



Isla de Calor Urbana Superficial en las Áreas Metropolitanas de Huancayo y Arequipa/Perú Surface Urban Heat Island in the Metropolitan Areas of Huancayo and Arequipa/Perú

Julio Miguel Angeles Suazo¹; José Luis Flores Rojas²;
Hugo Abi. Karam³; Gina R. Arana Mallma¹; & Roberto J. Angeles Vasquez⁴

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

² Instituto Geofísico del Perú, Calle Badajoz, 169, 15498 Urb. Mayorazgo IV Etapa – Ate, Lima-Perú

³ Universidade 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

⁴ Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Civil.

Av. Mariscal Castilla N 3909, 12006 El Tambo-Huancayo, Perú

E-mails: julio_as_1@hotmail.com; jlflores@igp.gob.pe; hugo@igeo.ufrj.br; gina_arana8@hotmail.com; roanvas@hotmail.com

Recebido em: 12/02/2019 Aprovado em: 15/04/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_2_197_207

Resumen

La presente contribución estima la Intensidad de Isla de Calor Urbano Superficial (SUHI) durante el periodo 2001 – 2016 para el Área Metropolitana de Huancayo (AMH) y Arequipa (AMA), localizados en Perú. Para cuantificar la SUHI, se utilizaron 2 métodos: el método de Streutker (Streutker, 2002), y el método de cuantiles propuesto por Flores (Flores, 2016). Ambos métodos utilizan datos de temperatura superficial (Land Surface Temperature) mensual y del producto anual de tipo de cobertura de suelo (Land Cover Type) con 0.05° de resolución, obtenidos con el sensor MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) a bordo de los satélites TERRA y AQUA. La intensidad de isla de calor urbano superficial diurno, obtenido con el método de cuantiles en el AMH, muestra valores máximos en marzo (6.94°C) y valores mínimos en agosto (2.79°C), y la SUHI nocturnas obtenidas muestra valores máximos en agosto (6.06°C) y valores mínimos en marzo (3.76°C).

No obstante, la SUHI diurnas en el AMA, muestra valores máximos en febrero (5.54°C) y valores mínimos en agosto (2.14°C), y la SUHI nocturnas presenta valores máximos en febrero (6.38°C) y valores mínimos en junio (4.62°C).

Palabras Clave: isla de calor; temperatura superficial

Abstract

This contribution estimates the Intensity of Surface Urban Heat Island (SUHI) during the period 2001 - 2016 for the Metropolitan Area of Huancayo (AMH) and Arequipa (AMA), located in Peru. To quantify the SUHI, 2 methods were used: the Streutker method (Streutker, 2002), and the quantile method proposed by Flores (Flores, 2016). 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. The surface urban heat island intensity diurnal, obtained with the quantile method in the AMH, shows the maximum values in March (6.94°C) and minimum values in August (2.79°C). and the SUHI at night obtained present maximum values in August (6.06°C) and minimum values in March (3.76°C). Likewise, the SUHI diurnas in the AMA, shows the maximum values in February (5.54°C) and minimum values in August (2.14°C), and the SUHI at night presents maximum values in February (6.38°C) and minimum values in June (4.62°C).

Keywords: heat island; superficial temperature

1 Introducción

La rápida urbanización ha acelerado en gran medida el desarrollo económico y social, y las ciudades globales son motores del crecimiento económico y centros de innovación para la economía global (De Sherbinin *et al.*, 2007), pero la urbanización también ha creado numerosos problemas que van desde lo local hasta lo global (Kim & Baik, 2005; Zhao *et al.*, 2006), incluida la mayor contaminación del aire, agua y la disminución del suministro de agua (Liu & Diamond, 2005; Shao *et al.*, 2006), alteración del clima local y mayor demanda de energía (Zhou *et al.*, 2004; González *et al.*, 2005), instalaciones de vivienda y saneamiento insuficientes y congestión del tráfico (Jago-on *et al.*, 2009), y una reducción importante en la producción de vegetación natural y el almacenamiento / secuestro de carbono (Fang *et al.*, 2003; Yuan, 2008).

El desarrollo urbano tiene algunos impactos negativos en la calidad ambiental global, incluida la calidad del aire, el aumento de la temperatura y la alteración del paisaje. También conduce a la conversión de tierras agrícolas y la pérdida de biodiversidad (Santamouris *et al.*, 2001). La isla de calor urbano (UHI) es un fenómeno climático donde las áreas urbanas tienen una temperatura del aire más alta que su entorno rural debido a las modificaciones antropogénicas de las superficies terrestres. Existen dos tipos de islas de calor urbanas, superficiales y atmosféricas UHI. Una combinación de factores conduce al desarrollo de la UHI. UHI se mide por la temperatura de la superficie, que puede variar entre la ciudad y el área rural hasta en 5 °C (Naciones Unidas, 2010). Muchos factores contribuyen a UHI, tales como: propiedades térmicas de materiales de construcción, geometría de diseño urbano (cañón urbano), factores antropogénicos y cubierta de tierra alterada. La reflectancia del material de construcción es generalmente baja, por lo que reflejan menos y absorben más energía, lo que conduce a temperaturas crecientes a nivel de la superficie. (Vereda, 2007; Lai, 2009). La estimación de la intensidad de Isla de Calor Urbano superficial (SUHII) se basa en las definiciones de estaciones o píxeles urbano y rural (por ejemplo, Roth *et al.*, 1989; Azevedo *et al.*, 2016; Du *et al.*, 2016). Sin embargo, las regiones urbanas es-

tán fuertemente afectadas por actividades humanas con alta heterogeneidad sobre la superficie urbana, e incluso las áreas rurales circundantes pueden tener diferentes ecosistemas. (Buyantuyev & Wu, 2010; Cadenasso *et al.*, 2007). Schwarz *et al.* (2011) compararon once enfoques para cuantificar la SUHII con las temperaturas de la superficie terrestre de MODIS para las ciudades europeas, y encontró que las SUHII calculados eran diferentes

Las diferentes definiciones de las regiones urbanas/rurales hacen que el estudio de intercomparación de la Intensidad de isla de calor urbano (UHII) entre diferentes ciudades sea un desafío. Por otra parte, las estaciones fijas o los píxeles solo representan el microclima local alrededor de estas estaciones o píxeles (Oke, 2006). La forma de las ciudades podría influir significativamente en la amplitud de la UHI (Zhang *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2017).

