



Análisis de la relación de la isla de calor urbano con factores demográficos, espaciales y ambientales de Lima metropolitana usando sensores remotos

Analysis of the relationship between urban heat island and demographic, spatial and environmental factors in Lima Metropolitan using remote sensing

Ernesto E. Menacho C.¹; Sandra N. Teruya R.¹

¹ Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Email: emenacho@lamolina.edu.pe

Recepción: 10/08/2017 ; Aceptación: 05/06/2019

Resumen

El objetivo de la presente investigación fue determinar la presencia de la Isla de Calor Urbano (ICU) usando sensores remotos y establecer su relación con factores demográficos, espaciales y ambientales en Lima metropolitana. Se obtuvieron imágenes satelitales Landsat 8 para determinar la temperatura de superficie del suelo. Se trabajó con la imagen satelital ASTER GDEM e información espacial (*shape file*) del Ministerio del Ambiente (Minam) para determinar la relación entre la Intensidad de ICU (IICU) y los factores de estudio. Se eligieron las imágenes satelitales que tenían menos interferencia (nubes), posteriormente se procesaron con los programas ENVI 5,1, QGIS 2,0, Minitab 17 y L-LDOPE y se obtuvo la temperatura de la superficie del suelo, usando los métodos *Single Channel* (SC) y *Split Window* (SW), y se determinó la correlación entre la IICU y los factores de estudio. Se identificaron islas de calor y de frío que variaron de intensidad y extensión; no todas fueron permanentes durante los cuatro (04) periodos evaluados. La elevación (m s. n. m.), la distancia a los cuerpos de agua (m), el Índice de edificación de diferencia normalizada (NDBI) y el uso de suelo tuvieron correlación estadística positiva ($p < 0,001$) con la IICU, mientras que el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) tuvo una correlación estadística negativa con la IICU ($p < 0,001$). No se encontró suficiente evidencia estadística para afirmar que hay una relación entre la concentración de NO, NO₂, SO₂, O₃ y PM₁₀ y la IICU para los periodos evaluados, dentro del área de estudio. Se identificaron islas de calor y de frío de extensión e intensidad variables. Se determinaron algunos factores que influyen sobre IICU.

Palabras clave: isla de calor urbano; Landsat 8; Lima metropolitana; sensoramiento remoto y *Single Channel*.

Forma de citar el artículo: Menacho, E.; Teruya, S. 2019. Análisis de la relación de la isla de calor urbano con factores demográficos, espaciales y ambientales de Lima metropolitana usando sensores remotos. *Anales Científicos* 80 (1): 60-75 (2019).

DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v80i1.926>

Autor de correspondencia: Menacho, E. Email: emenacho@lamolina.edu.pe

© Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Abstract

The objective of this research was to determine the presence of Urban Heat Island (UHI), using remote sensors, and establish its relationship with demographic, spatial and environmental factors in Metropolitan Lima. Landsat 8 satellite images were obtained to determine the soil surface temperature, it was also employed ASTER GDEM satellite image and Minam spatial information (shape file), to determine the relationship between the intensity of UHI (IUHI) and the factors of study. Satellite images with less interference (clouds) were chosen, subsequently the images were processed with ENVI 5,1, QGIS 2,0, Minitab 17 and L-LDOPE software to obtain land surface temperature using Single Channel (SC) and Split Window (SW) methods, also it was determined the correlation between the study factors and IUHI. Heat and cold islands with varying intensity and spread were identified and not all of them were permanent during the four (04) evaluated periods. Elevation (m.a.s.l.), distance to water bodies (m), normalized difference build-up index (NDBI) and land use had positive statistical correlation ($p < 0,001$) with the IUHI, while the Normalized difference vegetation index (NDVI) had a negative statistical correlation with IUHI ($p < 0,001$). There was no sufficient statistical evidence to affirm that there was a relationship between the concentration of NO, NO₂, SO₂, O₃ and PM₁₀ and IUHI, for the periods evaluated within the study area. Heat and cold islands with variable extension and intensity were identified. Some factors influencing IUHI were determined.

Keywords: Landsat 8; Lima metropolitana; remote sensing; Single Channel and urban heat island.

1. Introducción

Las Islas de calor urbano (ICU) es un fenómeno en donde la temperatura del aire y la superficie son más calientes que sus alrededores rurales. Según Rizwan *et al.* (2008) y la (EPA, 2009), la formación de la ICU ocurre de la siguiente manera. La energía generada y contenida en un área urbana proviene principalmente del sol y de fuentes antropogénicas (plantas generadoras de energía, automóviles y aires acondicionados). Esta última fuente calienta el aire ambiental directamente; mientras que la primera se divide en dos, una fracción que calienta el aire ambiental y otra que es absorbida por las estructuras urbanas que, posteriormente, también calentarán el aire ambiental. Durante el día, la energía solar y la antropogénica calientan el medio ambiente. La radiación solar cede energía a las estructuras como paredes, techos, jardines, parques y áreas pavimentadas, las que absorben y almacenan el calor de manera diferente. Luego, cuando el sol se va poniendo, el aire ambiental comienza a enfriarse, pero la energía conservada dentro de las estructuras es liberada a la atmósfera. Según EPA (2009), la transferencia de energía es afectada no solo por el tipo de materiales de las estructuras urbanas, sino también por otros factores como la presencia

de áreas verdes y la visibilidad del cielo. Las áreas verdes como parques y jardines afectan negativamente a la ICU debido a que enfrían el aire ambiental a través de la transpiración de la vegetación y porque tienen un mayor albedo que las estructuras urbanas, por tanto, absorben menor energía. Asimismo, la contaminación atmosférica afecta a la ICU ya que los aerosoles tienen una relación negativa con esta alteración térmica debido a que absorben y reflejan las ondas largas, generando un efecto enfriador conocido como oscurecimiento global; los gases de efecto invernadero, en cambio, contribuyen positivamente a la ICU al mantener un aire más caliente.

Por otro lado, la principal consecuencia de la isla de calor urbano es el aumento de la incomodidad en la población, debido a un incremento de la temperatura ambiental. Además, la ICU genera aumento en el consumo de energía debido a un incremento del uso de equipos de aire acondicionado. En consecuencia, produce mayor presión sobre las plantas de energía, lo cual incrementa la emisión de gases de efecto invernadero que producen y, por lo tanto, se genera la disminución de la calidad del aire. Además, la ICU también tiene impacto significativo en la salud humana exacerbando la presencia de enfermedades respiratorias (EPA, 2009).

