

Superficial urban heat island and its energy consumption in the metropolitan areas of Santiago de Chile and Caracas-Venezuela

Julio Angeles Suazo, Maestro¹; Roberto Angeles Vasquez, Maestro²; Jose Flores Rojas, Doctor³; Carmencita Lavado-Meza, Doctora⁴; Nataly Angeles Suazo, Bachiller¹; Leonel De La Cruz-Cerrón, Maestro⁵ and Hugo Abi Karam, Doctor⁶

¹Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú, julio_as_1@hotmail.com, nati2643@hotmail.com

²Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú, roanvas@hotmail.com,

³Instituto Geofísico del Perú. Lima, Perú, jflores@igp.gob.pe

⁴Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa. La Merced, Perú, clavado@uniscjsa.edu.pe

⁵Universidad Continental. Huancayo, Perú, ldelaacruz@continental.edu.pe

⁶Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brazil, hugo@igeo.ufrj.br

Abstract– This contribution estimates the of Superficial Urban Heat Island Intensity (SUHI) during the period 2001 - 2016 for the Metropolitan Area of Caracas (AMC) and Santiago (AMS), located in Venezuela and Chile respectively. To quantify the SUHI, 2 methods were used: the Gaussian method (Streutker, 2002), and the quantile method (Flores, 2016). Both methods use data from remote sensing of monthly temperature surface (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 SUHI diurnal, obtained with the quantile method in the AMC, shows the maximum value in April (5,28°C) and minimum in August (4,04°C), and the SUHI nocturnal obtained present maximum value in April (2,56°C) and the minimum in December (1,91°C). However, the SUHI diurnal in the AMS, shows the maximum value in December (5,96°C) and minimum in June (1,38°C), and the SUHI at night present maximum value in October (2,90°C) and minimum in July (1,75°C).

Keywords-- heat island; Santiago; Caracas; temperature; quantile

Digital Object Identifier:

ISSN:

ISBN:

Isla de calor urbano superficial y su consumo de energía en las áreas metropolitanas de Santiago de Chile y Caracas- Venezuela

Julio Angeles Suazo, Maestro¹; Roberto Angeles Vasquez, Maestro²; Jose Flores Rojas, Doctor³; Carmencita Lavado-Meza, Doctora⁴; Nataly Angeles Suazo, Bachiller¹; Leonel De La Cruz-Cerrón, Maestro⁵ and Hugo Abi Karam, Doctor⁶

¹Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú, julio_as_1@hotmail.com, nati2643@hotmail.com

²Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú, roanvas@hotmail.com,

³Instituto geofísico del Perú. Lima, Perú, jflores@igp.gob.pe

⁴Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa. La Merced, Perú, clavado@uniscjsa.edu.pe

⁵Universidad Continental. Huancayo, Perú, ldelaacruz@continental.edu.pe

⁶Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brazil, hugo@igeo.ufrj.br

Resumen– La presente contribución estima la Intensidad de Isla de Calor Urbano Superficial (ICUS) durante el periodo 2001 – 2016 para el Área Metropolitana de Caracas (AMC) y Santiago (AMS), localizado en Venezuela y Chile respectivamente. Para cuantificar la ICUS, se usó 2 métodos: el método Gaussiano (Streutker, 2002), y método de cuantiles (Flores, 2016). Ambos métodos usan data de sensoramiento remoto de temperatura superficial (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. La ICUS diurno, obtenido con el método de cuantiles en el AMC, muestra el valor máximo en abril (5,28°C) y mínimo en agosto (4,04°C), y la ICUS nocturna obtenida presenta el valor máximo en abril (2,56°C) y mínimo en diciembre (1,91°C). No obstante, la ICUS diurna en el AMS, muestra el valor máximo en diciembre (5,96°C) y mínimo en junio (1,38°C), y la ICUS nocturna presenta el valor máximo en octubre (2,90°C) y mínimo en julio (1,75°C).

Palabras clave – isla de calor; Santiago; Caracas; temperatura; cuantiles

I. INTRODUCTION

La rápida urbanización ha acelerado en gran medida el desarrollo económico y social, las ciudades son motores del crecimiento económico y centros de innovación para la economía global [1], pero la urbanización también ha creado numerosos problemas ambientales desde la escala local a global [2], [3], incluida la mayor contaminación del aire, agua y la disminución del suministro de agua [4], alteración del clima local y mayor demanda de energía [5], instalaciones de vivienda, saneamiento insuficiente y congestión del tráfico [6], y una reducción importante en la producción de vegetación natural [7], [8].

Además de las tendencias del calentamiento global, las áreas urbanas experimentan un cambio local de efecto de ICU que resulta de la alta densidad de superficies impermeables, la modificación de la ventilación de aire de las estructuras

construidas, así como las emisiones de calor residual de fuentes residenciales e industriales [9].