No obstante, varios estudios han demostrado que la composición y la configuración influyen en la LST en las ciudades, la influencia de estos dos factores en la propia SUHI fue raramente analizado. Cuatro estudios incluyeron la composición de la ciudad en su análisis (Imhoff *et al.* 2010; Zhang *et al.* 2010; Peng *et al.* 2012). Imhoff *et al.* (2010) investigaron la SUHI para ciudades en los Estados Unidos, usando la diferencia en la media LST en zonas de amortiguamiento con diferentes distancias, desde el núcleo urbano. Zhang *et al.* (2010) describieron la SUHI de 3000 asentamientos urbanos globales como diferencias LST del núcleo urbano y zonas rurales circundantes. Peng *et al.* (2012) realizó un análisis de 419 ciudades globales con respecto a las diferencias en LST entre núcleos urbanos y suburbios circundantes

Por ello el presente trabajo, comprende la estimación de la intensidad de isla de calor urbano superficial para las áreas metropolitanas de Huancayo y Arequipa para el periodo 2001 al 2016, utilizando los métodos de Streutker y cuantiles.

2 Materiales y Métodos

2.1 Sitio y Localización

El Área Metropolitana de Huancayo (AMH) y de Arequipa (AMA) están localizados en América

del Sur y al este del Océano Pacífico. Ambas ciudades se ubican en Perú, como se indica en la Figura 1A. En las últimas décadas, la población en la provincia de Huancayo refleja la evolución de la población a partir del año 1940. En el año 2007, la población censada de la provincia de Huancayo fue de 466 mil 346 habitantes. Asimismo, el incremento de la población medido por la tasa de crecimiento promedio anual, indica que la población de la provincia de Huancayo ha presentado un crecimiento promedio

anual para el periodo 1993–2007 de 0,5% (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2007). Según el Instituto Nacional de Estadísticas e Informática (INEI), Arequipa alberga a un total de 1.301.298 habitantes, cifra que equivale al 4,1% de la población total del país (PDRC Arequipa, 2016). Asimismo, solo cuenta con un 10% de población rural. (Sistema Nacional de Evaluación, Acreditación y Certificación de la Calidad Educativa, 2017). Asimismo, en la Figura 1B y 1C nos indica la topografía compleja del AMH y AMA oscilando las altitudes de 3500 a 5000 msnm y 2500 a 3500 msnm respectivamente; este rango de altitudes alrededor de 1000msnm se debe a la presencia de montañas, que influye en la formación de una superficie gaussiana, asimismo se observa la distribución horizontal urbana y rural de ambas ciudades. No obstante, las condiciones meteorológicas se ven afectadas por el crecimiento urbano y de la población, donde en el AMH la temperatura mínima puede variar entre -0.3 y 6.5°C, y las temperaturas máximas entre 18.5° y 20.8°C. Asimismo, la precipitación presenta sus valores mínimos en los meses de invierno (junio-agosto), siendo julio el mes más seco con solo 4.8 mm por mes, mientras que las máximas lluvias se dan en los meses de enero-marzo, siendo febrero el mes más lluvioso con 132.1 mm (Instituto Geofísico del Perú, 2012). Asimismo, el AMA su clima es variado; cálido en la costa con temperaturas entre 12°C a 29°C, con lloviznas menudas que fluctúan de 0 a 50 mm, el viento dominante es el alisio; en la sierra el clima es seco y varía según la altitud desde cálido templado hasta frío intenso, con una temperatura promedio de 14°C y con precipitaciones pluviales estacionarias que van de 100 a 700 mm al año, entre los meses de octubre a marzo, como lo describe el Banco Central de Reserva del Perú.

2.2 MODIS Data

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

En el presente estudio, se utilizó un promedio mensual de datos diarios del periodo 2001(1 enero) al 2016 (31 de diciembre) para el periodo diurno y nocturno 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.

Para la separación de 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 (Tabla 1). 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 observa en la Figura 2A y 2 B, la alta predominancia de pastizales y suelos estériles con arbustos abiertos en el AMH y AMA respectivamente.

Clase	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 Land Cover Type 1, International Geosphere Biosphere Programme (IGBP), esquema de clasificación global de vegetación

