



Estimación de Isla de Calor Urbana Superficial en el Area Metropolitana de Iquitos/Peru Estimation of Superficial Urban Heat Island in The Metropolitan Area of Iquitos

Julio M. Angeles Suazo¹; Roberto J. Angeles Vasques²; Jose Luis Flores Rojas³ & Hugo Abi Karam⁴

¹Universidad Alas Peruanas Filial Huancayo, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental.
Av. Tacna, 399, 12006 - Pilcomayo, Huancayo, Perú

²Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Civil.
Av. Mariscal Castilla, N 3909, 12006 - El Tambo-Huancayo, Perú

³Instituto Geofísico del Perú, Calle Badajoz, N° 169, Urb. Mayorazgo IV, Etapa Ate, Lima - 15012 - Perú

⁴Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Meteorologia,
Av. Athos da Silveira Ramos, 274 CCMN, 21910-200 - Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

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

Recebido em: 10/09/2018 Aprobado em: 11/02/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_135_145

Resumen

La presente contribución estima la Intensidad de Isla de Calor Urbano Superficial (SUHI) durante el periodo 2001 – 2016 para el Área Metropolitana de Iquitos (AMI), localizado en Perú en el departamento de Loreto. Para cuantificar la SUHI, se usó 2 métodos: el primero es el método de Streutker (Streutker, 2002), en el cual usa una superficie Gaussiana para ajustar la temperatura superficial del suelo (LST) de la superficie urbana y rural. El segundo método propuesto por Flores (Flores, 2016), usa la diferencia entre los cuantiles 0.95 de LST para el área urbana y la mediana del LST para el área rural. Ambos métodos usan data de sensoramiento remoto de LST mensual y producto anual de tipo de cobertura de suelo (Land Cover Type) a 0.05° de resolución, obtenido del sensor MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) a bordo del satélite TERRA y AQUA. En el AMI, en los periodos diurnos, el SUHI máximo muestra los valores en setiembre (1.51°C) y valores mínimos en mayo (0.91°C). La SUHI nocturnas presenta valores máximos en marzo (0.80°C) y valores mínimos en noviembre (-0.51°C), utilizando el método de cuantiles, ya que debido a la frontera con el Rio Amazonas no se ajusta el método de Streutker.

Palabras Clave: isla de calor; temperatura superficial; Iquitos

Abstract

This contribution estimates the Surface Urban Heat Island Intensity (SUHI) during the period 2001-2016 for the Metropolitan Area of Iquitos (AMI), located in Peru in the department of Loreto. To quantify the SUHI, 2 methods were used: the first is the Streutker method (Streutker, 2002), in which it uses a Gaussian surface to adjust the Land soil temperature (LST) of the urban and rural surface. The second method proposed by Jose Flores (Flores, 2016), uses the difference between the 0.95 quantiles of LST for the urban area and the median of the LST for the rural area. Both methods use data from remote sensing of monthly LST and annual product of land cover type (Land Cover Type) at 0.05° resolution, obtained from the MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor on board the TERRA and AQUA satellite. In the AMI, in the day periods, the maximum SUHI shows the values in September (1.51°C) and minimum values in May (0.91°C). The nocturnal SUHI presents maximum values in March (0.80°C) and minimum values in November (-0.51°C), using the quantile method since the Streutker method does not fit due to the border with the Amazon River.

Keywords: heat island; superficial temperature; Iquitos

1 Introducción

El proceso de urbanización en Perú incrementó de 33.6% en 1940 a 75.9% para 2007 (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2007) y se proyectó un incremento de 77.1% para el 2025 representando 27.397 millones de habitantes (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2007), el Área Metropolitana de Iquitos (AMI) disminuyó la población de 177 920 a 150 221 habitantes durante el año 2000 al 2016 (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2015).

Asimismo, el crecimiento poblacional está relacionado con la creación de zonas urbanas, no obstante, la formación de la isla de calor urbano (UHI) que se define como el gradiente térmico entre un área urbanizada y su entorno no urbano. Aunque en definición simple, es un fenómeno complejo de caracterizar a través de un estudio observacional (Arnfield, 2003).

El desarrollo de las áreas urbanas produce una gran modificación de la superficie de la tierra y climas locales, que pueden modificarse mediante estos cambios (Changnon, 1978; Lemonsu *et al.*, 2010; Vimal *et al.*, 2015).

La presente contribución propone la estimación de la SUHI a baja resolución durante el periodo (2001-2016) para el área metropolitana de Iquitos (AMI). El método se basa en el análisis de cuantil estadístico de datos de LST según Flores *et al.* (2016) obtenidos del sensor MODIS a bordo de los satélites AQUA y TERRA. Estos resultados se compararon con los obtenidos con el método Streutker (2002). Además, se analizó la relación entre LST y cobertura vegetal a través de índices de vegetación (NDVI y EVI) utilizando los datos del MODIS.

2 Materiales y Métodos

2.1 Sitio y Localización

El Área Metropolitana de Iquitos (AMI) está localizado al nor-oeste de América del Sur, en Perú, departamento de Loreto, provincia de Maynas, extendiéndose aproximadamente entre 3.9°S a 3.6°S y 73.5°W a 73.1°W. La urbanización está asociada con varios impactos ambientales como el incremento de

la temperatura del aire, asimismo el promedio de la temperatura máxima mensual se dio durante el mes de febrero que es de 38°C y la precipitación acumulada es alrededor de 74.6 mm (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2018). Las Figuras 1B y 1C muestra la distribución horizontal del promedio mensual de la temperatura superficial (LST) del AMI para diciembre 2001 durante periodos del día y noche respectivamente. Para este mes, la máxima LST bajo el área urbana del AMI es alrededor de 35°C en el día y alrededor de 20°C en periodos nocturnos.

En orden para distinguir el comportamiento diferente de la LST a lo largo del año para áreas urbanas, rurales y su relación con la cobertura vegetal bajo el AMI, donde ha sido seleccionado 3 puntos con diferentes coberturas de superficie para el presente estudio. La Figura 1A muestra la localización rural (R) (73.39°S, 3.65°W, 113 metros sobre el nivel del mar - msnm), Urbano (U) (73.27°S, 3.75°W, 90 msnm) y frontera (B) (73.29°S, 3.81°W, 103 msnm)

2.2 MODIS Data

Se utilizó el sensor MODIS del Satélite AQUA y TERRA, donde se utilizó la Land Surface Temperature (LST) (Dousset & Gourmelon, 2003).