El objetivo de esta investigación fue determinar la presencia de la isla de calor urbano en Lima metropolitana, usando sensores remotos, y establecer su relación con factores demográficos, espaciales y ambientales. Para lograrlo se buscó: (i) determinar la intensidad de la isla de calor urbano en el área de estudio usando imágenes del satélite Landsat 8, (ii) establecer relaciones entre la intensidad de la isla de calor urbano con la elevación, distancia a cuerpos de agua, densidad poblacional, índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de edificación de diferencia normalizada (NDBI) y uso del suelo, (iii) establecer relaciones entre la intensidad de la isla de calor urbano y los contaminantes atmosféricos NO , NO_2 , SO_2 , O_3 y PM_{10} .

2. Materiales y métodos

Área de estudio

Se definió como área de estudio, en función al límite de Lima metropolitana, los límites

distritales y la extensión de la imagen satelital Landsat que se usaron (Figura 1). De esta manera, se obtuvo un área que incluye todos los distritos de la ciudad, con exclusión de algunos del extremo sur (desde el distrito de Ancón hasta Lurín).

Datos espaciales

Para esta investigación se descargaron imágenes satelitales Landsat ETM+ 8 adquiridas en los veranos, desde el 1/12/2013 hasta el 30/4/2015. Se eligió trabajar con las imágenes tomadas en verano porque es en esta época en la que hay la menor cantidad de nubes en el cielo de Lima, de manera que es posible captar imágenes satelitales con menor distorsión. Las imágenes utilizadas se muestran en la Tabla 1.

También se descargaron las imágenes satelitales de elevación ASTER GDEM para la extensión del área de estudio, así como los límites distritales, provinciales y los cuerpos de agua proporcionadas por el Minam.

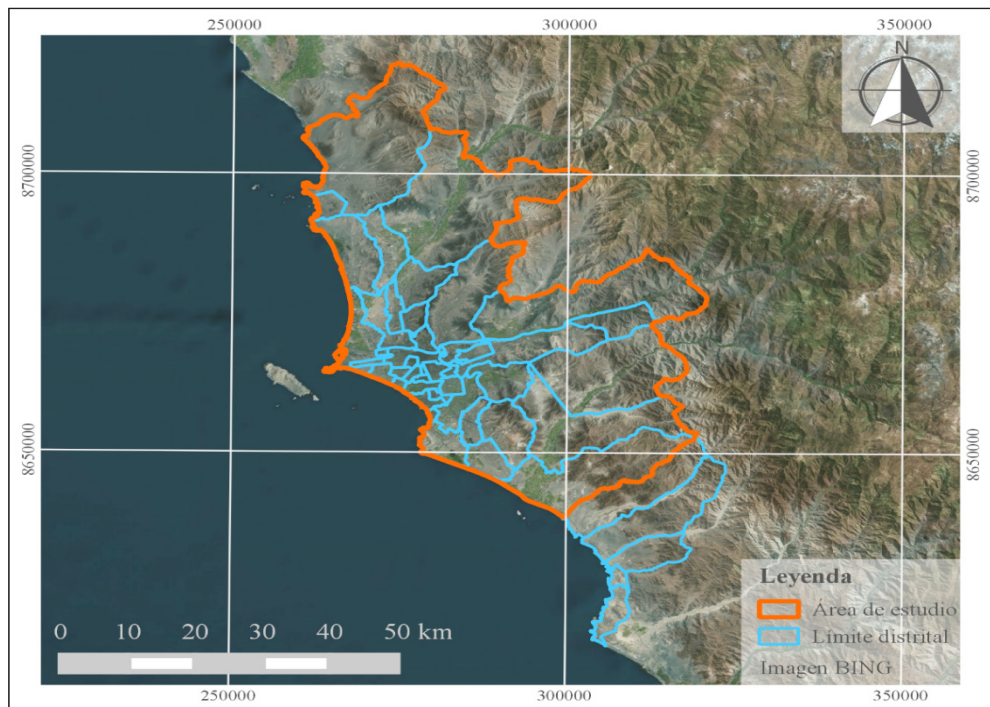


Figura 1: Área de estudio

Datos meteorológicos y de calidad del aire

Se solicitó al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi) los siguientes datos: temperatura del aire y del suelo de las estaciones meteorológicas automáticas y contaminantes atmosféricos de las estaciones de calidad del aire del Senamhi tomados los días de la adquisición de las imágenes (Tabla 1).

Determinación de la temperatura de la superficie del suelo

Para obtener la temperatura de la superficie del suelo se utilizó el método *Single Channel* (SC), el cual fue calculado a partir de la banda TIRS-1 del Landsat 8, usando el módulo *Band Math* de ENVI 5.1.

Tabla 1: Imágenes satelitales Landsat ETM+ 8 usadas en la investigación

Imagen	Fecha de adquisición	Hora de vuelo (GMT)	Hora de vuelo (hora Perú)
LC80070682013359LGN00	25 de Diciembre de 2013	15:12:24	10:12:24
LC80070682014042LGN00	11 de Febrero de 2014	15:11:50	10:11:50
LC80070682014106LGN00	16 de Abril de 2014	15:10:53	10:10:53
LC80070682015029LGN00	29 de Enero de 2015	15:10:54	10:10:54

Programas informáticos

Los programas informáticos utilizados fueron ENVI 5.1, QGIS 2.10, Minitab 17 y L-LDOPE.

Determinación de la isla de calor urbano

La intensidad de la isla de calor urbano fue obtenida a partir de valores de temperatura de superficie, los cuales fueron determinados utilizando las imágenes satelitales Landsat 8 de los sensores OLI y TIRS, usando las ecuaciones del método *Single Channel* (SC).

Pre-procesamiento de la información satelital

Las imágenes Landsat 8, distribuidas por la NASA y la USGS, son geoméricamente corregidas y georreferenciadas a *Universal Transversal de Mercator* (UTM) para la zona correspondiente el datum WGS1984 (USGS, 2015). Por lo tanto, no fue necesaria la corrección geométrica, pero sí la radiométrica y atmosférica.

Además, se le aplicó una máscara de nubes obtenida de la banda de calidad (*quality assessment* - QA), usando el *software* L-LDOPE, para evitar la perturbación que podrían generar las nubes.