La urbanización es uno de los aspectos más evidentes de la modificación antropica de los paisajes naturales y el clima. El fenómeno de la isla de calor urbano (ICU), es cuando las zonas urbanas experimentan una temperatura más alta que su entorno rural, un claro ejemplo es de las modificaciones climáticas causadas por la urbanización [10]. El aumento de las fracciones de la superficie impermeable en las ciudades, incluidos los edificios y la infraestructura, son las principales causas del efecto de la ICU, que afecta el uso de energía, el consumo de agua, la calidad del aire y la salud humana [11].

Una isla de calor urbana representa uno de los impactos más significativos de la urbanización y modificación antropogénica de los microclimas causada principalmente por un cambio en el uso de la tierra. Las áreas urbanas tienen un efecto localizado y significativo en condiciones atmosféricas e influyen en gran medida en la distribución y los flujos de calor en la capa límite planetaria [12], [13] creando el fenómeno de isla de calor urbano [9]. IPCC 2021 informó que el cambio climático inducido por el hombre ya ha estado afectando a muchas regiones del mundo con aumento de los eventos de olas de calor, fríos y sequías. Los calentamientos inducidos por el hombre se han intensificado localmente en las ciudades, y extremos cálidos más frecuentes con la creciente urbanización están conduciendo a la severidad de las olas de calor [14], [15].

Además, el agua y la energía exhiben conexiones directamente evidentes en entornos urbanos. Por ejemplo, la escorrentía de superficies impermeables, que es el tipo de cobertura terrestre predominante en las ciudades, contiene una mayor concentración de contaminantes y por lo tanto tiene una menor calidad del agua, lo que puede resultar en una mayor demanda de energía debido a requisitos más amplios para el tratamiento del agua. Otro ejemplo es la mayor demanda de energía para enfriamiento debido al aumento de las temperaturas en las zonas céntricas en comparación con el respectivo entorno rural, que se refiere como el efecto de ICUS, que supone una mayor demanda de agua oculta en la cantidad necesaria para la

generación de electricidad [16], [17]. Además, las temperaturas más altas conducen a una evapotranspiración acelerada y, a su vez, a un mayor uso de agua para riego, cuya adquisición y transporte también tienen una demanda de energía incorporada [18].

Se pueden emplear diferentes estrategias para mitigar los efectos de ICU para mejorar la ventilación natural interna de las ciudades a través del ajuste de la forma urbana y la reducción de la temperatura superficial de las superficies urbanas mediante el uso de materiales fríos [19], [20].

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

II. MATERIALES Y METODOS

Los materiales y métodos se presentan en tres subsecciones: en una se describe donde se hicieron las mediciones, en otra sección se describe el sensor que se utilizó y la última sección describe los métodos utilizados para la estimación de la ICUS.

A. Sitio y localización

El AMS, capital de Chile, localizado en América del Sur; está experimentando serios peligros climáticos y contaminación del aire debido a su ubicación rodeada por las cordilleras costeras y andinas de más de 2000 m de altitud (Figura 1), con capas de inversión térmica, causadas por el anticiclón subtropical del Pacífico Sur. Santiago de Chile (33° S, 70° O, 600 m s.n.m.) tiene un área urbana de 640 km² y una población de 6 millones y está situado en un valle de 20 km de ancho entre la cordillera de los Andes y la cordillera de la costa. Debido a condiciones desfavorable topográficas y meteorológicas para la dispersión y ventilación de contaminantes durante la estación seca (entre abril y agosto) [21]. La estación meteorológica más cercana al centro de la ciudad, registró 320 mm de precipitación, mientras que la estación meteorológica más alejada del centro de la ciudad ubicada en la dirección oeste, registró solo 263 mm de precipitación. En la estación meteorológica en el este, se midieron las tasas más altas de precipitación (340 mm). Estos patrones podrían verse influenciados por la ubicación específica de Santiago con las montañas de los Andes en el este, el mar en el oeste y las cordilleras costeras de norte a sur, dando como resultado grandes diferencias en la altitud y humedad [22].

Asimismo, el AMC ubicada en América del Norte (10° 20'-10° 35'N y 66° 45'-67° 0' W) con una topografía compleja.

Caracas, la capital de Venezuela, tiene una población de alrededor de 8 millones de personas. Las precipitaciones extremas pueden causar deslizamientos de tierra que a su vez pueden causar una destrucción considerable [23], [24].