En el presente estudio, se realizó un promedio mensual con una resolución de 5 km, para analizar los efectos de reescalar en los patrones estadísticos de LST y luego compararlos con el producto MOD11C3 Global CMG, que es un promedio mensual compuesto, derivado del producto global diario MOD11C1. Estos datos se almacenan valores de LST a cielo despejado durante un periodo de meses a una resolución de 0.05° (5600 metros).

Con el objetivo de separar las 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), 17 tipos de cobertura del suelo. El esquema de cobertura del suelo primario identifica 17 clases de cubierta terrestre definidas por el IGBP. En esta categorización, se ha obtenido una categoría urbana a partir de las observaciones MODIS versión 4 siguiendo la contribución de Schneider *et al.* (2002). (Figura 2)

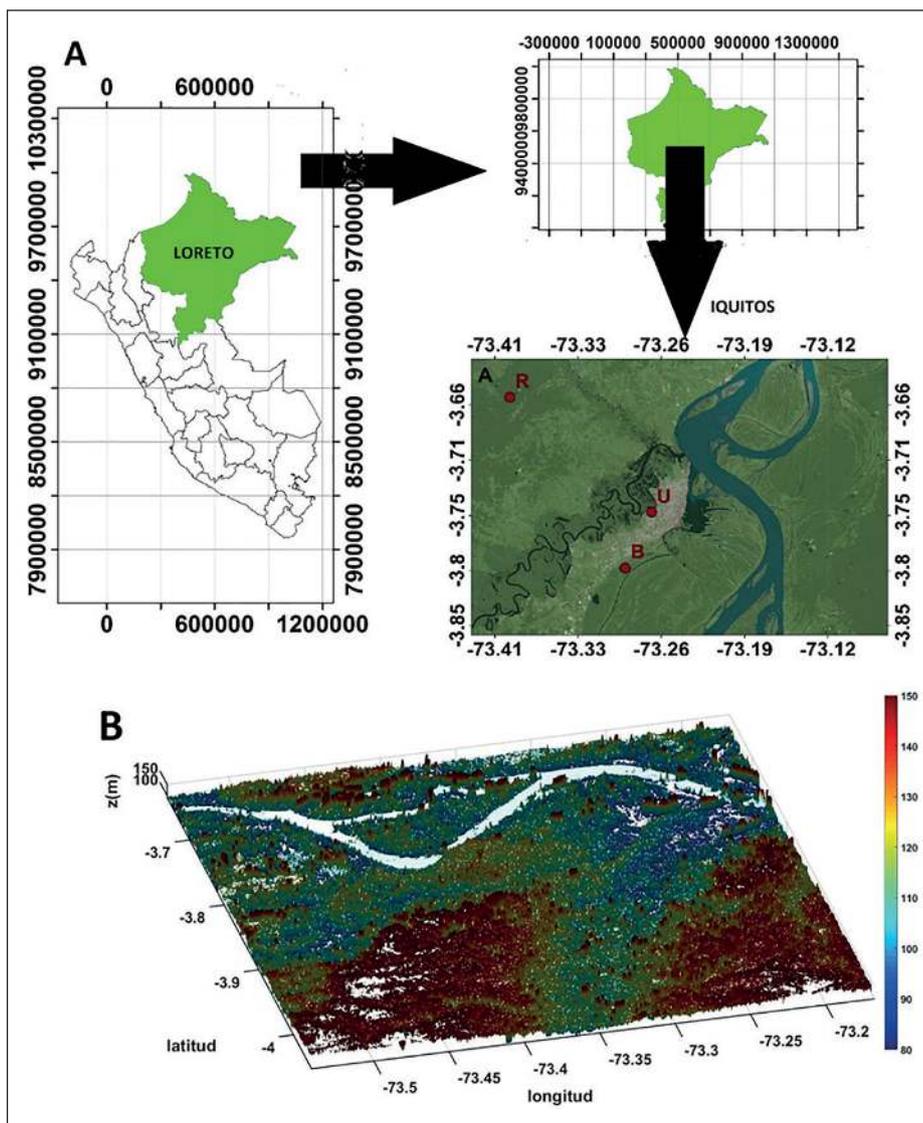


Figura 1 A. El dominio del AMI y localización rural (R) (73.39°S, 3.65°W, 113 msnm), Urbano (U) (73.27°S, 3.75°W, 90 msnm) y frontera ; B. (73.29°S, 3.81°W, 103 msnm) y B) Topografía del AMI.

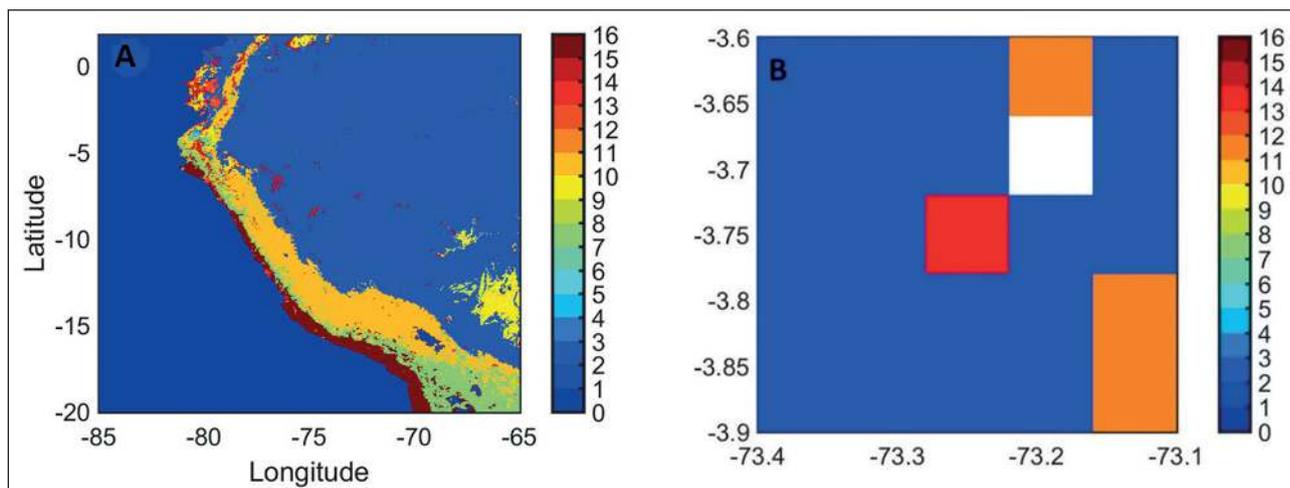


Figura 2 A. Tipo de cobertura de suelo de Perú y B. AMI para diciembre del 2006 acorde al IGBP.