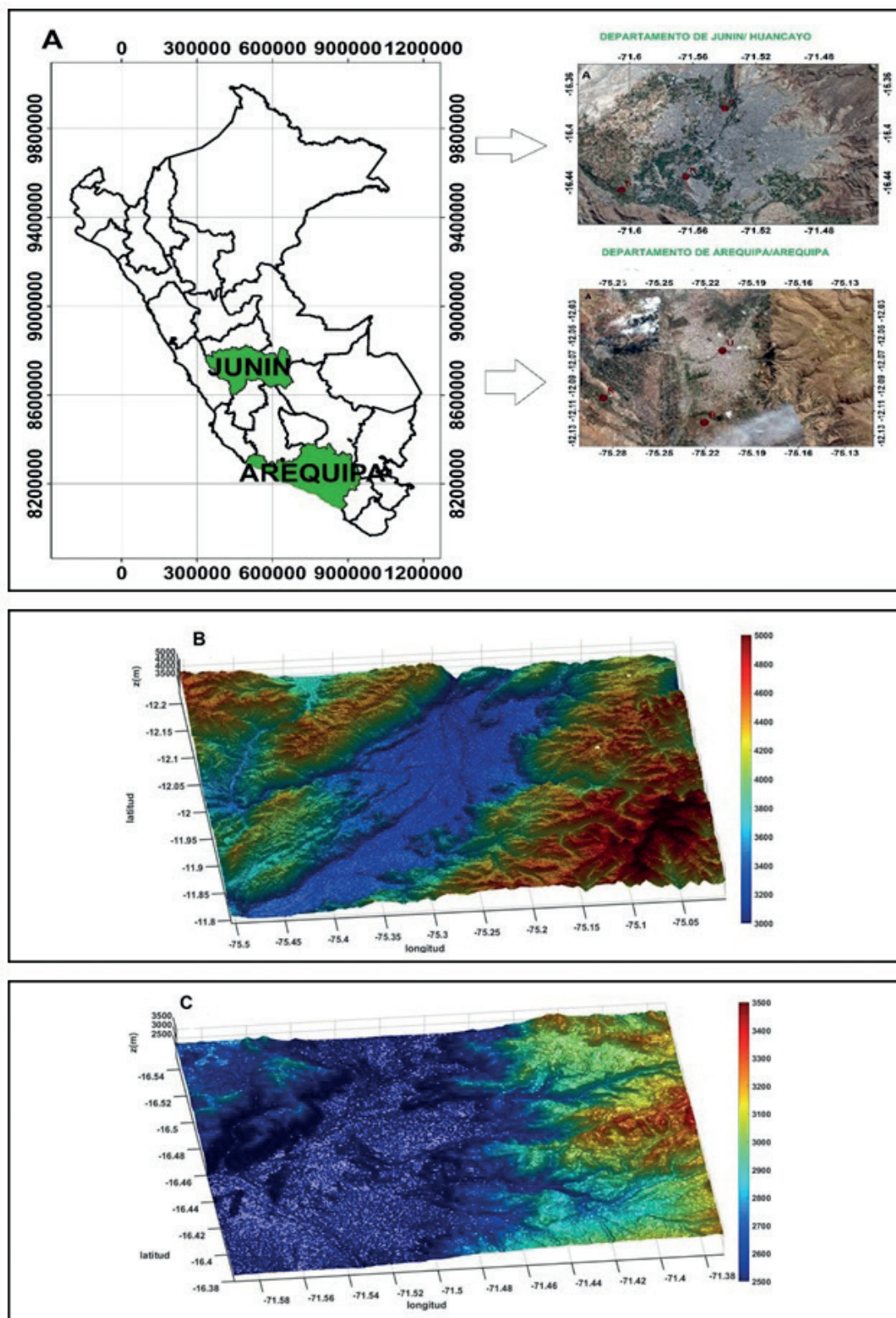


Figura 1 A. El dominio del AMH y localización rural (R) (12.102°S , y 75.286°W), Urbano (U) (12.06°S , 75.21°W) y frontera (B) (12.122°S , 75.22°W) y AMA con localización rural (R) (16.446°S , y 71.605°W), Urbano (U) (16.38°S , 71.54°W) y frontera (B) (16.437°S , 71.53°W), B. Topografía del AMH y C. AMA.

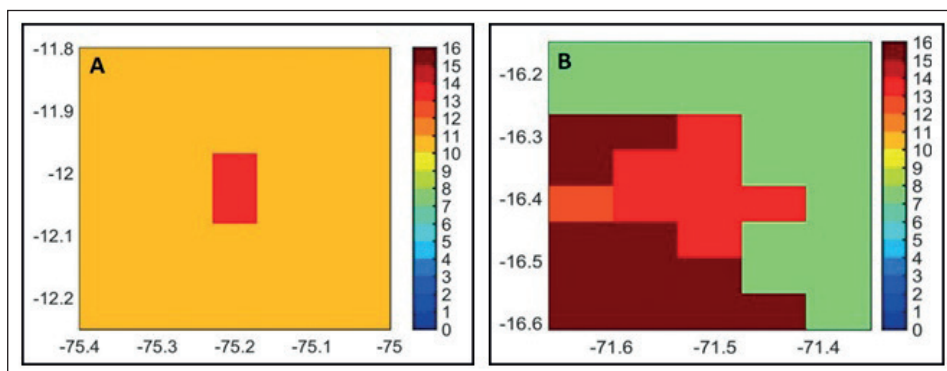


Figura 2 A. Tipo de cobertura de suelo de AMH y B. AMA para diciembre del 2006 acorde al IGBP.

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:

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

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. (Adaptado por Flores *et al.*, 2016). Asimismo, el método nos determina el área marcada o influenciada por la SUHI con su respectivo coeficiente de correlación de ajuste a una superficie gaussiana.

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:

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

Donde Q_5^{urbano} es el cuantil 0.95 de la distribución LST sobre el área urbana y Q_3^{rural} es la mediana de la distribución LST sobre el área rural, ambas con una resolución de 5 km. Asimismo empleando la metodología de clasificación vegetal del IGBP, obtenemos las Figuras 3A y 3C, los píxeles urbanos del AMH y AMA respectivamente; de igual forma en la Figura 3B y 3D, obtenemos los píxeles rurales del AMH y AMA respectivamente; para el cálculo del cuantil 0.95 y 0.5, de los píxeles urbanos y rurales respectivamente para la estimación de la SUHI para ambas áreas metropolitanas.

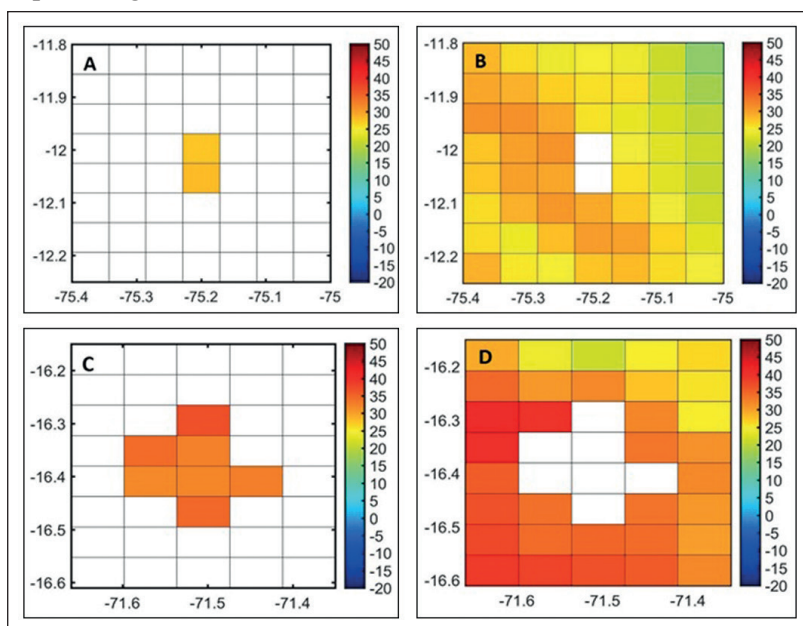


Figura 3 A. Media mensual diurna de LST bajo el área urbana y B. rural del AMH para octubre 2001. C. Media mensual diurna LST del área urbana y D. rural del AMA para enero 2001.