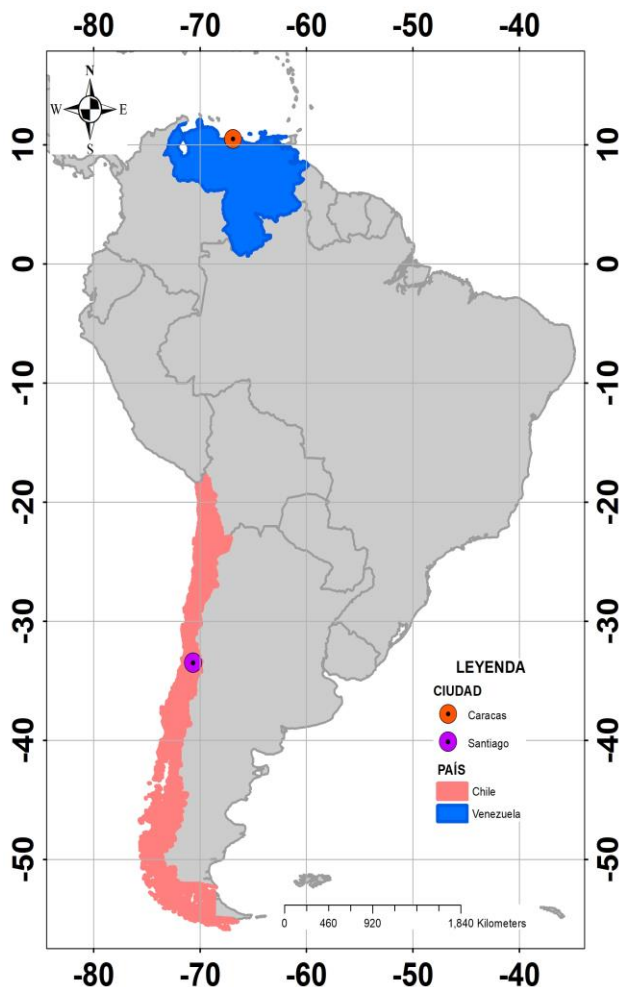


Fig. 1: Mapa de ubicación de la ciudad de Caracas y Santiago.

B. MODIS data

Se utilizó el sensor MODIS del Satélite AQUA y TERRA, donde se utilizó la Land Surface Temperature (LST) [25].

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.

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. El esquema de cobertura del suelo identifica 17 clases de cubierta terrestre definidas por el IGBP como lo indica [26]. Por ello en la Fig. 2 nos indica la predominancia de los píxeles urbanos en ambas áreas metropolitanas

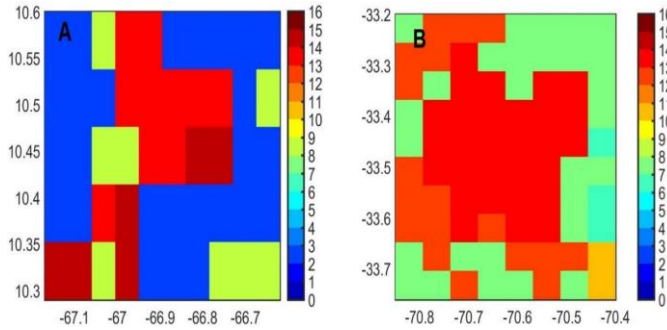


Fig. 2: A. Tipo de cobertura de suelo de AMC y B. AMS para diciembre del 2006 acorde al IGBP.

C. Estimación de la ICUS

Para determinar la ICUS se utilizó el Método Gaussiano [27], y el método de cuantiles [28], ambos métodos utilizaron en la estimación de isla de calor urbano superficial en las ciudades de Arequipa, Huancayo e Iquitos (e.g. [29], [30]).

Para determinar la ICUS se utilizó el Método de Streutker propuesta por Streutker (2002) [31].

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.

El método cuantil propuesto por Flores [28] para estimar la intensidad de la ICUS, donde se basa en el análisis estadístico de cuantiles de LST urbano y rural.

Asimismo, propuso la siguiente fórmula para estimar la intensidad ICUS 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.

III. RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados se presentan en dos subsecciones: en una se describe la estimación calculada de la ICUS por el método gaussiano y en otra sección se describe la ICUS por el método cuantil.

A. Isla de calor urbana superficial

Los resultados para las magnitudes de ICUS diurnas a largo plazo (2001-2016) y las extensiones espaciales para todos los meses sobre el AMS y AMC usando el método de Streutker, se presentan en la Tabla I y II. La ICUS para el AMS, el valor más alto para el periodo diurno utilizando el método de Streutker ocurrió en octubre (5,43°C) y se observó la más baja en julio (2,71 °C). El área máxima de la huella se produjo en enero (23817 km²) y mínimo en febrero (199 km²). Asimismo, la ICUS para el AMC en la tabla II, el valor más alto para el periodo diurno ocurrió en marzo (4,99°C) y la más baja en noviembre (2,25°C). El área máxima de la huella se produjo en febrero (149,33 km²) y mínimo en noviembre (3,23 km²).