2.3 Relación entre NDVI y Temperatura Superficial

El índice de vegetación comúnmente utilizado es el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). El índice NDVI se desarrolló debido a la diferencia en las características del albedo del suelo desnudo y de las superficies cubiertas de vegetación. Los albedos de los suelos desnudos son bastante constantes a través de las porciones visibles (rojo, 0.62-0.75 μm) e infrarrojo cercano (NIR, 0.75-1.4 μm) del espectro. Mientras que las superficies cubiertas de vegetación muestran un aumento dramático en el albedo en la región NIR en comparación con las porciones visibles del espectro. Por lo tanto, el NDVI es una medida de la diferencia entre dos bandas de longitud de onda específica. Por otro lado, el enhanced vegetation index (EVI) mejora la señal de vegetación con una sensibilidad mejorada en regiones de biomasa alta y una mejor vigilancia de la vegetación mediante un desacoplamiento de la señal de fondo del dosel y una reducción de la influencia de la atmósfera, como lo indica (Flores *et al.*, 2016)

2.4 Estimación del SUHI

Para determinar la SUHI se utilizó el Método de Streutker propuesta por Streutker (2002).

La técnica usa un ajuste least-square fit de toda la isla de calor a una superficie gaussiana de la forma:

Donde es la temperatura superficial total, incluidos los píxeles urbanos y rurales. , y son los componentes constante y lineal de la temperatura rural, respectivamente. (Adaptado por Flores *et al.*, 2016), como se indica en la Figura 3

2.5 Método de Cuantiles

Este método propuesto por Flores *et al.* (2016) para estimar la SUHI, donde se basa en el análisis estadístico de cuantiles de LST urbano y rural.

Asimismo, propuso la siguiente fórmula para estimar la SUHI para una resolución de 5 km:

Donde es el cuantil 0.95 de la distribución LST sobre el área urbana y es la mediana de la distribución LST sobre el área rural, ambas con una resolución de 5 km. El presente método podría permitir estimar un valor aproximado de la intensidad del SUHI separando áreas urbanas y rurales (Figura 4) con información del tipo de cobertura de la tierra incluso cuando la forma de la ciudad no sea elipsoidal o cuando la resolución espacial sea tan alta que no permita un ajuste Gaussiano de la superficie.

3 Resultados

3.1 Isla de Calor Urbana Superficial

Los resultados para las magnitudes de SUHI diurnas a largo plazo (2001-2016) y las extensiones

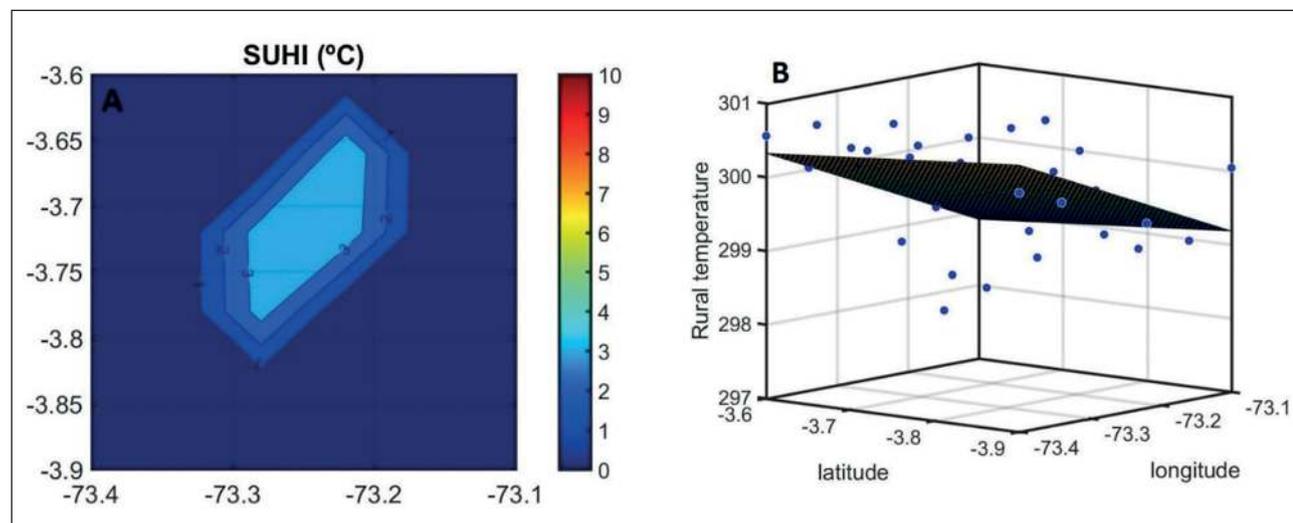


Figura 3 A) Interpolación planar Least – Squares para la LST rural en 2 dimensiones, B) 3 dimensiones.

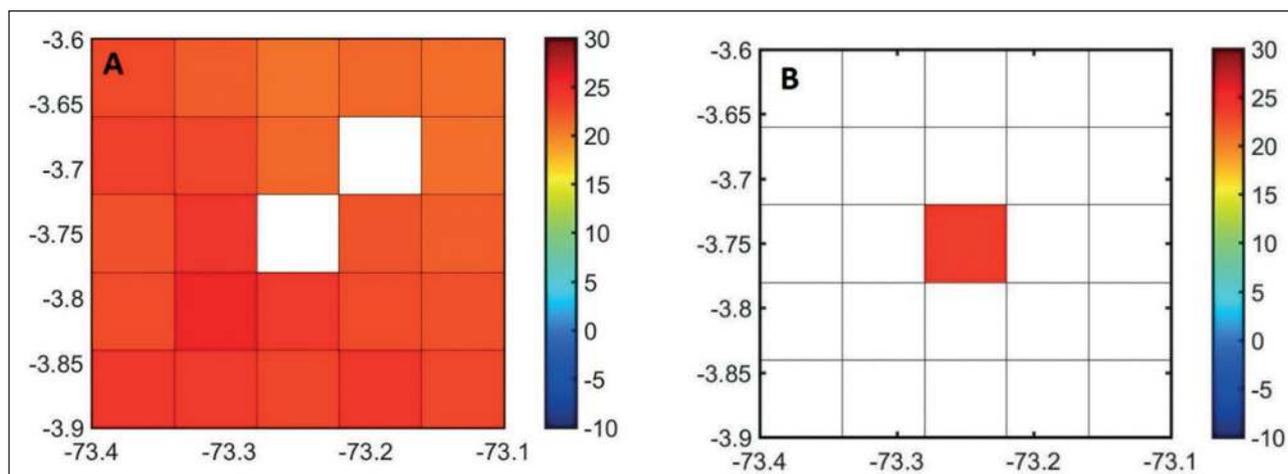


Figura 4 A. Media mensual diurna de LST bajo el área urbana del AMI para enero 2001; B. Media mensual diurna LST del área rural del AMI para enero 2001.