3 Resultados

3.1 Isla de Calor Urbana Superficial

Los resultados para las magnitudes de SUHI diurna a largo plazo (2001-2016) y las extensiones espaciales para todos los meses sobre el AMH y AMA usando el método de Streutker, se presentan en las Tablas 2 y 3 respectivamente. La SUHI para el AMH, el valor más alto para el periodo diurno ocurrió en marzo (7.28°C) y se observó la más baja en julio (3.10 °C). Asimismo, el área máxima de la huella de la SUHI se produjo en setiembre (928.4 km²) y mínimo en diciembre (48.39 km²). La Tabla 2 también muestra el coeficiente de correlación (R-cuadrado) del ajuste de Gauss, con valores alrededor de 0.25 para el mes de marzo. Asimismo, la SUHI para el AMA, el valor más alto para el periodo diurno ocurrió en febrero (3.69°C) y se observó la SUHI más baja en noviembre (0.64°C). El área máxima de la huella se produjo en setiembre (3061.3 km²) y mínimo en diciembre (64.1 km²). La Tabla 3 también muestra el coeficiente de correlación (R-cuadrado) del ajuste de Gauss, con valores alrededor de 0.16 para el mes de febrero. Estos valores bajos del coeficiente de correlación de Pearson para ambas áreas metropolitanas, ocurre debido a que no se ajusta a una superficie gaussiana, ya que están rodeados de montañas.

Con el fin de mostrar variaciones estacionales de la SUHI del AMH y AMA, la Figura 4 presenta la evolución del LST (día y noche) para 3 diferentes localizaciones: urbano, frontera y rural. Estos gráficos

Meses	T _{rural} (°C)	A ₀ (°C)	α_x^1 (km)	α_y^1 (km)	Área Marcada (km ²)	R ²
Enero	15.76	6.52	6.14	9.28	52.03	0.22
Febrero	14.19	6.43	7.13	8.68	61.92	0.23
Marzo	13.23	7.28	7.56	7.87	57.34	0.25
Abril	16.19	6.68	6.32	8.94	56.09	0.22
Mayo	19.21	5.48	6.72	19.37	125.18	0.18
Junio	20.41	4.59	5.71	17.83	116.76	0.15
Julio	21.73	3.10	5.81	20.14	88.85	0.14
Agosto	25.31	3.44	5.36	96.74	721.85	0.14
Setiembre	25.06	4.83	7.37	121.89	928.41	0.17
Octubre	23.87	6.17	3.91	36.81	172.46	0.20
Noviembre	23.85	6.31	7.31	19.21	136.86	0.17
Diciembre	18.68	6.41	5.83	9.22	48.39	0.20

Tabla 2 Media Diurna de la SUHI y extensión espacial con desviación estándar para el AMH usando el método desarrollado por Streutker (2002) del periodo 2001-2016. La tabla muestra: Temperatura media para área rural T₀ (°C), magnitud de la SUHI: A₀ (C), extensión longitudinal: α_x^1 (km), extensión latitudinal: α_y^1 (km), área marcada (km²) y R-Square del ajuste.

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 4A y 4C) muestra un bien marcado variación estacional para el AMH y AMA respectivamente, con amplitudes más altas en la ubicación central urbana y menor en zonas rurales. La LST del AMH máxima se observa en setiembre para el centro urbano (30°C), frontera (30°C) y rural (25°C). Los valores del promedio mínimo se observan en marzo para todas las ubicaciones, centro urbano (20°C), frontera (19°C) y rural (15°C). En el periodo de la noche, la evolución temporal de LST (Figura 4B) muestra una variación estacional con amplitudes similares para todas las ubicaciones, con valores máximos en mayo para central urbano (6°C), frontera (6°C) y rural (4°C). Los valores de promedio mínimo se observan en febrero para el centro urbano (2°C), frontera (1°C) y rural (1°C). La LST del AMA máxima se observa en noviembre para el centro urbano (39°C), frontera (37°C) y rural (35°C). Los valores del promedio mínimo se observan en julio para todas las ubicaciones, centro urbano (27°C), frontera (27°C) y rural (26°C). En el periodo de la noche, la evolución temporal de LST (Figura 4D) muestra una variación estacional con amplitudes similares para todas las ubicaciones, con valores máximos en abril para central urbano (10°C), frontera (9°C) y rural (7°C). Los valores de promedio mínimo se observan en febrero para el centro urbano (5°C), frontera (8°C) y rural (7°C).

Meses	T _{rural} (°C)	A ₀ (°C)	α_x^1 (km)	α_y^1 (km)	Área Marcada (km ²)	R ²
Enero	32.91	3.14	11.65	7.01	179.4	0.13
Febrero	28.51	3.69	29.90	8.91	284.7	0.16
Marzo	28.60	2.69	22.45	9.07	349.2	0.11
Abril	30.43	1.69	21.82	9.28	185.6	0.08
Mayo	29.23	1.06	8.57	4.80	117.3	0.04
Junio	27.13	1.02	4.09	5.22	300.2	0.05
Julio	26.89	1.51	26.06	8.08	224.8	0.06
Agosto	31.01	1.23	55.95	3.75	406.5	0.03
Setiembre	35.39	1.77	56.71	6.78	3061.3	0.04
Octubre	38.18	0.71	17.68	8.02	49.3	0.05
Noviembre	39.09	0.64	20.44	8.68	65.5	0.07
Diciembre	37.21	0.74	9.76	10.85	64.1	0.06

Tabla 3 Media Diurna de la SUHI y extensión espacial con desviación estándar para el AMA usando el método desarrollado por Streutker (2002) del periodo 2001-2016. La tabla muestra: Temperatura media para área rural T₀ (°C), magnitud de la SUHI: , extensión longitudinal: α_x^1 (km), extensión latitudinal: α_y^1 (km), área marcada (km²) y R-Square del ajuste.