TABLA I

MEDIA DIURNA Y NOCTURNA DE LA IICUS Y EXTENSIÓN ESPACIAL CON DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA EL AMS USANDO EL MÉTODO DESARROLLADO POR STREUTKER (2002) Y FLORES (2016) DEL PERIODO 2001-2016.

MES	Area de Huella
ENERO	23817±91485
FEBRERO	199±40
MARZO	9559±31038
ABRIL	5264±10872
MAYO	21612±47228
JUNIO	6590±8570
JULIO	21487±37931
AGOSTO	9703±16823
SETIEMBRE	1889±5028
OCTUBRE	12375±27580
NOVIEMBRE	3999±9975
DICIEMBRE	1504±4959

TABLA II

MEDIA DIURNA Y NOCTURNA DE LA IICUS Y EXTENSIÓN ESPACIAL CON DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA EL AMC USANDO EL MÉTODO DESARROLLADO POR STREUTKER (2002) Y FLORES (2016) DEL PERIODO 2001-2016.

MES	Area de Huella
ENERO	31,96±76.62
FEBRERO	149,33±368.96
MARZO	131,99±271.82
ABRIL	41,52±57.84
MAYO	14,33±76.82
JUNIO	70,39±309.82
JULIO	20,87±106.20
AGOSTO	-61,78±120.55
SETIEMBRE	-12,54±98.33
OCTUBRE	-20,29±83.53
NOVIEMBRE	3,23±100.38
DICIEMBRE	23,12±75.19

Con el fin de mostrar variaciones estacionales de la IICUS del AMS y AMC, la Figura 3 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 3A y 3C) muestra un bien marcado variación estacional para el AMC y AMS respectivamente, con amplitudes más altas en la ubicación central urbano y menor en zonas rurales. La LST del AMC máxima se observa en marzo para el centro urbano (31°C), frontera (27°C) y rural (24°C). Los valores del promedio mínimo se observan en diciembre para todas las ubicaciones, centro urbano (26°C), frontera (23°C) y rural (21°C). En el periodo de la noche, la evolución temporal de LST (Figura 3B) muestra una variación estacional con amplitudes similares para todas las ubicaciones, con valores máximos en setiembre para central urbano (20°C), frontera (18°C) y rural (17°C). Los valores de promedio mínimo se observan en enero para el centro urbano (18°C), frontera (16°C) y rural (15°C). La LST del AMS máxima se observa en enero para el centro urbano (40°C), frontera (37°C)

y rural (34°C). Los valores del promedio mínimo se observan en julio para todas las ubicaciones, centro urbano (13°C), frontera (12°C) y rural (11°C). En el periodo de la noche, la evolución temporal de LST (Figura 6D) muestra una variación estacional con amplitudes similares para todas las ubicaciones, con valores máximos en enero para central urbano (19°C), frontera (17°C) y rural (15°C). Los valores de promedio mínimo se observan en julio para el centro urbano (3°C), frontera (3°C) y rural (3°C).

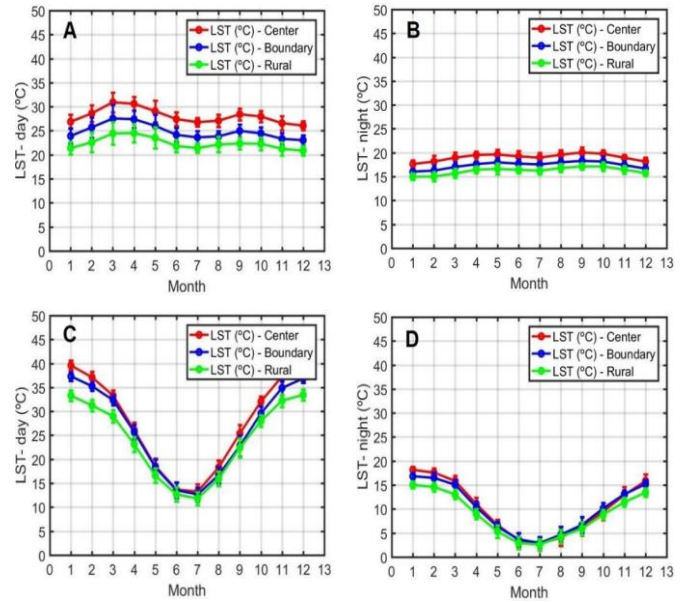


Fig. 3: A Variación temporal del LST para periodo diurno; B. periodo nocturno del AMC; C. Evolución mensual del LST para el periodo diurno y D. periodo nocturno del AMS del centro urbano (líneas rojas), frontera (línea azul) y rural (línea verde).