espaciales para todos los meses sobre el AMI usando el método de Streutker, se presentan en la Tabla 1. La SUHI mas alta para el periodo diurno ocurrió en julio (2.38°C) y la más baja en noviembre (0.29°C). El área máxima de la huella se produjo en abril (4418.6

km²) y mínimo en mayo (20.79 km²). La Tabla 1 también muestra el coeficiente de correlación (R-cuadrado) del ajuste de Gauss, con valores alrededor de 0.31 para meses de primavera-verano y cerca de 0.41 para los meses de otoño-invierno.

Meses	$T_0(C)_{rural}$	$A_0(C)$	$a_x^1(km)$	$a_y^1(km)$	Area Footprint (km^2)	R^2
Enero	24.84 ± 1.23	1.12 ± 2.03	0.8 ± 22.2	2.6 ± 30.4	563.41 ± 1980.8	0.17
Febrero	24.03 ± 1.41	-0.04 ± 2.07	8.7 ± 7.8	8.5 ± 6.2	55.69 ± 51.94	0.20
Marzo	24.26 ± 1.36	0.36 ± 1.22	10.8 ± 10.5	9.5 ± 13.0	44.21 ± 107.6	0.15
Abril	23.82 ± 1.36	1.43 ± 2.78	17.5 ± 45.9	16.1 ± 91.0	4418.6 ± 17241	0.19
Mayo	23.51 ± 0.98	0.79 ± 1.37	5.5 ± 14.2	5.7 ± 5.3	20.79 ± 49.91	0.16
Junio	23.70 ± 0.83	1.20 ± 0.86	6.0 ± 4.8	5.2 ± 2.9	38.92 ± 22.07	0.24
Julio	24.28 ± 0.95	2.38 ± 1.51	19.9 ± 45.3	5.3 ± 2.6	57.99 ± 84.43	0.32
Agosto	26.18 ± 1.02	2.28 ± 1.97	5.0 ± 2.0	6.3 ± 2.7	33.63 ± 20.94	0.41
Setiembre	26.92 ± 1.00	1.64 ± 1.13	4.9 ± 2.7	8.3 ± 9.4	46.94 ± 57.89	0.31
Octubre	26.72 ± 1.29	0.66 ± 2.04	6.3 ± 16.3	6.5 ± 15.3	169.24 ± 731.16	0.19
Noviembre	25.69 ± 0.99	-0.29 ± 1.01	15.9 ± 15.9	5.4 ± 7.9	46.92 ± 90.86	0.17
Diciembre	25.18 ± 1.07	0.37 ± 2.65	103.9 ± 440.2	4.2 ± 8.4	698.84 ± 2804.9	0.15

Tabla 1 Media Diurna de la SUHI y extensión espacial con desviación estándar para el AMI usando el método desarrollado por Streutker (2002) del periodo 2001-2016. La tabla muestra: Temperatura media para área rural $T_0(C)$, magnitud del SUHI: $a_0(C)$, extensión longitudinal: $a_x^1(km)$, extensión latitudinal: $a_y^1(km)$, Footprint área (km^2) y R-Square del ajuste.

Con el fin de mostrar variaciones estacionales de la SUHI del AMI, la Figura 5 presenta la evolución del LST (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 LST para las 3 localizaciones. La evolución temporal de LST para el periodo diurno (Figura 5A) muestra un bien marcado variación estacional para el AMI, con amplitudes más altas en la ubicación central urbana y menor en zonas rurales. La LST máxima para este periodo se observa en setiembre para el centro urbano (28°C), frontera (27°C) y rural (26°C). Los valores mínimos del promedio, se observan en junio para todas las ubicaciones, centro urbano (25°C), frontera (24°C) y rural (23°C). En el periodo de la noche, la evolución temporal de LST (Figura 5B) muestra una variación estacional con amplitudes similares para todas las ubicaciones, con valores máximos en enero para central urbano (23°C), frontera (22°C) y rural (22°C). Los valores mínimos se observan en junio para el centro urbano (21°C), frontera (21°C) y rural (20°C). Estos resultados muestran una amplitud térmica importante sobre el AMI para los puntos dentro del área urbana.

3.3 Intensidad de la SUHI Diurno y Nocturno

La Figura 6A muestra el diagrama de dispersión entre ambos métodos por todos los meses. La

pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos es igual a 0.74, la intersección es igual a 0.10 y el índice de correlación es igual a 0.13. Este comportamiento se puede observar en la Figura 8A, que muestra la comparación entre la evolución del tiempo de la SUHI con las desviaciones estándar utilizando Streutker y método cuantiles. Asimismo, en la Figura 6B para el periodo nocturno, la pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos es igual a 0.59, la intersección es igual a 0.14 y el índice de correlación es igual a 0.25; y en la Figura 8B se compara entre la evolución del tiempo de la SUHI con las desviaciones estándar utilizando Streutker y método cuantiles

A partir de estos se observa que la SUHI diurna y nocturna es mayor para el AMI en los meses de verano (diciembre-febrero) y ligeramente inferior en los meses de mayo-agosto como se muestra en la Figura 7.