Single Channel (SC)

Jiménez-Muñoz *et al.* (2009) propusieron al algoritmo SC que puede ser aplicado para calcular la temperatura de superficie del suelo (T_s) a partir de data infrarroja termal:

$$T_s = \gamma \{1/\epsilon [\psi_1 L_{\text{Sensor}} + \psi_2] + \psi_3\} + \delta$$

donde ϵ es la emisividad de la superficie, L_{Sensor} es la radiancia en el L_{Sensor} y γ, δ :

$$\gamma \approx (T_{\text{Sensor}}^2) / (b\gamma L_{\text{Sensor}}); \delta \approx T_{\text{Sensor}} - (T_{\text{Sensor}}^2) / b\gamma$$

donde T_{Sensor} es la temperatura de brillo en el sensor; $b\gamma = c_2/\lambda$ (1324 para TIRS-1); y ψ_1, ψ_2, ψ_3 son funciones atmosféricas:

$$\psi_1 = 1/\tau; \psi_2 = -L_d - Lu/\tau; \psi_3 = L_d$$

Si no se tienen los valores de los parámetros atmosféricos τ, L_u y L_d , los valores de ψ_1, ψ_2 y ψ_3 se pueden obtener a partir de

un arreglo polinómico de segundo orden que depende de la humedad atmosférica w .

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w^2 \\ w \\ 1 \end{bmatrix}$$

donde los coeficientes c_{ij} son determinados por una simulación.

Jiménez-Muñoz *et al.* (2014) señalan que este algoritmo, SC, puede ser aplicado para cualquiera de las dos bandas TIRS. Sin embargo, es recomendable utilizar solo la banda TIRS-1 (banda 10) porque está ubicada en una región de menor absorción atmosférica por lo que tendrá menor interferencia producida por el vapor de agua atmosférico. Ellos presentan los valores para los coeficientes c_{ij} para la banda TIRS-1:

$$C = \begin{bmatrix} 0,04019 & 0,02916 & 1,01523 \\ -0,38333 & -1,50294 & 0,20324 \\ 0,00918 & 1,36072 & -0,27514 \end{bmatrix}$$

Determinación de la emisividad de la superficie del suelo con NDVI

Sobrino *et al.* (2004) y Skoković *et al.* (2014) proponen la metodología para determinar la emisividad a partir del NDVI usando bandas del Landsat 8:

- NDVI < 0,2: Aquí los píxeles son considerados suelo desnudo y su emisividad es obtenida a partir de los valores de reflectividad de la banda roja (r_{OLI-B4}).

$$\begin{aligned} \varepsilon_{TIRS-1} &= 0,979 - 0,046 r_{OLI-B4} \\ \varepsilon_{TIRS-2} &= 0,982 - 0,027 r_{OLI-B4} \end{aligned}$$

- NDVI > 0,5: Los píxeles son considerados completamente vegetados y por lo tanto se asume un valor constante de emisividad 0,99.
- $0,2 \leq NDVI \leq 0,5$: En este caso, los píxeles son considerados una mezcla de suelo desnudo y vegetación y la emisividad es calculada de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{TIRS-1} = 0,971(1-Pv) + 0,987 * Pv$$

$$\varepsilon_{TIRS-2} = 0,977(1-Pv) + 0,989 * Pv$$

Además Pv es Proporción de vegetación:

$$Pv = \left[\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right]^2$$

donde $NDVI_s$ y $NDVI_v$ son los valores de NDVI del suelo y la vegetación, 0,2 y 0,5.

Determinación del vapor de agua atmosférico

Otro parámetro que es necesario para la aplicación del método SC es el vapor de agua atmosférico, w (g/cm^2). El vapor de agua atmosférico o vapor de agua precipitable es una medida del total de agua gaseosa contenida en una columna vertical de la atmósfera (*Remote Sensing Systems*, s.f.).

El vapor de agua atmosférico puede ser calculado de la siguiente ecuación propuesta por Xiaolei *et al.* (2014):

$$e_w^* = (1,0007 + 3,46 * 10^{-6} P) \times (6,1121) \times (e)^{(17,502 / (T/240,97 + T))}$$

donde e_w^* es la presión de vapor de agua (HPa), T es la temperatura del aire ($^{\circ}C$) y P es la presión atmosférica (HPa). Además:

$$w = e_w^* \times HR$$

donde w es el vapor de agua atmosférico (g/cm^2) y HR es la humedad relativa.

Determinación de la intensidad de la isla de calor urbano

Una vez que se tuvieron los *rasters* de la temperatura de superficie del suelo se prosiguió a determinar los límites de la zona urbana y rural del área de estudio. Posteriormente, se obtuvieron los valores de intensidad de la isla de calor urbano dentro del área de estudio. Según Rizwan *et al.*, 2008; Oke, 1987; Magge *et al.*, 1999 y Oke, 1976, la IICU se halla usando:

$$IICU = T_u - T_r$$

donde $IICU$ es intensidad de la isla de calor urbano, T_u es la temperatura en la zona

urbana y T_r es la temperatura en la zona rural.

Evaluación

La evaluación de la relación entre la intensidad de la isla de calor urbano y la elevación, la distancia a cuerpos de agua, la densidad poblacional, el **índice de vegetación (NDVI)**, el **índice de edificación (NDBI)** y el uso del suelo, se realizó como sigue:

Determinación de los parámetros: elevación, distancia a cuerpos de agua, densidad poblacional, índice de vegetación (NDVI), índice de edificación (NDBI) y uso del suelo.

La densidad poblacional fue representada a nivel distrital en formato *shape file*, a partir de la información recolectada por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2014). Para la segunda variable se generó un archivo *raster* en el que los valores de los *píxeles* son la distancia entre ese punto y el cuerpo de agua más cercano, ya sea un río o el mar.

Para determinar la variable uso de suelo se generó un *raster*. Este se obtuvo a través del método de clasificación supervisada usando la herramienta *ROI Tool* de *ENVI 5.1*. Se definieron seis (06) áreas de entrenamiento:

- Mar
- Nubes
- Zona de cultivos
- Zona de parques
- Zona de suelo desnudo o inerte
- Zona edificada o áreas con alta concentración de edificaciones

Además, la elevación del área de estudio se obtuvo del *raster* ASTER GDEM.

Se determinó la relación entre los valores de los *rasters* de intensidad de la ICU y los *rasters* de los parámetros arriba señalados utilizando *Minitab 17*. De esta manera se determinó el análisis de correlación espacial entre la intensidad de la ICU y las variables elevación, distancia a cuerpos de agua, densidad poblacional, NDVI, NDBI y uso del suelo con el objetivo de conocer si hay una relación entre ellos y en qué grado (para una muestra de 4000 puntos aleatorios o 0,0074 % aprox.). Antes de determinar las relaciones estadísticas, se recategorizó

el mapa de uso de suelos utilizando los siguientes valores:

- 1: Zona de cultivos
- 2: Zona de parques
- 3: Zona de suelo desnudo inerte
- 4: Zona edificada o áreas con alta concentración de edificaciones

Establecer relaciones de la intensidad de la isla de calor urbano y los contaminantes atmosféricos NO, NO₂, SO₂, O₃ y PM10.