B. Intensidad de la ICUS diurno y nocturno

Para el AMS, los resultados que utilizan el método estadístico de cuantiles (Figura 4) en periodos diurnos muestra el valor máximo en diciembre (5,96°C) y mínimo en junio (1,38°C). La ICUS nocturna, presente valor máximo en octubre (2,90°C) y mínimo en julio (1,75°C).

Para el AMC, la ICUS diurna obtenido con el método de cuantiles, muestra valor máximo en abril (5,28°C) y mínimo en agosto (4,04°C). Durante el periodo nocturno, la ICUS nocturna, presente valor máximo en abril (2,56°C) y el mínimo en diciembre (1,91°C).

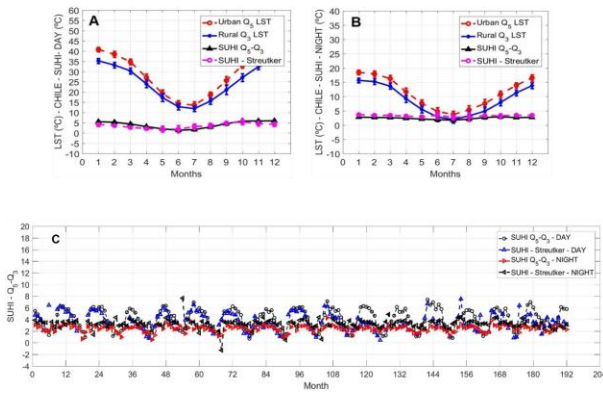


Fig. 4: A. Evolución temporal de 2001-2016, media mensual nocturno LST (°C) con desviación estándar para periodo diurno de LST urbano (Q5) rural LST (Q3), IICUS (°C); B. nocturno para el AMS

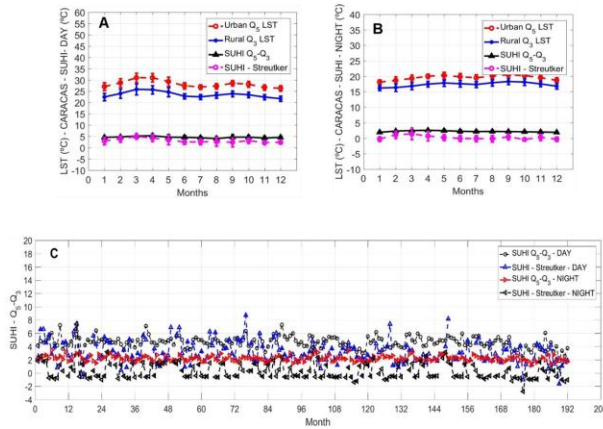


Fig. 5: A. Evolución temporal de 2001-2016, media mensual diurno LST (°C) con desviación estándar para periodo diurno de LST urbano (Q5) rural LST (Q3), IICUS (°C); B. nocturno para el AMC

C. Índice de vegetación

Asimismo, en la figura mostrar variaciones estacionales del NDVI y EVI del AMS y AMC, la Fig. 6 presenta la evolución 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 NDVI (Fig. 6A y 6C) muestra un bien marcado variación estacional para el AMC y AMS respectivamente, con valores altos en zona rural y menores en la zona urbana. El NDVI del AMC en área urbana, rural y de frontera alrededor de [0.3-0.5], [0.6-0.8] y [0.4-0.6] respectivamente; y el EVI en área urbana, rural y de frontera alrededor de [0.2-0.35], [0.4-0.5] y [0.2-0.4] respectivamente. Asimismo, para el AMS el NDVI en área urbana, rural y de frontera alrededor de [0.2-0.25], [0.5-0.6] y [0.3-0.5] respectivamente; y el EVI en área urbana, rural y de frontera alrededor de [0.1-0.15], [0.2-0.4] y [0.15-0.3] respectivamente.

