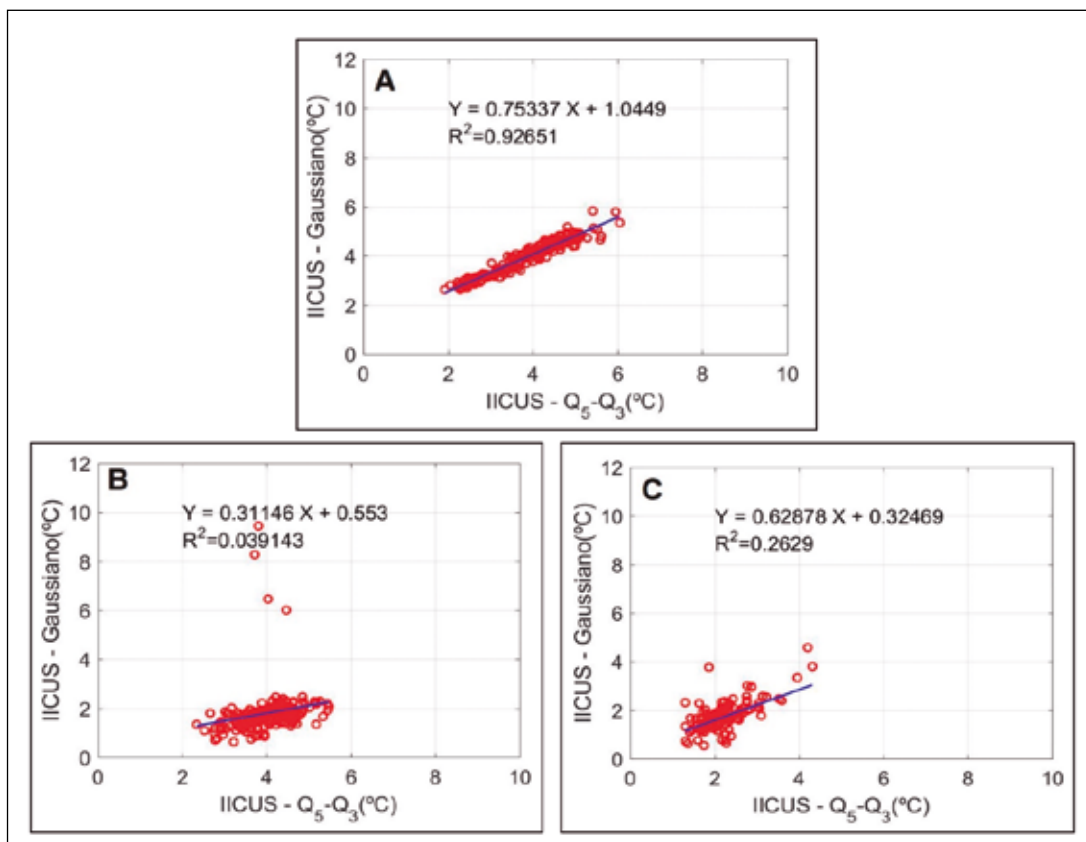


Figura 6 Evolución temporal de 2001-2016, media mensual TS(°C) con desviación estándar de TS(°C) urbano (Q_5) rural (Q_3), intensidad del IICUS(°C), para el AMC A. periodo diurno; B. periodo nocturno.