Con el programa *Minitab17* se compararon los valores puntuales de concentración de NO, NO₂, SO₂, O₃ y PM₁₀ con los valores de intensidad de isla de calor urbano para cada estación de calidad atmosférica en las fechas y ubicaciones reportadas.

3. Resultados y discusión

Determinación de intensidad de isla de calor urbano

Se identificaron cualitativamente islas de calor y de frío en los cuatro (04) mapas de temperatura obtenidos. Estas islas fueron organizadas en diez (10) zonas de evaluación donde se agrupa zonas de interés a evaluar con detalle.

En la Zona A (norte de Lima metropolitana), Zona D (oeste de la Av. Argentina), Zona E (centro histórico de Lima y la zona industrial de Santa Anita), Zona H (Zona sur de Lima metropolitana, alrededor de la zona industrial de Lurín) y Zona I (Base Aérea Las Palmas) se observaron islas de calor discontinuas durante los cuatro (04) periodos evaluados, evidenciándose su extensión e intensidad variable. Sin embargo, en la Zona B (Panamericana Norte) se presentaron islas de calor en tres (03) de las cuatro (04) fechas evaluadas. Paralelamente, en la Zona F (alrededor de la zona este del río Rimac), Zona G (Zona oeste de la ciudad en los distritos de San Isidro, San Miguel, Magdalena, Barranco, Miraflores, Surquillo, Santiago de Surco y San Borja) y Zona J (Los Pantanos de Villa) hubo evidencia de islas de frío de extensión e intensidad variable, durante las cuatro (04) fechas evaluadas.

En la [Tabla 2](#), se presentan las posibles causas que habrían generado dichas islas de frío o calor en el área estudiada.

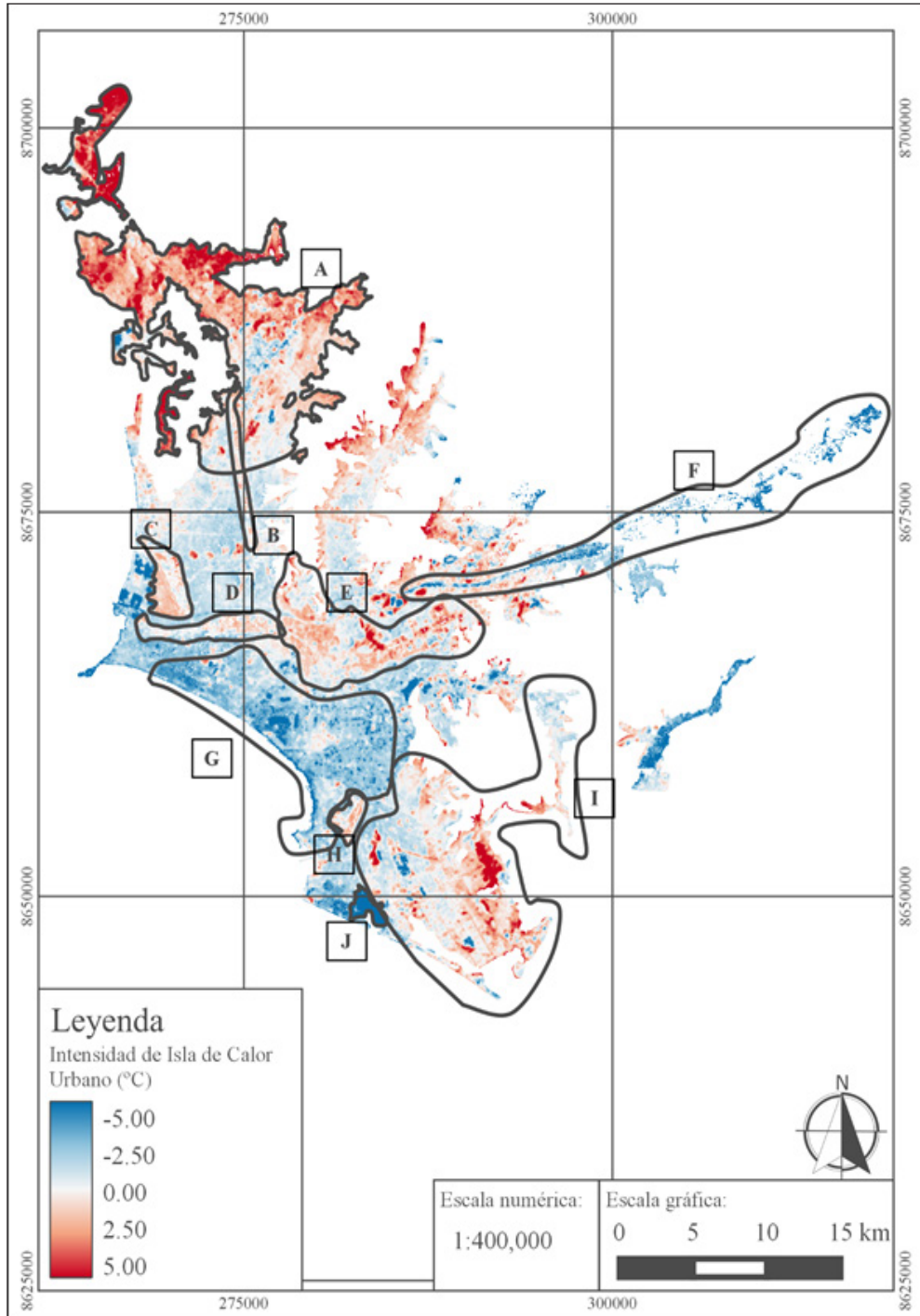


Figura 2: Intensidad de isla de calor urbano detectada el 25 de diciembre de 2013 en el área de estudio y en las diez (10) zonas de evaluación