Para el AMI, los resultados que utilizan el método estadístico de cuantiles en periodos diurnos son que se muestra en la Tabla 2. El valor más alto del cuantil (Q5) para LST urbano se observó en setiembre (28.41°C) y el más bajo en mayo (24.41°C). El valor máximo de LST rural medio (Q3) se observó en octubre (26.75°C) y mínimo en mayo (23.50°C). La SUHI diurnas obtenido con la ecuación 2, muestra los valores máximos en setiembre (1.51°C) y

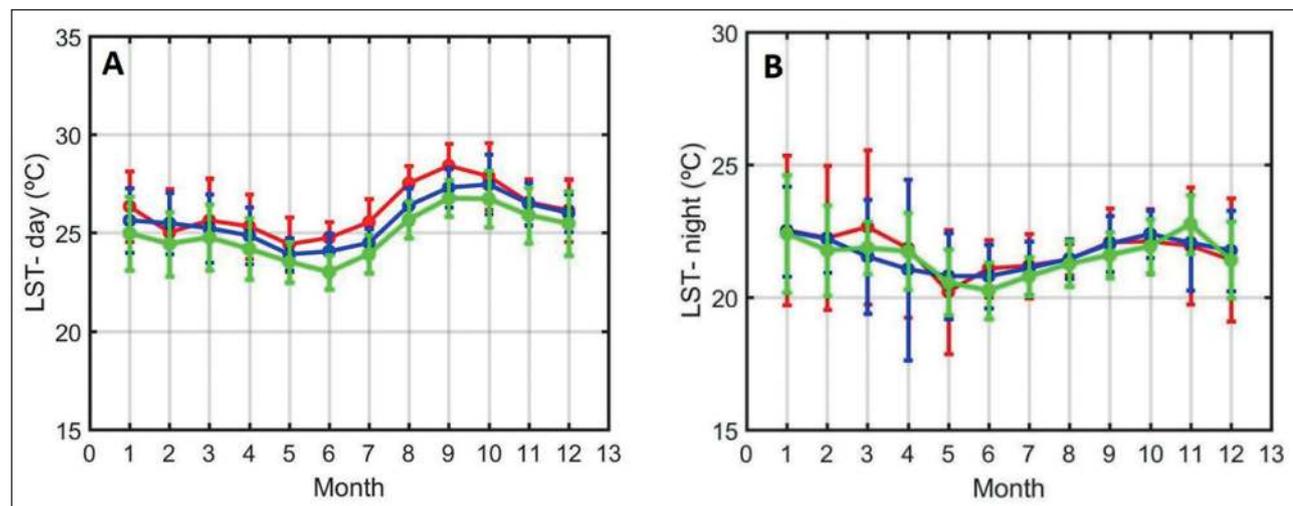


Figura 5 A . Tiempo de evolución del LST para periodo diurno y B periodo nocturno del AMI del centro urbano (líneas rojas), frontera (línea azul) y rural (línea verde).

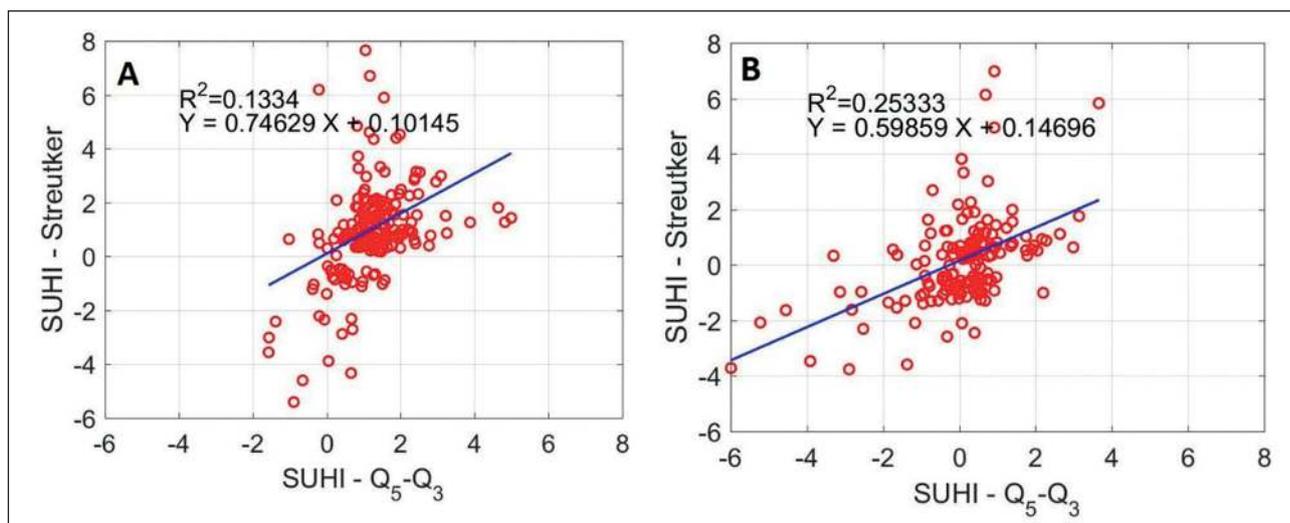


Figura 6 A) Scatterplot del SUHI en periodo diurno, obtenido con el método de Streutker's vs SUHI con la diferencia de cuantiles, $Q_5^{urban} - Q_3^{rural}$ y B) periodo nocturno del AMI.