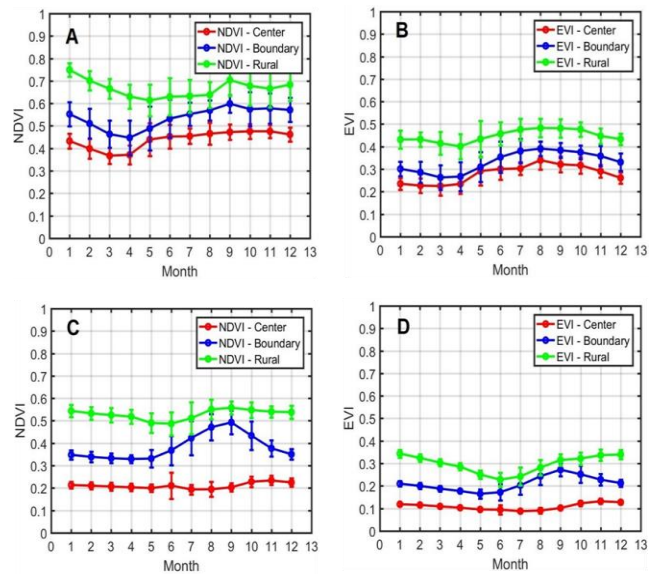


Fig. 6 A) Tiempo de evolución del NDVI; B. EVI del AMC; C. Evolución mensual del NDVI y D. EVI del AMS del centro urbano (líneas rojas), frontera (línea azul) y rural (línea verde).

El riesgo de la ICUS puede gestionarse introduciendo más cubierta vegetal en áreas de la ciudad para que los puntos críticos se puede convertir en lugares frescos. Otra medida que se puede tomar es que las ubicaciones que son concentrado con más población de ancianos, los niños y la población de mayor riesgo deben ser dado acceso a los servicios de emergencia. Además, estas áreas de riesgo destacadas debe acomodarse con un relieve accesible, servicios de emergencia y relativamente más plantación de árboles y vegetación [32]. Además, medidas como el ajuste de la estructura urbana, el aumento de la vegetación y el cambio de color de los edificios se usa para aliviar el efecto de isla de calor en áreas con altos valores caloríficos persistentes, y crear una zona de amortiguamiento fresca entre las personas y zonas de alta temperatura para ayudar a los residentes a hacer frente al efecto isla de calor [33], [34]. El estudio de ICUS a través de imágenes satelitales puede ser utilizado como herramienta de toma de decisiones para planificar y definir la política pública. En este contexto, la presencia de cobertura vegetal al interior de Santiago se sugiere como una importante medida de control para la isla de calor [35]. Las altas temperaturas dentro de las ciudades pueden afectar negativamente la economía. Se estima que el total de los costos del cambio climático, considerando ICUS, podrían ser más de 2,6 veces más para las ciudades que en el siglo anterior [36].

D. Consumo de energía

En la fig. 7 se muestra la variación temporal de consumo de energía para Chile y Venezuela. En el cual nos indica que hay una tendencia de crecimiento, donde es producto del

crecimiento urbano, poblacional y se puede comprobar conforme se da el incremento de la intensidad de isla de calor urbano. Asimismo se muestra que el consume energetico para ambos paises sobrepasa los 4000 KWh per capita.

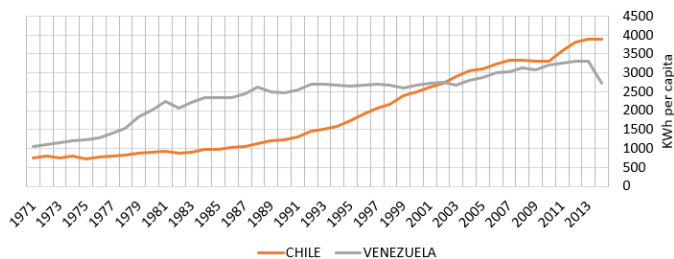


Fig. 7 Consumo de energía para Chile y Venezuela. Fuente: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.ELEC.KH.PC?locations=VE>

IV. CONCLUSIONES

La IICUS diurna en el AMS utilizando el método de cuantil presenta valor máximo en diciembre (5.96°C) y mínimo en junio (1.38°C). Asimismo, en el periodo nocturno, presenta valor máximo en octubre (2.90°C) y mínimo en julio (1.75°C). No obstante, en el AMC, la IICUS diurna obtenido con el método de cuantiles, indica valor máximo en abril (5.28°C) y mínimo en agosto (4.04°C) y en el periodo nocturno, la IICUS nocturna, presenta valor máximo en abril (2.56°C) y el mínimo en diciembre (1.91°C).

En la comparación de la ICUS entre los métodos de Streutker y cuantiles; el método de cuantiles, para estos casos es fundamental debido a que obvia las superficies homogéneas, y no es necesario que se ajuste a una superficie gaussiana, por lo que ambas áreas metropolitanas no cumplen con ello, debido a la frontera con cuerpo de agua y montañas como sucede en el AMC y AMS respectivamente.

No obstante señalar que si las calles con una mayor exposición al entorno verde pueden acomodar características morfológicas de espacios verdes más variadas al tiempo que garantizan que el efecto de enfriamiento continúa. Por lo tanto, sugerimos que el diseño del espacio verde de la calle urbana debería tratar de mejorar el nivel de vegetación alrededor de la calle y mejorar la estética apariencia de la vegetación de la calle basada en tener suficientes beneficios de enfriamiento y la regulación del microclima urbano [37].