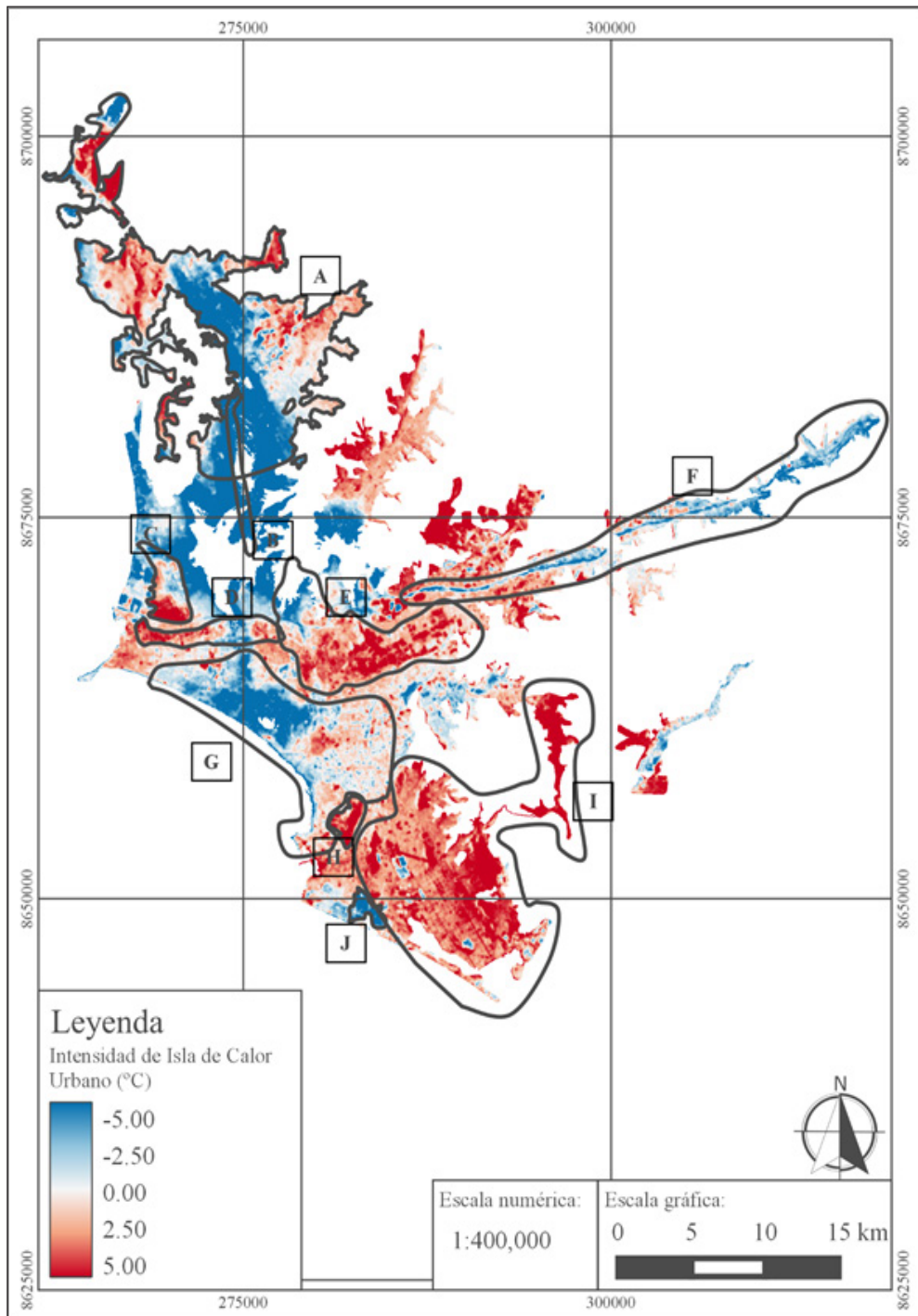


Figura 3: Intensidad de isla de calor urbano detectada el 11 de febrero de 2014 en el área de estudio y en las diez (10) zonas de evaluación

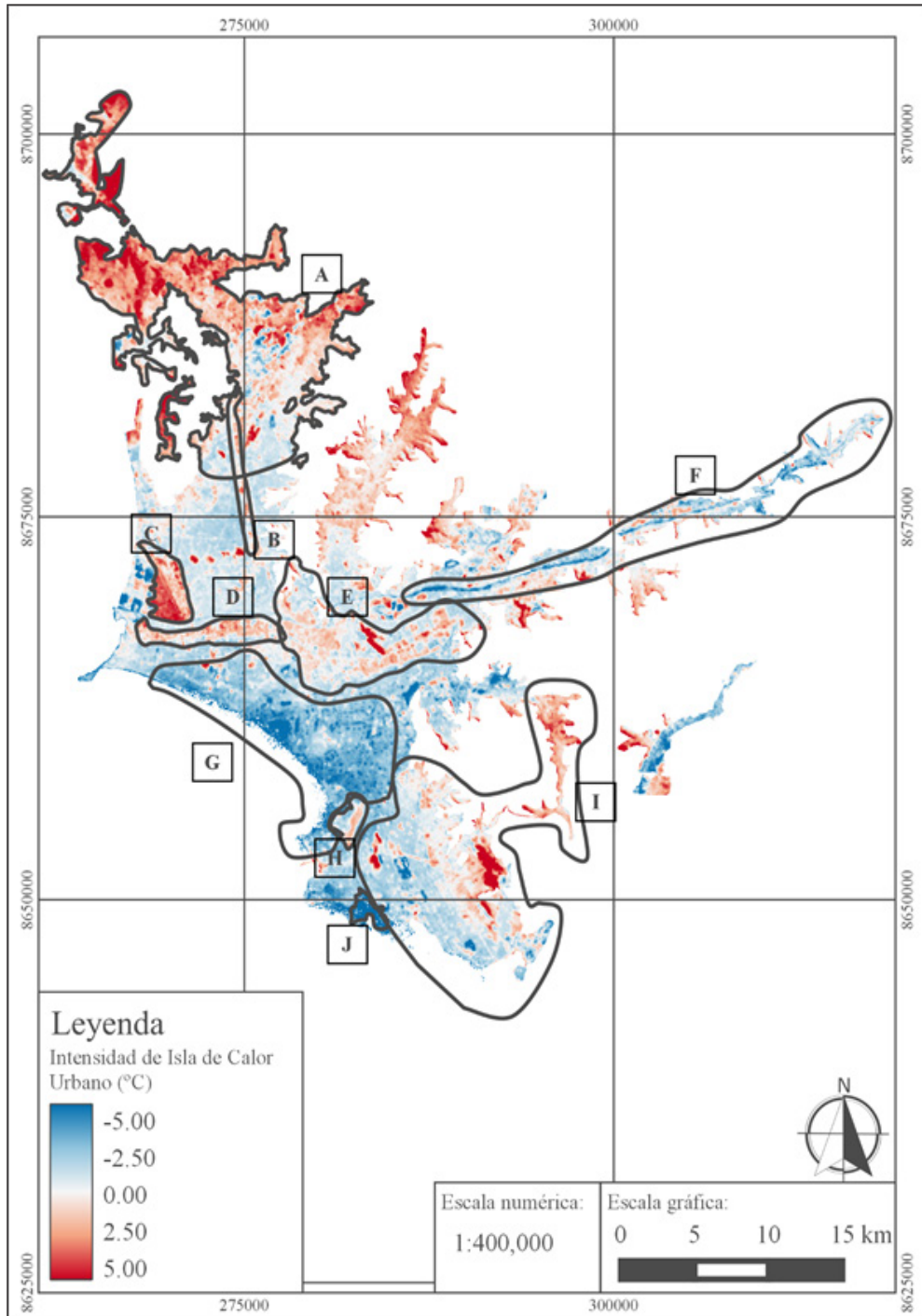


Figura 4: Intensidad de isla de calor urbano detectada el 16 de abril de 2014 en el área de estudio y en las diez (10) zonas de evaluación