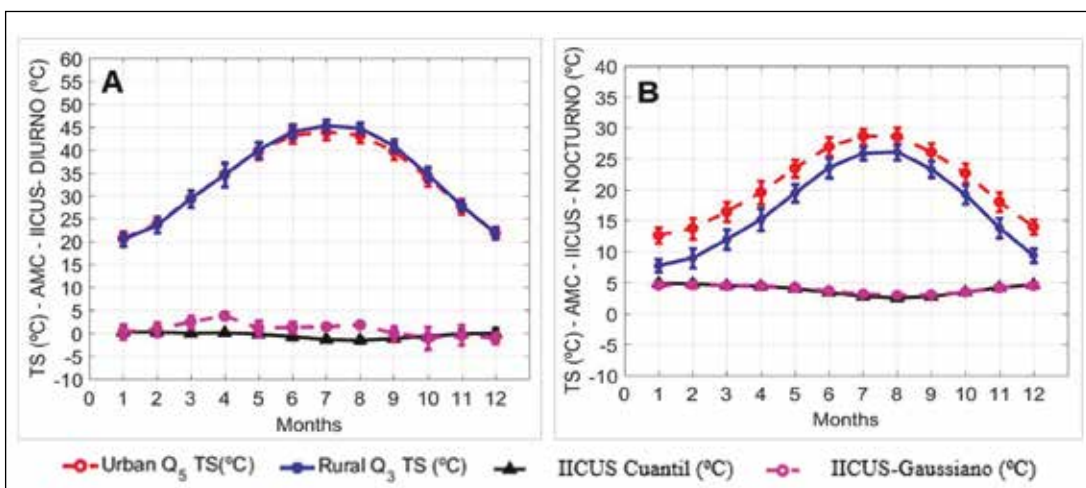


Figura 7A), muestra el valor máximo en febrero (3,26°C) y mínimo en junio (2,15°C). Durante el periodo nocturno, (Figura 7B), la IICUS nocturna, presenta el valor máximo en setiembre (4,53°C) y mínimo en enero (3,49°C).

Para el AML, los resultados que utilizan el método estadístico de Cuantiles en perio-

dos diurnos son que se muestra en la Tabla 4. La IICUS diurna, (Figura 8A), muestra el valor máximo en junio (5,78°C) y mínimo en febrero (3,04°C). Durante el periodo nocturno, (Figura 8B), La IICUS nocturna, presenta valor máximo en diciembre (2,95°C) y mínimo en agosto (2,05°C).

Se muestran en la Figura 8 en contraste con el caso diurno, se observa que la intensidad de IICUS nocturna es menor.

4 Conclusión

Para el AMC, la IICUS diurna muestra el valor máximo en enero ($0,23^{\circ}\text{C}$) y mínimo en agosto ($-1,56^{\circ}\text{C}$). La IICUS nocturna presenta valor máximo en enero ($4,88^{\circ}\text{C}$) y mínimo en agosto ($2,49^{\circ}\text{C}$). Y en el AMJ, la IICUS diurna muestra el valor máximo en febrero ($3,26^{\circ}\text{C}$) y mínimo en junio ($2,15^{\circ}\text{C}$). Y la IICUS nocturna, presenta valor máximo en setiembre ($4,53^{\circ}\text{C}$) y mínimo en enero ($3,49^{\circ}\text{C}$). Asimismo, en el AML, la IICUS diurna indica el valor máximo en junio ($5,78^{\circ}\text{C}$) y mínimo en febrero ($3,04^{\circ}\text{C}$), y la IICUS nocturna obtenida, su valor máximo en diciembre ($2,95^{\circ}\text{C}$) y mínimo en agosto ($2,05^{\circ}\text{C}$).

En la comparación de la IICUS entre los dos métodos, Gaussiano y Cuantiles, se indica un índice de correlación igual a 0,04 y 0,92 para el periodo diurno y nocturno respectivamente para el AMC. Asimismo, en el AMJ el índice de correlación es igual a 0,03 y 0,04 para el periodo diurno y nocturno respectivamente. De igual manera en el AML el índice de correlación es igual a 0,47 y 0,26 para el periodo diurno y nocturno.

Asimismo, se señala que el método de Cuantiles es el más óptimo para áreas metropolitanas que tienen frontera con montañas o cuerpos de agua; en comparación con el método Gaussiano que propone una superficie homogénea.

De este modo, el conocimiento detallado de las islas de calor urbana, con sus diferencias y especificidades, se muestra muy importante en la formulación de la política de la salud pública y como