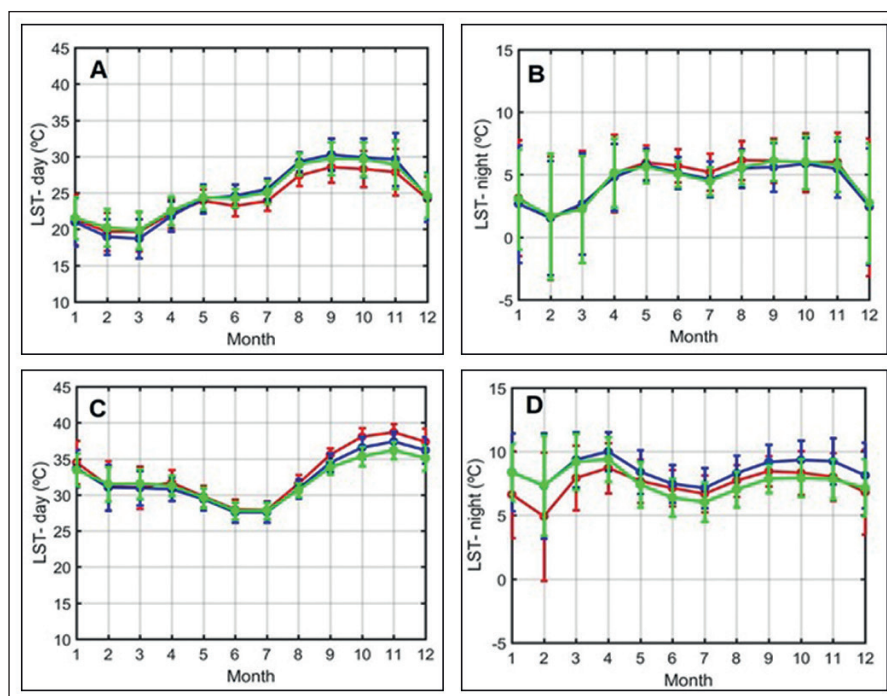


Figura 4 A. Tiempo de evolución del LST para periodo diurno y B. periodo nocturno del AMH, C. Evolución mensual del LST para el periodo diurno y D. periodo nocturno del AMA del centro urbano (líneas rojas), frontera (línea azul) y rural (línea verde).

3.2 Intensidad de la SUHI Diurno y Nocturno

La Figura 5 A, B muestra el diagrama de dispersión entre ambos métodos por todos los meses para el AMH y AMA respectivamente. Para el AMH (Figura 5A) la pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos es igual a 0.81, la intersección es igual a 1.15 y el índice de correlación es igual a 0.58. No obstante, para el AMA en la Figura N 5B, la pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos es igual a 0.60, la intersección es igual a -0.38 y el índice de correlación es igual a 0.20

Asimismo, en la Figura 6A para el periodo nocturno del AMH, la pendiente de la línea recta que

se ajusta a los datos es igual a 0.87, la intersección es igual a 0.87 y el índice de correlación es igual a 0.73. Asimismo, en la Figura 6B para el periodo nocturno del AMA, la pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos es igual a 0.12, la intersección es igual a 3.8 y el índice de correlación es igual a 0.02. Asimismo, los valores del coeficiente de correlación de ambos métodos son bajo para ambas áreas urbanas, debido que están rodeados de montañas y cuerpos de agua, en el cual no hay un buen ajuste gaussiano

A partir de estos se observa que la SUHI diurna (Figura 7) es mayor a la SUHI nocturna (Figura 8) para ambas áreas urbanas. En la Figura 7A, B nos indica que la SUHI diurna para el AMH y AMA es mayor en los meses de enero a marzo (estación de verano).

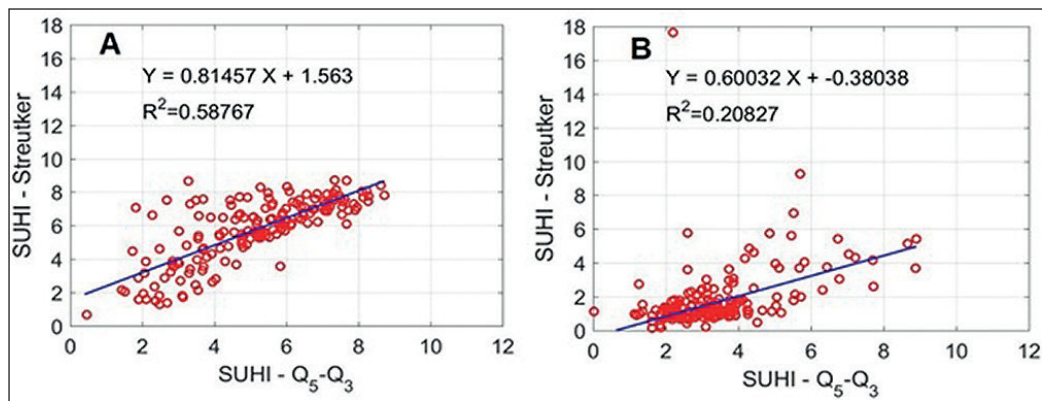


Figura 5 A. Scatterplot del SUHI en periodos diurno, obtenido con el método de Streutker's vs SUHI con la diferencia de cuantiles $Q_{5urban} - Q_{3rural}$ para el AMH, y B. AMA.

Figura 6 A. Scatterplot del SUHI en periodos nocturno, obtenido con el método de Streutker's vs SUHI con la diferencia de cuantiles

$Q_{5urban} - Q_{3rural}$ para el AMH y B. AMA.

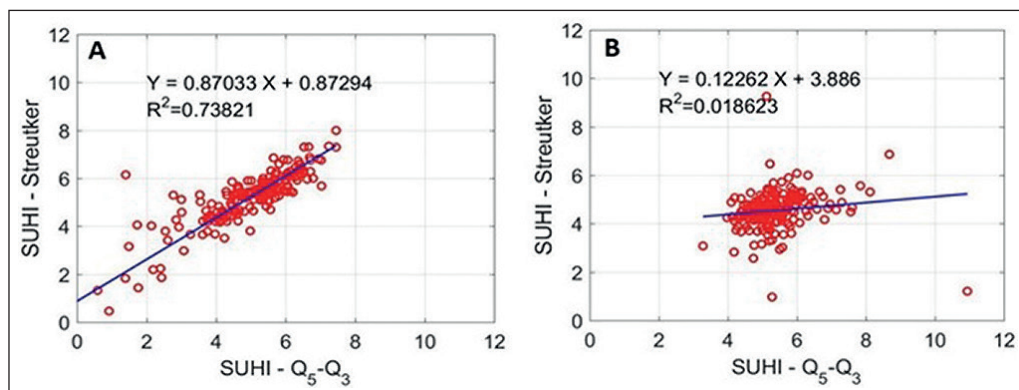
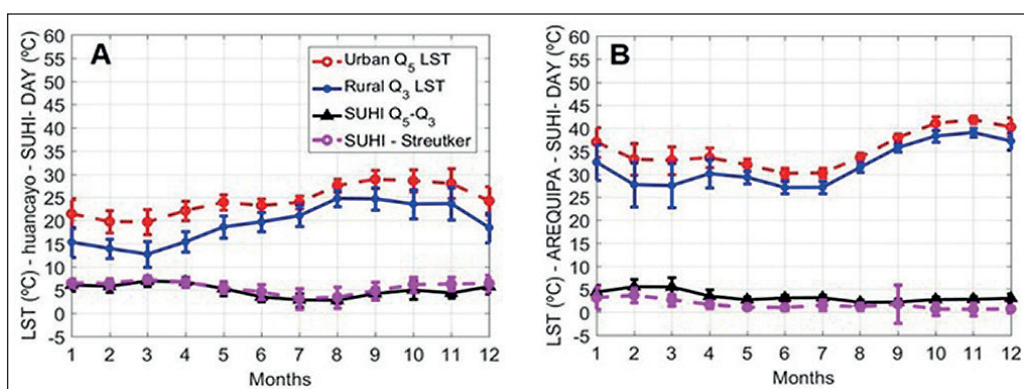