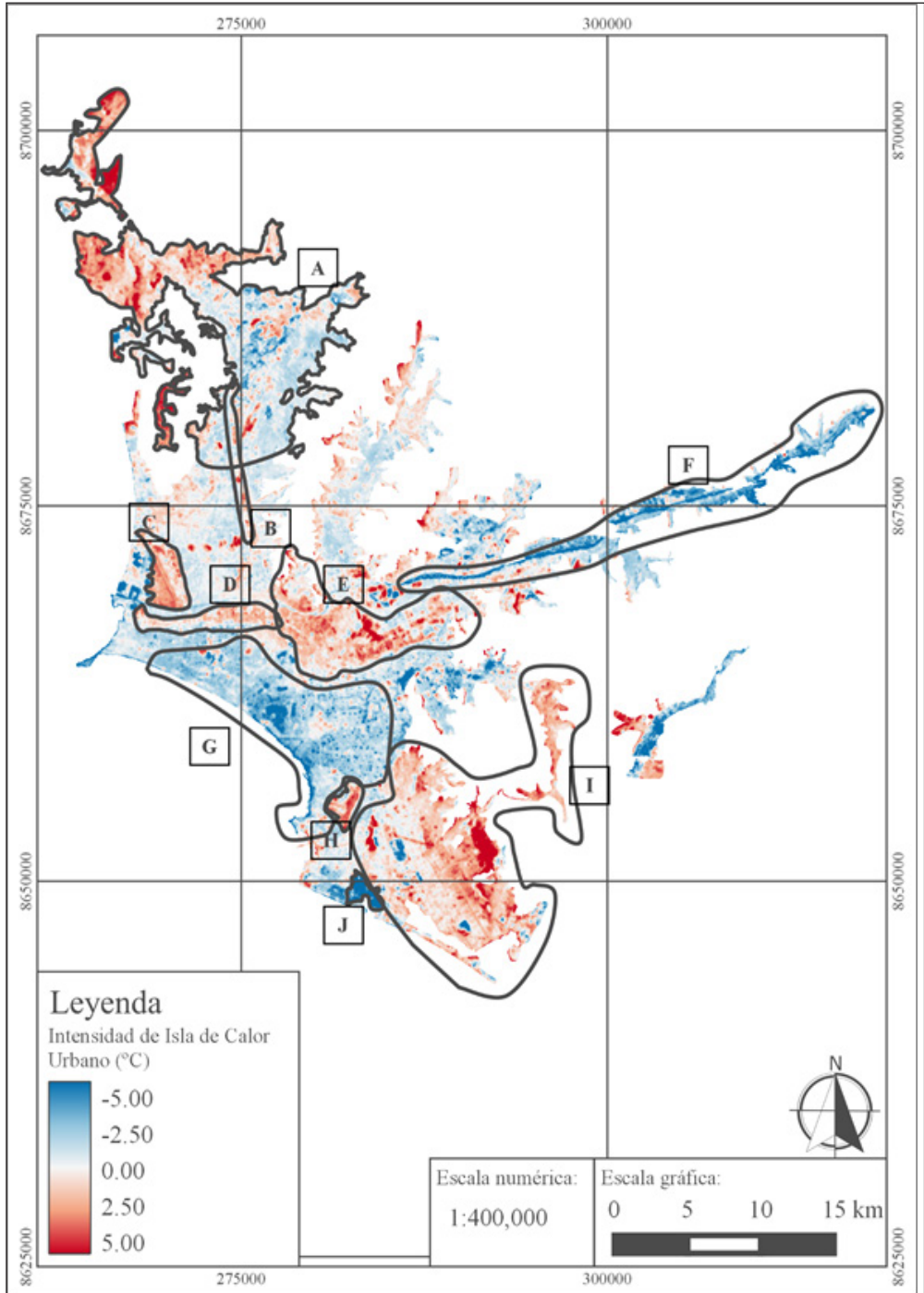


Figura 5: Intensidad de isla de calor urbano detectada el 29 de enero de 2015 en el área de estudio y en las diez (10) zonas de evaluación

Tabla 2: Zonas de evaluación encontradas

Posible causa	Fuente
Zona A. Norte de Lima metropolitana	
<ul style="list-style-type: none"> Presencia predominante de la superficie suelo desnudo, el cual, por su alta capacidad térmica, absorbe y emite gran cantidad de energía. 	Liu y Liu (2012) y EPA (2005)
Zona B. Panamericana Norte	
<ul style="list-style-type: none"> Alto tránsito de vehículos, los cuales emiten gases de combustión y de efecto invernadero. Se debe tener en cuenta que la hora a la que pasa el satélite es a las 10:00 horas aprox. Esta hora se caracteriza por presentar alta congestión vehicular en la zona. Baja cantidad de vegetación en el área, la cual tiene un efecto enfriador por su bajo albedo y baja capacidad térmica. 	<ul style="list-style-type: none"> EPA (2009) y Louiza <i>et al.</i> (2015) Lin y Yuanzhi, (2011) y Dos Santos <i>et al.</i> (2013)
Zona C. Aeropuerto Jorge Chávez	
<ul style="list-style-type: none"> El área de aterrizaje es la zona más amplia de este aeropuerto, la cual es una superficie de asfalto con alta capacidad térmica y por lo tanto absorbe y emite gran cantidad de energía. 	EPA (2005)
Zona D. Oeste de la Av. Argentina	
<ul style="list-style-type: none"> Alto tránsito vehicular, alta densidad de zonas edificadas o baja densidad de áreas vegetales que favorecen la presencia de las islas de calor urbano. Esta zona es un área industrial en donde se concentra gran cantidad de fábricas, las cuales generan gases de combustión que podrían estar aumentando la temperatura. 	<ul style="list-style-type: none"> EPA (2009) y Louiza <i>et al.</i> (2015) EPA (2009)
Zona E. Centro histórico de Lima y la zona industrial de Santa Anita	
<ul style="list-style-type: none"> Alto tránsito vehicular, alta densidad de edificaciones, baja densidad de vegetación o alta concentración de fábricas en la zona (similar a la Zona D). 	EPA (2009) y Louiza <i>et al.</i> (2015)
Zona F. Alrededor de la zona este del río Rímac	
<ul style="list-style-type: none"> La presencia del cuerpo de agua tiene un factor enfriador (debido al bajo albedo y baja capacidad térmica). Alrededor del río se encuentran zonas de cultivo que también tienen el efecto de disminuir la temperatura de la superficie del suelo (por el bajo albedo y baja capacidad térmica). 	<ul style="list-style-type: none"> Barros (2010) Lin y Yuanzhi, (2011) y Dos Santos <i>et al.</i> (2013)
Zona G. Zona oeste de la ciudad en los distritos de San Isidro, San Miguel, Magdalena, Barranco, Miraflores, Surquillo, Santiago de Surco y San Borja	
<ul style="list-style-type: none"> La cercanía al mar puede ser un factor de enfriamiento por la brisa marina. La alta densidad de áreas verdes (parques y jardines) también tiene un efecto enfriador. 	<ul style="list-style-type: none"> Barros (2010) Lin y Yuanzhi (2011) y Dos Santos <i>et al.</i> (2013)
Zona H. Zona sur de Lima metropolitana, alrededor de la zona industrial de Lurín	
<ul style="list-style-type: none"> La alta densidad de fábricas que producen gases de combustión, favoreciendo la presencia de la ICU. La presencia predominante del suelo desnudo el cual tiene alto albedo y alta capacidad térmica. La baja densidad de áreas vegetales en esta zona favorece la presencia de la ICU. 	<ul style="list-style-type: none"> EPA (2009) Liu y Liu (2012) y EPA (2005) Lin y Yuanzhi (2011) y Dos Santos <i>et al.</i> (2013)
Zona I. Base Aérea Las Palmas	
<ul style="list-style-type: none"> La presencia predominante del asfalto. La característica de este material es tener una alta capacidad térmica y por lo tanto podría retener y emitir energía (similar a la Zona C). 	EPA (2005)
Zona J. Los Pantanos de Villa	
<ul style="list-style-type: none"> La presencia del humedal Los Pantanos de Villa el cual, por ser un cuerpo de agua, tiene un efecto enfriador debido a la baja capacidad térmica del agua. La vegetación presente en el humedal también tiene un efecto enfriador debido al alto albedo y capacidad térmica. 	<ul style="list-style-type: none"> Barros (2013) Lin y Yuanzhi (2011) y Dos Santos <i>et al.</i> (2013)