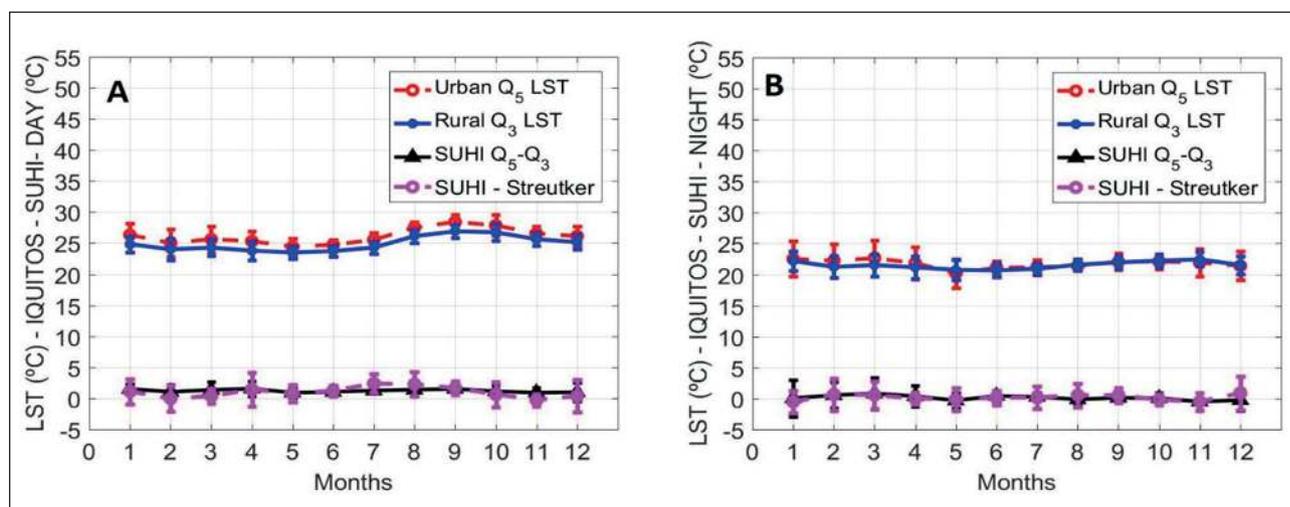


Figura 7 A. Evolución temporal de 2001-2016, media mensual de la LST ($^{\circ}\text{C}$) con desviación estándar para periodo diurno de LST y B) periodo nocturno, urbano (Q_5) rural LST (Q_3), intensidad del SUHI ($^{\circ}\text{C}$) para el AMI.

valores mínimos en mayo (0.91°C). Comparando los resultados de las SUHI usando ambos métodos (Tablas 1 y 2), se observa un alto nivel de acuerdo entre ellos.

Tabla 2 Promedio mensual diurno de LST ($^{\circ}\text{C}$) con su desviación estándar para áreas rurales, urbanas y la intensidad del SUHI ($^{\circ}\text{C}$) a 5 km de resolución para el AMI durante el periodo 2001 – 2016. La tabla muestra valores para la mediana y cuantil 0.95 .

Asimismo, los resultados usando el método estadístico de cuantiles en los periodos nocturnos se

muestra en la Tabla 3. El valor más alto del cuantil (Q_5) para LST urbano se observó en marzo (22.65°C) y el más bajo en mayo (20.20°C). El valor máximo de mediana LST rural (Q_3), se observó en noviembre (22.45°C) y el mínimo en junio (20.66°C). Las SUHI nocturnas obtenidas con el Ecuación 2, presente valores máximos en marzo (0.80°C) y valores mínimos en noviembre (-0.51°C).

Con el fin de comprender los procesos para la génesis de las SUHI y posibles cambios en el clima como resultado de la expansión de las áreas urbanas,

Meses	URBAN LST (°C)		RURAL LST (°C)		SUHI DIURNO (°C)
	Q_3	Q_5	Q_3	Q_5	Q_5-Q_3
Enero	26.34 ± 1.79	26.34 ± 1.79	24.84 ± 1.30	26.58 ± 1.44	1.50 ± 0.78
Febrero	25.02 ± 2.22	25.02 ± 2.22	24.01 ± 1.68	26.34 ± 1.48	1.03 ± 1.16
Marzo	25.63 ± 2.14	25.63 ± 2.14	24.28 ± 1.32	26.39 ± 1.77	1.34 ± 1.32
Abril	25.32 ± 1.64	25.32 ± 1.64	23.78 ± 1.51	25.54 ± 1.28	1.54 ± 1.25
Mayo	24.41 ± 1.38	24.41 ± 1.38	23.50 ± 0.99	24.77 ± 1.05	0.91 ± 0.81
Junio	24.75 ± 0.81	24.75 ± 0.81	23.72 ± 0.86	24.68 ± 0.92	1.03 ± 0.47
Julio	25.54 ± 1.18	25.54 ± 1.18	24.30 ± 0.97	25.21 ± 1.07	1.24 ± 0.51
Agosto	27.52 ± 0.90	27.52 ± 0.90	26.13 ± 1.06	27.21 ± 1.10	1.38 ± 0.61
Setiembre	28.41 ± 1.12	28.41 ± 1.12	26.90 ± 1.02	28.10 ± 1.06	1.51 ± 0.71
Octubre	27.87 ± 1.69	27.87 ± 1.69	26.75 ± 1.35	28.14 ± 1.39	1.12 ± 1.02
Noviembre	26.55 ± 1.17	26.55 ± 1.17	25.64 ± 1.01	27.31 ± 1.18	0.92 ± 0.74
Diciembre	26.14 ± 1.61	26.14 ± 1.61	25.16 ± 1.16	27.07 ± 1.15	0.98 ± 1.53

Tabla 2 Promedio mensual diurno de LST (°C) con su desviación estándar para áreas rurales, urbanas y la intensidad del SUHI (°C) a 5 km de resolución para el AMI durante el periodo 2001 – 2016. La tabla muestra valores para la mediana Q_3 y cuantil 0.95 Q_5 .

Meses	URBAN LST (°C)		RURAL LST (°C)		SUHI NOCTURNO (°C)
	Q_3	Q_5	Q_3	Q_5	Q_5-Q_3
Enero	22.52 ± 2.82	22.52 ± 2.82	22.18 ± 1.30	23.77 ± 1.18	0.05 ± 2.94
Febrero	22.23 ± 2.72	22.23 ± 2.72	21.24 ± 1.68	23.02 ± 1.57	0.51 ± 2.10
Marzo	22.65 ± 2.91	22.65 ± 2.91	21.51 ± 1.32	23.61 ± 1.81	0.80 ± 2.52
Abril	21.84 ± 2.61	21.84 ± 2.61	21.17 ± 1.51	23.18 ± 2.09	0.36 ± 1.71
Mayo	20.20 ± 2.34	20.20 ± 2.34	20.75 ± 0.99	22.58 ± 1.66	-0.33 ± 1.19
Junio	21.08 ± 1.08	21.08 ± 1.08	20.66 ± 0.86	22.12 ± 1.33	0.42 ± 0.89
Julio	21.18 ± 1.21	21.18 ± 1.21	20.93 ± 0.97	22.05 ± 1.17	0.25 ± 0.67
Agosto	21.42 ± 0.59	21.42 ± 0.59	21.58 ± 1.05	22.56 ± 1.05	-0.15 ± 0.63
Setiembre	22.07 ± 1.30	22.07 ± 1.30	21.96 ± 1.02	23.03 ± 1.10	0.11 ± 0.81
Octubre	22.10 ± 1.22	22.10 ± 1.22	22.23 ± 1.35	23.71 ± 1.07	0.03 ± 0.92
Noviembre	21.94 ± 2.21	21.94 ± 2.21	22.45 ± 1.01	24.08 ± 1.24	-0.51 ± 1.41
Diciembre	21.40 ± 2.32	21.40 ± 2.32	21.54 ± 1.16	23.17 ± 1.55	-0.26 ± 1.70