Figura 7 A. Evolución temporal de 2001-2016, media mensual diurno LST (°C) con desviación estándar para periodo diurno de LST urbano (Q5) rural LST (Q3), intensidad del SUHI (°C), para el AMH y B. AMA.



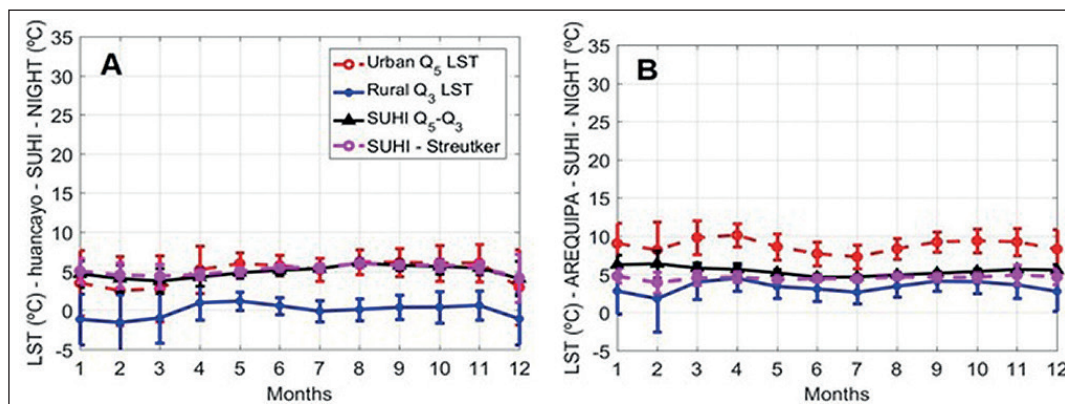
Asimismo, en el periodo nocturno como se indica en la Figura 8A, B nos indica que la SUHI nocturna para el AMH es mayor en los meses de enero a marzo (estación de verano) y para AMA es mayor en los meses de agosto a noviembre (estación de primavera).

Para el AMH, los resultados que utilizan el método estadístico de cuantiles en periodos diurnos son que se muestra en la Tabla 4. El valor más alto del cuantil (Q_5) para LST urbano se observó en setiembre (28.87°C) y el más bajo en marzo (19.67°C). El valor máximo de LST rural medio (Q_3) se ob-

servó en agosto (24.74°C) y mínimo en marzo (12.73°C). La SUHI diurna obtenido con la ecuación 2, muestra los valores máximos en marzo (6.94°C) y valores mínimos en agosto (2.79°C). Comparando los resultados de las SUHI usando ambos métodos (Tablas 2 y 4), se observa un alto nivel de acuerdo entre ellos.

Durante el periodo nocturno, la LST rural media cae significativamente para el cuantil 0.95 (Q_5) del área urbana y la mediana (Q_3) del área rural para el AMH (Figura 8A). Para el AMH, los

Figura 8 A. Evolución temporal de 2001-2016, media mensual nocturno LST (°C) con desviación estándar para periodo diurno de LST urbano (Q_5) rural LST (Q_3), intensidad del SUHI (°C) para el AMH y B. AMA.



resultados usando el método estadístico de cuantiles en los periodos nocturnos se muestra en la tabla 6. El valor más alto del cuantil (Q_5) para LST urbano se observó en agosto (6.18°C) y el más bajo en febrero (2.51°C). El valor máximo de mediana LST rural (Q_3), se observó en mayo (1.18°C) y el mínimo en febrero (-1.55°C). Las SUHI nocturnas obtenidas con el Ecuación 2, presente valores máximos en agosto (6.06°C) y valores mínimos en marzo (3.76°C). Se muestran en la Figura 7A en contraste con el caso diurno, se observa que la intensidad de SUHI nocturna es menor. Asimismo, para el AMA, los resultados que utilizan el método estadístico de cuantiles en periodos diurnos son que se muestra en la Tabla 5. El valor más alto del cuantil (Q_5) para LST urbano se observó en noviembre (41.87°C) y el más bajo en junio (30.20°C). El valor máximo de LST rural medio (Q_3) se observó en noviembre (39.06°C) y mínimo en junio (27.10°C). La SUHI diurnas obtenido con la ecuación 2, muestra los valores máximos en febrero (5.54°C) y valores mínimos en agosto (2.14°C). Comparando los resultados de las SUHI usando ambos métodos (Tablas 3 y 5), se observa un alto nivel de acuerdo entre ellos.

Durante el periodo nocturno, la LST rural media cae significativamente para el cuantil 0.95 (Q_5) del área urbana y la mediana (Q_3) del área rural para el AMA (Figura 8B). Para el AMA, los resultados usando el método estadístico de cuantiles en los periodos nocturnos se muestra en la Tabla 7. El valor más alto del cuantil (Q_5) para LST urbano se observó en abril (10.11°C) y el más bajo en febrero (8.18°C). El valor máximo de mediana LST rural (Q_3), se observó en abril (4.47°C) y el mínimo en febrero (1.80°C). Las SUHI nocturnas obtenidas con el Ecuación 2, presente valores máximos en febrero (6.38°C) y valores mínimos en junio (4.62°C).