Si bien para cada zona de evaluación se propusieron posibles factores antropogénicos que ocasionaron las islas de calor o de frío, cabe mencionar que la variación entre los resultados de temperatura de superficie del suelo (por tanto, la variación de la intensidad de isla de calor urbano) entre un día y otro, puede ser producto de variaciones en las condiciones naturales como la radiación, la temperatura atmosférica y la velocidad del viento. En segundo plano, la variación puede haber sido ocasionada por factores antropogénicos como la diferencia del flujo de automóviles para cada día evaluado. No se incluye la presencia de nubosidad dentro de los posibles factores naturales que podrían haber influenciado la presencia de

las islas de calor o de frío porque en esta investigación se trabajó con días despejados

Relación entre intensidad de la isla de calor y la elevación

Una vez que se recopilaron los datos de elevación, distancia a cuerpos de agua, densidad poblacional, índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de edificación de diferencia normalizada (NDBI) y uso del suelo, se prosiguió a realizar la prueba de regresión estadística entre la intensidad de ICU (°C) y las variables mencionadas para las cuatro (04) fechas evaluadas (Tabla 3).

Tabla 3: Resultados de la relación estadística para la intensidad de ICU y parámetros espaciales y demográficos

	25/12/13	11/2/14	16/4/14	29/1/15
Elevación (m s.n.m.)	R: 0,057 R ² : 0,33% m: 0,000972 p < 0,001	R: 0,211 R ² : 4,47% m: 0,005674 p < 0,001	R: 0,218 R ² : 4,76% m: 0,002934 p < 0,001	R: -0,066 R ² : 0,44% m: -0,000825 p < 0,001
Distancia de los cuerpos de agua (m)	R: 0,191 R ² : 3,64% m: 0,000202 p < 0,001	R: 0,219 R ² : 4,81% m: 0,000427 p < 0,001	R: 0,193 R ² : 3,71% m: 0,000189 p < 0,001	R: 0,209 R ² : 4,35% m: 0,000189 p < 0,001
Densidad urbana (hab./km ²)	R: -0,191 R ² : 3,57% m: -0,000082 p < 0,001	R: -0,195 R ² : 3,79% m: -0,000156 p < 0,001	R: -0,249 R ² : 6,22% m: -0,000097 p < 0,001	R: 0,014 R ² : 0,02% m: 0,000005 p: 0,432 (n.s.)
NDVI	R: -0,446 R ² : 19,88% m: -10,758 p < 0,001	R: -0,187 R ² : 3,50% m: -7,578 p < 0,001	R: -0,445 R ² : 19,76% m: -10,481 p < 0,001	R: -0,511 R ² : 26,16% m: -9,954 p < 0,001
NDBI	R: 0,531 R ² : 28,23% m: 18,280 p < 0,001	R: 0,395 R ² : 15,63% m: 24,489 p < 0,001	R: 0,581 R ² : 33,77% m: 19,165 p < 0,001	R: 0,639 R ² : 40,89% m: 17,852 p < 0,001
Uso de suelo	R: 0,384 R ² : 14,75% m: 1,5037 p < 0,001	R: 0,246 R ² : 6,05% m: 1,833 p < 0,001	R: 0,441 R ² : 19,41% m: 1,6278 p < 0,001	R: 0,425 R ² : 18,03% m: 1,4464 p < 0,001

R: Coeficiente de correlación de Pearson (-1 a +1).

R²: Coeficiente de determinación (0% a 100%).

m: Pendiente de la relación estadística.

p: P - valor para la pendiente (con una significancia de 0,05).

(n.s.): No significativo para una significancia de 0,05.

La relación entre la elevación y la intensidad de la ICU es estadísticamente significativa y ligeramente positiva para las fechas de 25 de diciembre de 2013, 11 de febrero y 16 de abril de 2014. Lo que implica que para estas tres (03) fechas a mayor elevación se obtuvieron mayores valores de intensidad de la ICU.

Además, la relación entre la distancia de los cuerpos de agua y la intensidad de la ICU es estadísticamente significativa y ligeramente positiva para los cuatro (04) días evaluados. Lo cual implica que a mayor distancia de los cuerpos de agua habrá mayor intensidad de la ICU, de esta manera se confirma el efecto enfriador de los cuerpos de agua, al igual que lo reportado por el estudio de [Dos Santos et al. \(2013\)](#).