Tabla 3 Promedio mensual nocturno de LST (°C) con su desviación estándar para áreas rurales, urbanas y la intensidad del SUHI (°C) a 5 km de resolución para el AMI durante el periodo 2001–2016. La tabla muestra valores para la mediana Q_3 y cuantil 0.95 Q_5 3.4 SUHI e índice de vegetación.

las relaciones entre LST y los índices de vegetación (NDVI y EVI). En particular, la evolución temporal mensual de los índices de vegetación a largo plazo (2001-2016) de NDVI y EVI para tres puntos sobre el AMI: urbano, frontera y rural, se muestran en la Figura 8A y 8B respectivamente. Como era de esperar, los valores más altos de los índices de vegetación corresponden a las áreas rurales y más bajas en las áreas urbanizadas, con valores intermedios en los límites o frontera (Boundary).

Para periodos diurnos, se comparó los índices de vegetación NDVI con LST (Figura 9A, B) y EVI con LST (Figura 9C, D), donde se observa que las ubicaciones urbanas con una cubierta vegetal más baja muestran amplitudes térmicas estacionales baja alrededor de 7°C y las localidades rurales con una cubierta vegetal más alta muestran amplitudes térmicas estacionales más alta alrededor de 12 0C.

Por otro lado, la regresión lineal durante el periodo (2001-2016) entre NDVI vs LST y EVI vs

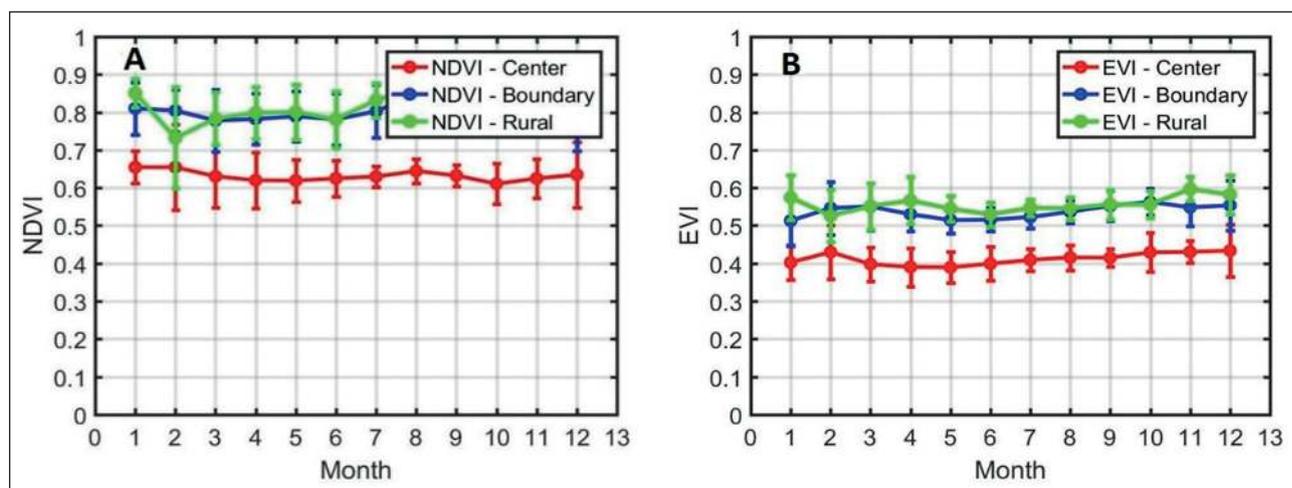


Figura 8 A.Evolución temporal 2001-2016, media mensual con desviación estándar de índice de vegetación NDVI y B EVI para el AMI en el centro urbano (línea roja), frontera (línea azul) y rural (línea verde).

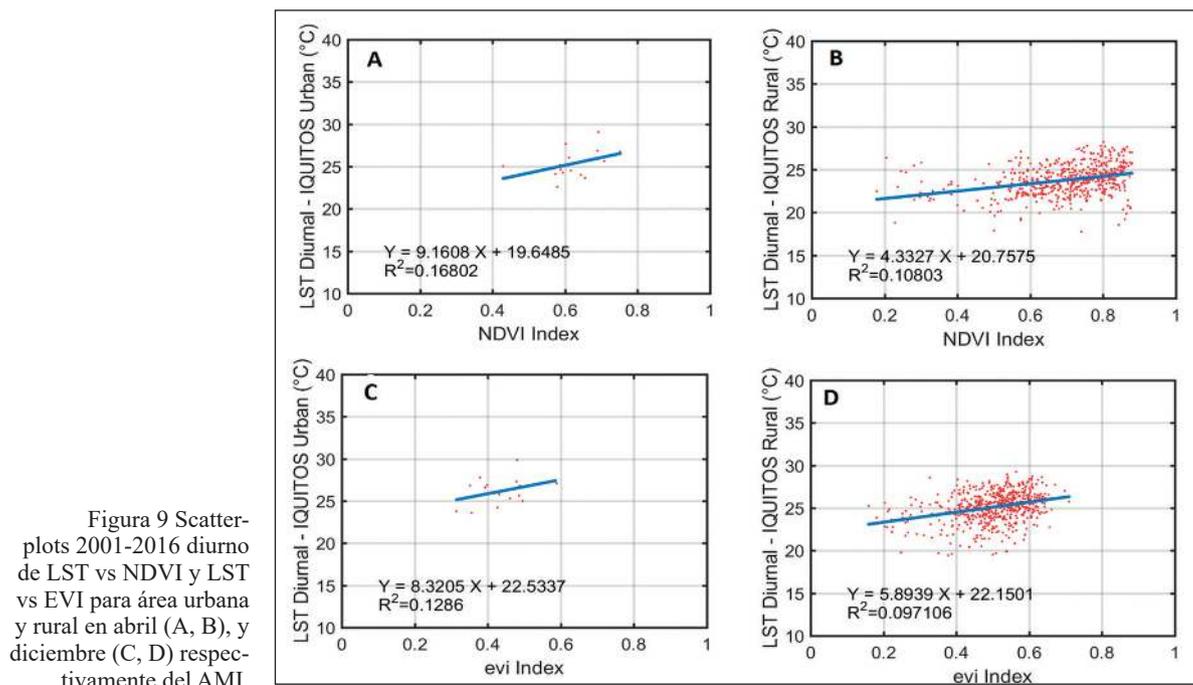


Figura 9 Scatter-plots 2001-2016 diurno de LST vs NDVI y LST vs EVI para área urbana y rural en abril (A, B), y diciembre (C, D) respectivamente del AMI.