Por lo tanto, este estudio recomienda que las ciudades en las regiones tropicales deben preparar los desarrollos urbanos para reducir los impactos de calor extremo en las regiones. Esto se debe a que la región exhibe islas de calor urbana superficial similares o peores en comparación con las regiones subtropicales, de latitud media y de latitud alta [38].

AGRADECIMIENTOS

Los conjuntos de datos de la temperatura superficial se obtuvieron de la NASA desde su sitio web en: <http://modis.gsfc.nasa.gov/>; como la data de consumo energético obtenidos del portal del Banco Mundial

REFERENCES

- [1] A. de Sherbinin, A. Schiller, and A. Pulsipher, "The vulnerability of global cities to climate hazards," *Environ. Urban.*, vol. 19, no. 1, 2007, doi: 10.1177/0956247807076725.
- [2] Y. H. Kim and J. J. Baik, "Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul," *J. Appl. Meteorol.*, vol. 44, no. 5, 2005, doi: 10.1175/JAM2226.1.
- [3] S. Zhao, L. Da, Z. Tang, H. Fang, K. Song, and J. Fang, "Ecological consequences of rapid urban expansion: Shanghai, China," *Front. Ecol. Environ.*, vol. 4, no. 7, 2006, doi: 10.1890/1540-9295(2006)004[0341:ECORUE]2.0.CO;2.
- [4] J. Liu and J. Diamond, "China's environment in a globalizing world," *Nature*, vol. 435, no. 7046, 2005, doi: 10.1038/4351179a.
- [5] L. Zhou *et al.*, "Evidence for a significant urbanization effect on climate in China," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 101, no. 26, 2004, doi: 10.1073/pnas.0400357101.
- [6] K. A. B. Jago-on *et al.*, "Urbanization and subsurface environmental issues: An attempt at DPSIR model application in Asian cities," *Sci. Total Environ.*, vol. 407, no. 9, 2009, doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.08.004.
- [7] J. Fang *et al.*, "Increasing net primary production in China from 1982 to 1999," *Front. Ecol. Environ.*, vol. 1, no. 6, 2003, doi: 10.1890/1540-9295(2003)001[0294:INPPIC]2.0.CO;2.
- [8] F. Yuan, "Land-cover change and environmental impact analysis in the Greater Mankato area of Minnesota using remote sensing and GIS modelling," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 29, no. 4, 2008, doi: 10.1080/01431160701294703.
- [9] T. Oke, "The energetic basis of the urban heat island," *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 108, no. 455, 1982, doi: 10.1256/smsqj.45501.
- [10] N. B. Grimm *et al.*, "Global change and the ecology of cities," *Science*, vol. 319, no. 5864, 2008, doi: 10.1126/science.1150195.
- [11] A. Brazel *et al.*, "Determinants of changes in the regional urban heat island in metropolitan Phoenix (Arizona, USA) between 1990 and 2004," *Clim. Res.*, vol. 33, no. 2, 2007, doi: 10.3354/cr033171.
- [12] A. J. Arnfield, "Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island," *Int. J. Climatol.*, vol. 23, no. 1, 2003, doi: 10.1002/joc.859.
- [13] V. Danchofski, R. Dimitrova, E. Vladimirov, E. Egova, and D. Ivanov, "Comparison of urban mixing layer height from ceilometer, radiosonde and WRF model," in *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2075, doi: 10.1063/1.5091263.
- [14] H. Zhang, F. Wang, S. Y. Zhao, and B. Xie, "Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity," *Clim. Chang. Res.*, vol. 17, no. 6, 2021, doi: 10.12006/j.issn.1673-1719.2021.191.
- [15] V. [Masson-Delmotte *et al.*, "IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis," 2021.
- [16] H. Akbari, "Energy Saving Potentials and Air Quality Benefits of Urban Heat Island Mitigation," *Sol. Energy*, 2005.
- [17] H. Silva and B. S. Fillpot, "Modeling nexus of urban heat island mitigation strategies with electricity/power usage and consumer costs: a case study for Phoenix, Arizona, USA," *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 131, no. 1-2, 2018, doi: 10.1007/s00704-016-1985-5.
- [18] P. Gober *et al.*, "Using watered landscapes to manipulate urban heat island effects: How much water will it take to cool phoenix?," *J. Am. Plan. Assoc.*, vol. 76, no. 1, 2010, doi: 10.1080/01944360903433113.