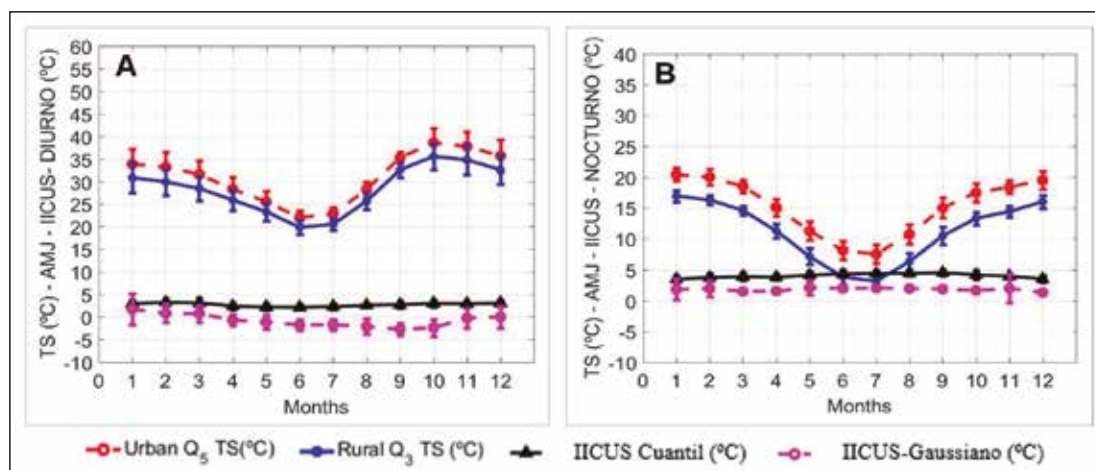


Figura 7 Evolución temporal de 2001-2016, media mensual TS(°C) con desviación estándar de TS(°C) urbano (Q₅), rural TS(°C) (Q₃), intensidad del IICUS(°C), para el AMJ. A. periodo diurno; B. periodo nocturno.

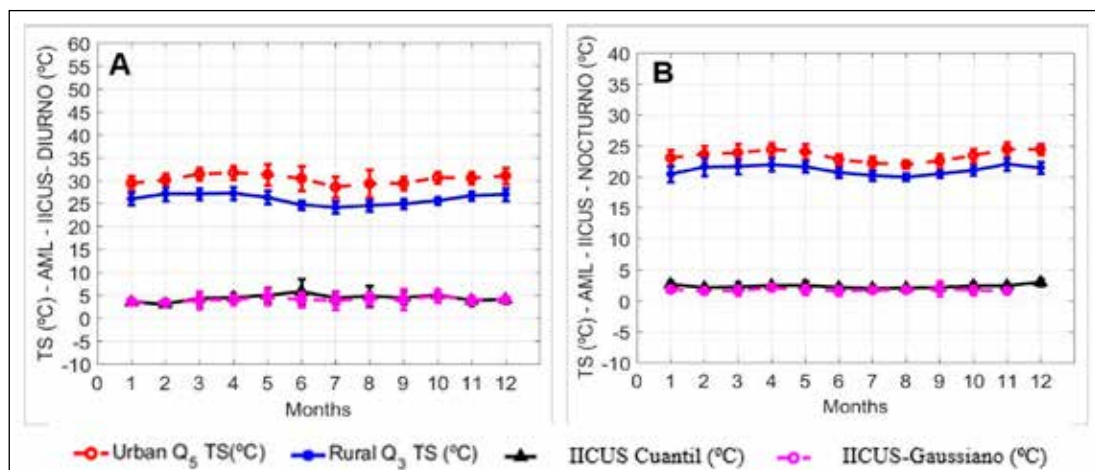


Figura 8 Evolución temporal de 2001-2016, media mensual TS(°C) con desviación estándar de TS(°C) urbano (Q₅), rural TS(°C) (Q₃), intensidad del IICUS(°C), para el AML. A. periodo diurno; B. periodo nocturno.

subsidio a la gestión de riesgos naturales (ondas de calor) y antrópicos (isla de calor urbano). También corrobora para la formulación de estrategias de mitigación de eventos extremos, como ondas de calor o extremos de temperatura, más frecuentes, en el contexto de calentamiento global.

Cabe señalar que el proyecto de investigación presentado permitirá contribuir, al entendimiento del efecto de incremento de temperatura superficial debido al incremento de superficies con construcciones urbanas, no obstante contribuye a realizar futuras investigaciones sobre incremento o alteración de flujos de calor debido a la superficie urbana que influyen en los sistemas de precipitación convectiva y su formación; debido a ello determinar el riesgo de desastre a partir de eventos extremos que se presenten debido al incremento de superficie urbana.