LST; con pendientes, intersecciones e índices de correlación (R2) para el AMI se muestran en Tabla 4 Las áreas urbanas muestran correlación positiva máxima entre LST y NDVI de 0.31 en el mes de mayo. En el caso de la correlación positiva entre LST y EVI es levemente más bajo de 0.26 en junio y agosto. Por el contrario, para las áreas rurales de ambas correlaciones entre LST - NDVI y LST - EVI, las correlaciones son menores, a veces insignificante con valores entre 0.01 a 0.12 y de 0.01 a 0.10 respectivamente.

4 Conclusión

El objetivo principal de la presente contribución es estimar la SUHI durante el periodo (2001-2016) a una resolución (0.05°) para el AMI, utilizando datos del sensor MODIS, con el método de Streutker y análisis estadístico de cuantiles basado en diferencias de cuantiles de LST sobre las áreas urbano y rural separadas con el producto Land Cover Type MODIS. De acuerdo con el análisis, se concluyó:

En los periodos diurnos, la SUHI máximo muestra los valores en setiembre (1.51°C) y valores mínimos en mayo (0.91°C). La SUHI nocturnas presenta valores máximos en marzo (0.80°C) y valores mínimos en noviembre (-0.51°C).

En la comparación de la SUHI entre los métodos de Streutker y cuantiles, se indica que para los periodos diurnos, la pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos es igual a 0.74, la intersección es igual a 0.10 y el índice de correlación es igual a 0.13; asimismo para el periodo nocturno, la pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos es igual a 0.59, la intersección es igual a 0.14 y el índice de correlación es igual a 0.25

Las principales causas que generan estas diferencias entre ambos métodos pueden ser las siguientes: (1) El patrón de LST sobre el área rural no encaja bien en un plano recto porque el pixel está cercano al rio Amazonas. (2) El patrón de LST sobre el área urbana del AMI no tiene una forma elipsoidal debido a que hacen frontera con el rio Amazonas y por lo tanto, un ajuste Gaussiano normal, con solo un pico, no es adecuado.

Asimismo, el presente estudio nos indica las limitaciones del método de Streutker, que no es utilizable para superficies que tienen frontera con cuerpos de agua (ríos, Océanos, Lagos) y del método de cuantil que es favorable para cualquier superficie que presente una topografía compleja u homogénea, pero su desventaja es que no presenta el área afectada por la SUHI en comparación con lo propuesto por Streutker.

	NDVI						EVI					
	URBAN			RURAL			URBAN			RURAL		
	SLOPE	IC	R2	SLOPE	IC	R2	SLOPE	IC	R2	SLOPE	IC	R2
Enero	4.47	23.41	0.01	4.80	21.25	0.11	4.50	24.53	0.01	4.05	22.85	0.05
Febrero	3.09	23.03	0.02	4.86	20.49	0.07	4.66	23.08	0.01	3.18	22.40	0.02
Marzo	0.03	25.61	0.01	4.96	20.78	0.08	-1.65	26.29	0.01	4.83	21.96	0.06
Abril	9.16	19.64	0.17	4.33	20.75	0.11	13.48	20.06	0.17	2.51	22.62	0.02
Mayo	13.80	15.87	0.31	3.32	21.14	0.11	-4.30	26.09	0.02	2.06	22.55	0.03
Junio	-3.52	26.94	0.04	0.61	23.24	0.01	-9.32	28.47	0.26	-0.74	24.01	0.01
Julio	14.08	16.67	0.11	0.87	23.34	0.01	8.37	22.12	0.04	0.28	24.15	0.01
Agosto	-12.69	35.71	0.20	-1.39	27.25	0.02	-13.85	33.28	0.26	-1.69	26.97	0.02
Setiembre	-11.38	35.62	0.08	-0.31	27.12	0.01	9.44	24.49	0.04	0.22	26.77	0.01
Octubre	3.56	25.69	0.01	2.57	24.74	0.02	10.69	23.28	0.10	3.29	24.99	0.03
Noviembre	2.44	25.03	0.01	2.87	23.52	0.05	-5.35	28.86	0.02	1.26	24.99	0.01
Diciembre	6.49	22.02	0.12	5.45	21.12	0.12	8.32	22.53	0.13	5.89	22.15	0.10

Tabla 4 Pendiente (Slope), intercepto (IC) e índice de correlación (R2) de la regresión lineal entre NDVI vs LST y EVI vs LST para el AMI.

5 Referencias

- Arnfield, A.J. 2003. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climato.*, 23: 1–26. (DOI: 10.1002/joc.859)
- Changnon, S. 1978. Urban effects on severe local storms at st. louis. *J. Appl. Meteor.*, 17: 578-592.
- Dousset, B. & Gourmelon, F. 2003. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and land cover. *J. Photogramm. Remote Sens.*, 58: 43-54.
- Flores, J.; Pereira, A.; & Karam, H. 2016. Estimation of long term low resolution surface urban heat intensities for tropical cities using modis remote sensing data. *Urban Climate*, 17: 32-66.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2007. Dinámica poblacional. URL <http://proyectos.inei.gob.pe/web/biblioineipub/bancopub/Est/Lib0901/cap02>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2015. <https://proyectos.inei.gob.pe/web/poblacion/>
- Lemonsu, A.; Kounkou, R.; Desplat, J.; Salagnac, J. & Masson, V. 2010. Evolution of the parisian urban climate under a global changing climate. *Climate change*, 116: 679-692.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. 2018. *Boletín Hidroclimatico Regional, Dirección zonal 8, Loreto*. 21p
- 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.
- Streutker, D. 2002. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *International Journal of Remote Sensing*, 23: 2595- 2608.
- Vimal, M.; Ganguly, A.; Bart, N. & Lettenmaier, D. 2015. Changes in observed climate extremes in global urban areas. *Environmental Research Letters*, 10: 1-15.