- [19] A. L. Pisello, G. Pignatta, V. L. Castaldo, and F. Cotana, "Experimental analysis of natural gravel covering as cool roofing and cool pavement," *Sustain.*, vol. 6, no. 8, 2014, doi: 10.3390/su6084706.
- [20] A. L. Pisello, V. L. Castaldo, G. Pignatta, F. Cotana, and M. Santamouris, "Experimental in-lab and in-field analysis of waterproof membranes for cool roof application and urban heat island mitigation," *Energy Build.*, vol. 114, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.05.026.
- [21] R. Toro A. M. Kvakčić, Z. B. Klaić, D. Koračin, R. G. E. Morales S, and M. A. Leiva G, "Exploring atmospheric stagnation during a severe particulate matter air pollution episode over complex terrain in Santiago, Chile," *Environ. Pollut.*, vol. 244, 2019, doi: 10.1016/j.envpol.2018.10.067.
- [22] M. T. K. Arroyo, F. A. Squeo, J. J. Armesto, and C. Villagran, "Effects of Aridity on Plant Diversity in the Northern Chilean Andes: Results of a Natural Experiment," *Ann. Missouri Bot. Gard.*, vol. 75, no. 1, 1988, doi: 10.2307/2399466.
- [23] B. Lyon, "Enhanced seasonal rainfall in Northern Venezuela and the extreme events of December 1999," *J. Clim.*, vol. 16, no. 13, 2003, doi: 10.1175/2772.1.
- [24] N. Tim and L. Bravo de Guenni, "Oceanic influence on the precipitation in Venezuela under current and future climate," *Clim. Dyn.*, vol. 47, no. 1–2, 2016, doi: 10.1007/s00382-015-2832-6.
- [25] B. Dousset and F. Gourmelon, "Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover," 2003, doi: 10.1016/S0924-2716(03)00016-9.
- [26] A. Schneider, M. A. Friedl, D. K. McIver, and C. E. Woodcock, "Mapping Urban Areas by Fusing Multiple Sources of Coarse Resolution Remotely Sensed Data," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 69, no. 12, 2003, doi: 10.14358/PERS.69.12.1377.
- [27] D. R. Streutker, "Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas," *Remote Sens. Environ.*, vol. 85, no. 3, 2003, doi: 10.1016/S0034-4257(03)00007-5.
- [28] J. L. Flores R., A. J. Pereira Filho, and H. A. Karam, "Estimation of long term low resolution surface urban heat island intensities for tropical cities using MODIS remote sensing data," *Urban Clim.*, 2016, doi: 10.1016/j.uclim.2016.04.002.
- [29] J. Angeles, R. Angeles, Rojas J. L. F., and H. Karam, "Estimación de Isla de Calor Urbana Superficial en el Area Metropolitana de Iquitos/Peru," *Anuário do Inst. Geociências - UFRJ*, vol. 42, no. 1, 2019.
- [30] J. M. A. Suazo, J. L. F. Rojas, H. A. Karam, G. R. A. Mallma, and R. J. A. Vasquez, "Isla de Calor Urbana Superficial en las Áreas Metropolitanas de Huancayo y Arequipa/Perú," *Anu. do Inst. Geociências*, vol. 42, no. 2, 2019.
- [31] D. R. Streutker, "A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas," *Int. J. Remote Sens.*, 2002, doi: 10.1080/01431160110115023.
- [32] P. Sidiqi, A. Huete, and R. Devadas, "Spatio-temporal mapping and monitoring of Urban Heat Island patterns over Sydney, Australia using MODIS and Landsat-8," 2016, doi: 10.1109/EORSA.2016.7552800.
- [33] Y. Dong *et al.*, "Decrease in the residents' accessibility of summer cooling services due to green space loss in Chinese cities," *Environ. Int.*, vol. 158, 2022, doi: 10.1016/j.envint.2021.107002.
- [34] Z. Ren, H. Zhao, Y. Fu, L. Xiao, and Y. Dong, "Effects of urban street trees on human thermal comfort and physiological indices: a case study in Changchun city, China," *J. For. Res.*, vol. 33, no. 3, 2022, doi: 10.1007/s11676-021-01361-5.
- [35] Z. Fábán, "Method of the Geographically Weighted Regression and an Example for its Application," *Reg. Stat.*, vol. 4, no. 1, 2014, doi: 10.15196/rs04105.
- [36] F. Estrada, W. J. W. Botzen, and R. S. J. Tol, "A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts," *Nat. Clim. Chang.*, vol. 7, no. 6, 2017, doi: 10.1038/nclimate3301.
- [37] Z. Liu *et al.*, "Nonlinear Cooling Effect of Street Green Space Morphology: Evidence from a Gradient Boosting Decision Tree and Explainable Machine Learning Approach," *Land*, vol. 11, no. 12, 2022, doi: 10.3390/land11122220.
- [38] G. F. Garuma, "Tropical surface urban heat islands in east Africa," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-31678-6.