Meses	URBANO		RURAL		SUHI
	Q_3	Q_5	Q_3	Q_5	
Enero	20.7	21.4	15.3	21.3	6.1
Febrero	19.1	19.7	13.9	19.4	5.8
Marzo	18.7	19.7	12.7	18.8	6.9
Abril	21.3	22.1	15.4	21.8	6.7
Mayo	23.3	23.9	18.6	24.6	5.3
Junio	22.9	23.2	19.7	25.2	3.5
Julio	23.7	23.9	21.0	26.5	2.8
Agosto	27.3	27.5	24.7	30.4	2.8
Setiembre	28.6	28.8	24.7	31.3	4.2
Octubre	28.2	28.6	23.5	30.5	5.0
Noviembre	27.5	27.9	23.6	30.0	4.4
Diciembre	23.6	24.2	18.5	24.8	5.7

Tabla 4 Promedio mensual diurno de LST ($^\circ\text{C}$) con su desviación estándar para áreas rurales y urbanas y la intensidad del SUHI ($^\circ\text{C}$) a 5 km de resolución para el AMA durante el periodo 2001 – 2016. La tabla muestra valores para la mediana Q_3 y cuantil 0.95 .

Meses	URBANO		RURAL		SUHI
	Q_3	Q_5	Q_3	Q_5	
Enero	34.4	36.9	32.6	39.3	4.4
Febrero	31.4	33.3	27.7	36.2	5.5
Marzo	31.4	33.0	27.5	36.0	5.5
Abril	31.8	33.6	30.1	36.5	3.5
Mayo	30.2	32.0	29.3	34.7	2.7
Junio	28.3	30.2	27.1	32.3	3.1
Julio	28.2	30.3	27.1	32.0	3.2
Agosto	31.8	33.6	31.5	36.0	2.1
Setiembre	35.7	37.9	35.7	40.5	2.2
Octubre	38.1	41.0	38.3	43.2	2.7
Noviembre	38.6	41.8	39.1	44.0	2.8
Diciembre	37.2	40.2	37.2	42.3	3.0

Tabla 5 Promedio mensual diurno de LST ($^\circ\text{C}$) con su desviación estándar para áreas rurales y urbanas y la intensidad del SUHI ($^\circ\text{C}$) a 5 km de resolución para el AMA durante el periodo 2001 – 2016. La tabla muestra valores para la mediana Q_3 y cuantil 0.95.

Meses	URBANO		RURAL		SUHI
	Q_3	Q_5	Q_3	Q_5	
Enero	7.0	9.1	2.8	8.6	6.2
Febrero	6.2	8.2	1.8	7.9	6.4
Marzo	8.2	9.8	3.9	9.4	5.8
Abril	8.9	10.1	4.5	10.0	5.6
Mayo	7.6	8.6	3.4	8.8	5.2
Junio	6.9	7.7	3.1	8.0	4.6
Julio	6.5	7.3	2.6	7.7	4.6
Agosto	7.5	8.4	3.4	8.6	4.9
Setiembre	8.2	9.2	4.1	9.5	5.1
Octubre	8.1	9.4	4.0	9.2	5.4
Noviembre	7.7	9.3	3.6	8.8	5.6
Diciembre	6.8	8.3	2.7	8.2	5.5

Tabla 6 Promedio mensual nocturno de LST ($^\circ\text{C}$) con su desviación estándar para áreas rurales y urbanas y la intensidad del SUHI ($^\circ\text{C}$) a 5 km de resolución para el AMA durante el periodo 2001 – 2016. La tabla muestra valores para la mediana Q_3 y cuantil 0.95.

Meses	URBANO		RURAL		SUHI
	Q_3	Q_5	Q_3	Q_5	
Enero	2.9	3.5	-1.2	2.9	4.6
Febrero	1.8	2.5	-1.6	2.4	4.1
Marzo	2.2	2.8	-0.9	2.8	3.7
Abril	4.8	5.2	0.9	4.8	4.2
Mayo	5.6	5.9	1.2	5.4	4.8
Junio	5.4	5.7	0.6	4.9	5.1
Julio	4.9	5.2	-0.1	4.4	5.3
Agosto	5.9	6.2	0.1	5.4	6.1
Setiembre	5.8	6.1	0.4	5.4	5.7
Octubre	5.6	6.0	0.4	5.4	5.6
Noviembre	5.6	6.1	0.6	5.5	5.4
Diciembre	2.3	2.9	-1.1	2.9	4.1

Tabla 7 Promedio mensual nocturno de LST ($^\circ\text{C}$) con su desviación estándar para áreas rurales y urbanas y la intensidad del SUHI ($^\circ\text{C}$) a 5 km de resolución para el AMA durante el periodo 2001 – 2016. La tabla muestra valores para la mediana Q_3 y cuantil 0.95 .

4 Conclusión

El objetivo principal de la presente contribución es estimar la SUHI durante el periodo (2001-2016) a una resolución (0.05°), se concluyó:

La intensidad de isla de calor urbano superficial, obtenido con el método de cuantiles en el AMH, muestra los valores máximos en marzo (6.94°C) y valores mínimos en agosto (2.79°C). y la SUHI nocturnas obtenidas presente valores máximos en agosto (6.06°C) y valores mínimos en marzo (3.76°C). Asimismo, la SUHI diurna en el AMA, muestra los valores máximos en febrero (5.54°C) y valores mínimos en agosto (2.14°C), y la SUHI nocturnas presenta valores máximos en febrero (6.38°C) y valores mínimos en junio (4.62°C).

En la comparación de la SUHI entre los métodos de Streutker y cuantiles, se indica que para los periodos diurnos para el AMH la pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos obtenidos con el método de Streutker y cuantiles es igual a 0.81, la intersección es igual a 1.15 y el índice de correlación es igual a 0.58 y para el periodo nocturno, la pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos es igual a 0.87, la intersección es igual a 0.87 y el índice de correlación es igual a 0.73. No obstante en el AMA, la pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos es igual a 0.60, la intersección es igual a -0.38 y el índice de correlación es igual a 0.20. Asimismo, para el periodo nocturno, la pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos es igual a 0.12, la intersección es igual a 3.8 y el índice de correlación es igual a 0.02. Dichos resultados indica un bajo coeficiente de correlación debido a que ambas áreas urbanas están rodeadas de montañas y cuerpos de agua, en el cual para el método de Streutker no hay un buen ajuste a una superficie gaussiana.