5 Referencias

- Angeles, J.; Angeles, R.; Flores, J. & Karam, H. 2019. Estimación de isla de calor urbana en el Área Metropolitana de Iquitos/Perú. *Anuario do Instituto de Geociencias*, 1:135-145.
- Angeles J.; Flores, R.; Karam, H.; Arana, G. & Angeles, R. 2019. Isla de calor urbana superficial en las áreas metropolitanas de Huancayo y Arequipa/Perú. *Anuario do Instituto de Geociencias*, 2:197-207.
- Adebayo, Y.R. 1987. Land-use approach to the spatial analysis of the Urban Heat Island in Ibadan, Nigeria. *Weather*, 42: 273-280.
- Banco Mundial. 2012. Statistics South Africa, 2012. Population Census 2011. Disponible en : <https://microdata.worldbank.org/index.php/catalog/2067>. Acceso en: 1 de febrero de 2019 y 30 de junio de 2019.
- BNRCC. 2016. Building Nigeria's Response to Climate Change. Towards a Lagos State Climate Change Adaptation Strategy. Disponible en: <https://www.yumpu.com/en/document/view/6688834/nigeria-ccastr-building-nigerias-response-to-climate-change>. Acceso en: 1 de febrero de 2019 y 30 de junio de 2019.
- Dousset, B. & Gourmelon, F. 2003. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and land cover. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58: 43-54.
- El-Hattab M.; Amany S.M. & Lamia G.E. 2018. Monitoring and assessment of urban heat islands over the Southern region of Cairo Governorate, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21: 311-323.
- Fasona, M.; Omojola, A.; Odunuga, S.; Tejuoso, O. & Amogu, N. An appraisal of sustainable water management solutions for large cities in developing countries through GIS: The case of Lagos, Nigeria. In: SYMPOSIUM S2 HELD, 7, Foz do Iguacu, 2005. Artículo, Foz do Iguacu, p.49-57.
- Flores, J.; Pereira, A.; & Karam, H. 2016. Estimation of long term low resolution surface urban heat intensities for tropical cities using modis remoste sensing data. *Urban Climate*, 17: 32-66.
- Hardy, C.H.; Nel A.L. 2015. Data and techniques for studying the urban heat island effect in Johannesburg. In: SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 36, Berlin, 2015. Article, *The international archives of the Photogrammetry, remote sensing and spatial information*, p. 203-206.
- Lai, L.W. & Cheng, W.L. 2009. Air Quality Influences by Urban Heat Island Coupled with Synoptic Weather Patterns. *Science of the Total Environment*, 407: 2724-2733.
- Nkeki, F.N. & Ojeh, V.N. 2014. Flood risks analysis in a littoral African city: Using geographic information system. *Geographic Information Systems (GIS): Techniques, Applications and Technologies*, 34: 279-316.
- Oke, T.R. 1976. The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands. *Atmosphere*, 14: 268-277.
- Oke, T.R. 2006. Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites. In: IOM REPORT NO.81, WMO/TD. No. 1250. World Meteorological Organization, Geneva, p. 1-47.
- Robaa, S.M. 2003. Urban-Suburban/Rural Differences over Greater Cairo, Egypt. *International Journal of Atmosfera*, 16(3): 157-171.
- Santamouris, M.; Papanikolaou, N.; Livada, I.; Koronakis, I.; Georgakis, C.; Argiriou, A. & Assimakopoulos, D.N. 2001. On the Impact of Urban Climate to the Energy Consumption of Buildings. *Solar Energy*, 70: 201-216. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00095-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00095-5). Acceso en: 1 de febrero de 2019 y 30 de junio de 2019.
- Schneider, A.; Friedl, M.; McIver, D. & Woodcock, C. 2002. Mapping urban areas by fusing multiple sources of coarse resolution remotely sensed data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 69: 1377-1386.
- Simwanda, M.; Ranagalage, M.; Estoque, R. & Mu, Y. 2019. Spatial Analysis of Surface urban heat islands four rapidly growing African Cities. *Remote Sensing*, 11:1645-1664.
- Streutker, D. 2002. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *International Journal of Remote Sensing*, 23: 2595- 2608.
- United Nations. 2010. World Population Prospects: The 2010 Revision. Disponible en: http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_indicators.htm. Acceso en: 1 de febrero de 2019 y 30 de junio de 2019.
- United Nations Population Division (UNPD). 2002. World Urbanization Prospects: The 2001 Revision: Data Tables and Highlights; United Nations: New York City, NY, USA.
- United Nations Organization. 2010. World Population Prospects: The 2010 Revision. Disponible en: http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_indicators.htm. Acceso en: 1 de febrero de 2019 y 30 de junio de 2019.
- United Nations Organization. 2012. World Urbanization Prospects: The 2011 Revision; United Nations: New York City, NY, USA.
- United Nations Organization. 2018. World Urbanization Prospects; United Nations: 2018 Revision.
- Vereda, J. & Davies, C. 2007. A Case Study of Urban Heat islands in the Carolinas. *Environmental Hazards*, 7: 353-359.