El método de cuantiles, para estos casos es fundamental, ya que para este método no es necesario que se ajuste a una superficie gaussiana, pero la desventaja del método es que no calcule el área marcada por la SUHI. Por ello el presente trabajo es importante para la utilización del método de cuantiles en distintas partes del planeta sin tener consideración de la topografía del área de estudio.

5 Agradecimientos

Los conjuntos de datos de la temperatura de la superficie de la Tierra se obtuvieron de la NASA desde su sitio web en: <http://modis.gsfc.nasa.gov/>.

6 Referencias

- Azevedo, J.A.; Chapman, L. & Muller, C.L. 2016. Quantifying the daytime and night-time urban heat island in Birmingham, UK: a comparison of satellite derived land surface temperature and high resolution air temperature observations. *Remote Sensing*, 8:153. <https://doi.org/10.3390/rs8020153>.
- Banco Central de Reserva del Perú. Caracterización del Departamento de Arequipa. <http://www.bcrp.gob.pe/docs/Sucursales/Arequipa/Arequipa-Characterizacion.pdf>
- Buyantuyev, A. & Wu, J.G. 2010. Urban heat islands and landscape heterogeneity: linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. *Landscape Ecology*, 25(1): 17–33
- Cadenasso, M.L.; Pickett, S.T. & Schwarz, K. 2007. Spatial heterogeneity in urban ecosystems: reconceptualizing land cover and a framework for classification. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(2): 80–88
- De Sherbinin, A.; Schiller, A. & Pulsipher, A. 2007. The vulnerability of global cities to climate hazards. *Environment and Urbanization*, 19: 39–64.
- 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.
- Du, H.; Wang, D.; Wang, Y.; Zhao, X.; Qin, F.; Jiang, H. & Cai, Y. 2016. Influences of land cover types, meteorological conditions, anthropogenic heat and urban area on surface urban heat island in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration. *Science of Total Environment*, 571: 461–470.
- Fang, J.Y.; Piao, S.L.; Field, C.B.; Pan, Y.D.; Guo, Q.H. & Zhou, L.M. 2003. Increasing net primary production in China from 1982 to 1999. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(6): 293–297.
- 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.
- González, J.E.; Luvall, J.C.; Rickman, D.; Comarazamy, D.; Picón, A. & Harmsen, E. 2005. Urban heat islands developing in coastal tropical cities. *EOS Transactions, AGU*, 86(42): 397–403.
- Instituto Geofísico del Perú. 2012. Eventos Meteorológicos extremos en el Valle del Mantaro. <http://www.met.igp.gob.pe/publicaciones/2012/maremexvol1.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. 2007. Perfil sociodemográfico de la provincia de Huancayo
- Imhoff, M. L.; Zhang, P.; Wolfe, R. E. & Bounoua, L. 2010. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing Environment*, 114(3): 504–513.
- Jago-on, K.A.; Kaneko, S.; Fujikura, R.; Fujiwara, A.; Imai, T. & Matsumoto, T. 2009. Urbanization and subsurface environmental issues: an attempt at DPSIR model application in Asian cities. *Science of the Total Environment*, 407(9): 3089–3104.
- Kim, Y.H. & Baik, J.J. 2005. Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, 44: 591–605
- 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.
- Liu, J.G. & Diamond, J. 2005. China's environment in a globalizing world. *Nature*, 435: 1179-1186.
- Oke, T.R. 2006. Instruments and observing methods: Report No. 81: initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. *World Meteorological Organization*. 1250.
- Peng, S.; Piao, S.; Ciais, P.; Friedlingstein, P.; Ottle, C.; Breon, F. & Myneni, R. 2012. Surface urban heat island across 419 global big cities. *Environmental Science & Technology*, 46(2): 696-703.
- Roth, M.; Oke, T.R. & Emery, W.J. 1989. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *Int. J. Remote Sensing*, 10(11): 1699-1720.
- Schneider, A.; Friedl, M.; McIver, D. & Woodcock, C. 2002. Mapping urban areas by fusing multiple sources of coarse resolution remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69: 1377-1386.
- Shao, M.; Tang, X.Y.; Zhang, Y.H. & Li, W.J. 2006. Environmental pollution of city clusters in China: current situation and challenges. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4(7): 353-361.
- 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. [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00095-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00095-5)
- Schwarz, N.; Lautenbach, S. & Seppelt, R. 2011. Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures. *Remote Sensing of Environment*, 115(12): 3175-3186.
- Sistema Nacional de Evaluación, acreditación y Certificación de la Calidad Educativa. 2017. Caracterización de la región Arequipa.
- 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. http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_indicators.htm
- Vereda, J. & Davis, C. 2007. A Case Study of Urban Heat islands in the Carolinas. *Environmental Hazards*, 7: 353-359.
- Yuan, F. 2008. Land-cover change and environmental impact analysis in the Greater Mankato area of Minnesota using remote sensing and GIS modeling. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4): 1169-1184.
- Zhang, P.; Imhoff, M. L.; Wolfe, R. E. & Bounoua, L. 2010. Characterizing urban heat islands of global settlements using MODIS and nighttime lights products. *Can. J. Remote Sensing*, 36(3): 185-196.
- Zhang, P.; Imhoff, M.L.; Bounoua, L. & Wolfe, R.E. 2012. Exploring the influence of impervious surface density and shape on urban heat islands in the northeast United States using MODIS and Landsat. *Can. J. Remote. Sensing*, 38 (4): 441-451
- Zhao, S.Q.; Da, L.J.; Tang, Z.Y.; Fang, H.J.; Song, K. & Fang, J.Y. 2006. Ecological consequences of rapid urban expansion: Shanghai, China. *Frontier in Ecology and Environment*, 4(7): 341-346.
- Zhou, L.; Dickinson, R.E.; Tian, Y.; Fang, J.; Li, Q. & Kaufmann, R.K. 2004. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. *PNAS*, 101: 9540-9544.
- Zhou, B.; Rybski, D. & Kropp, J.P. 2017. The role of city size and urban form in the surface urban heat island. *Scientific Reports*, 7: 4791.