Paralelamente, la densidad urbana y la intensidad de la ICU tienen una relación estadísticamente significativa y ligeramente negativa (con excepción de la relación entre estas variables medidas para el día 29 de enero de 2015, cuando la correlación es no significativa). Este resultado se comporta de manera diferente a lo esperado según señala [Dos Santos et al. \(2013\)](#), en esta investigación se determinó que a mayor densidad urbana hay mayores niveles de temperatura de brillo. Esta diferencia entre los resultados y la bibliografía consultada puede ser debido a que la densidad urbana se ha manejado como una característica que es homogénea a lo largo de cada distrito, sin embargo, esta característica no se comporta así en la realidad. Esto podría haber llevado a cometer errores que finalmente se ven reflejados en relaciones estadísticas negativas.

A su vez, la asociación entre el NDVI y la intensidad de la ICU tiene una relación estadísticamente significativa y fuertemente negativa. Lo que implica que en zonas con más vegetación y con vegetación más sana, se tienen valores de temperatura más bajos. Este resultado es similar a lo encontrado por [Lin y Yuanzhi \(2011\)](#) y [Dos Santos et al. \(2013\)](#).

De la misma manera, el NDBI y la intensidad de la ICU tienen una asociación estadísticamente significativa y fuertemente positiva. Por lo cual, se asume que en zonas más edificadas y densamente construidas, se espera mayor temperatura, como lo

encontraron [Lin y Yuanzhi \(2011\)](#) y [Dos Santos et al. \(2013\)](#).

La relación entre el uso del suelo y la intensidad de la ICU es estadísticamente significativa y fuertemente positiva, por lo tanto, se puede afirmar que la menor temperatura se encontrará en los campos de cultivo, luego en los parques, los que tendrán menor temperatura que las zonas urbanas y estos últimos tendrán menor temperatura que las áreas de suelo desnudo. [Rajeshwari y Mani \(2014\)](#) encontraron resultados similares (una relación positiva entre el uso de suelo y la ICU).

Establecer relaciones de la intensidad de la isla de calor y los contaminantes atmosféricos NO, NO₂, SO₂, O₃ y PM₁₀.

Luego se buscó conocer la relación estadística entre las concentraciones de los contaminantes NO, NO₂, SO₂, O₃ y PM₁₀ ([Tabla 4](#)) y los valores de intensidad de ICU para las fechas estudiadas en la ubicación de las estaciones.

Con los datos de concentración de contaminantes y los valores de intensidad de ICU (°C) se determinaron la correlación (Coeficiente de Correlación – R y Coeficiente de determinación – R²), la pendiente de la relación estadística (m) y el P - valor de la pendiente ([Tabla 5](#)).

Los P - valores para los modelos de correlación entre los contaminantes evaluados y la intensidad de ICU estudiada es no significativa ($\alpha = 0,05$), por lo tanto, es posible afirmar que no hay suficiente evidencia estadística para afirmar una asociación entre las variables de contaminantes estudiados y la intensidad de ICU, si bien se espera que a mayor concentración de los gases de efecto invernadero haya una mayor intensidad de ICU (EPA, 2009). Además, a mayor concentración de SO₂ y NO_x hubo mayores valores de la temperatura de superficie del suelo (Weng y Yang, 2006). En esta investigación se obtuvieron resultados que contradicen lo encontrado en la bibliografía, lo cual puede deberse a la baja cantidad de puntos analizados en esta evaluación, puesto que, para las cuatro (04) fechas evaluadas y nueve (09) estaciones de calidad ambiental, no se reportaron valores de concentración para todas las fechas y estaciones.

Tabla 4: Concentración de contaminantes reportados por el Senamhi

Estación	Parámetro	25/12/2013-10:00 a.m.	11/02/2014-10:00 a.m.	16/04/2014-10:00 a.m.	29/01/2015-10:00 a.m.
Ate	NO (ppb)	24,2	64,6	49,3	-
	NO ₂ (ppb)	7,2	30,1	45,5	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	2,9	-	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	71,0	251,4	309,6	251,5
San Borja	NO (ppb)	-	47,9	56,4	-
	NO ₂ (ppb)	-	13,1	14,9	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	5,7	4,9	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	34,4	62,0	47,4	25,9
Santa Anita	NO (ppb)	-	-	-	-
	NO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	-	7,8	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	-	-	145,7	139,6
San Juan De Lurigancho	NO (ppb)	-	-	-	-
	NO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	-	-	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	-	-	231,2	115,5
Carabayllo	NO (ppb)	-	-	-	-
	NO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	-	-	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	-	-	184,8	152,1
San Martín De Porres	NO (ppb)	-	-	-	-
	NO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	-	-	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	-	-	95,7	-
Puente Piedra	NO (ppb)	-	-	-	-
	NO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	-	-	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	-	-	214,9	123,0
Villa María Del Triunfo	NO (ppb)	12,3	-	-	-
	NO ₂ (ppb)	10,3	-	-	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	-	-	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	72,1	-	134,9	190,6
Campo De Marte	NO (ppb)	4,8	7,7	-	-
	NO ₂ (ppb)	3,7	4,5	-	-
	SO ₂ (ppb)	-	-	-	-
	O ₃ (ppb)	-	2,8	-	-
	PM ₁₀ (µg/m ³)	17,5	77,5	74,1	59,7

(-) Valor no reportado por Senamhi.

Tabla 5: Resultados de la relación para la intensidad de ICU en las fechas estudiadas y contaminantes

	Intensidad de ICU (°C)
NO	R: 0,528 R ² : 27,88% m: 0,0459 p: 0,179 (n.s.)
NO ₂	R: 0,296 R ² : 8,79% m: 0,0424 p: 0,476 (n.s.)
SO ₂	*
O ₃	R: 0,174 R ² : 3,02% m: 0,154 p: 0,780 (n.s.)
PM ₁₀	R: 0,382 R ² : 14,62% m: 0,00779 p: 0,065 (n.s.)

R: Coeficiente de correlación de Pearson (-1 a +1).

R²: Coeficiente de determinación (0% – 100%).

m: Pendiente de la relación estadística.

p: P - valor para la pendiente (con una significancia de 0,05)

(n.s.): No significativo.

* No se han obtenido resultados porque hay menos de tres pares de puntos.

4. Conclusiones

Se han identificado cualitativamente diez (10) zonas de evaluación en la zona de estudio y para las fechas evaluadas. Estas zonas presentan islas de calor y/o de frío que, en su mayoría, son de extensión y ubicación variable y no todas fueron permanentes durante los cuatro (04) días evaluados.

Se determinó que hay relaciones estadísticamente significativas entre la intensidad de la isla de calor urbano (IICU) y la elevación, la distancia de los cuerpos de agua, la densidad urbana, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de edificación de diferencia normalizada (NDBI) y el uso de suelo. Se obtuvo que hay una leve relación positiva entre la elevación y la IICU (menos el 29 de enero de 2015) así como también una leve relación positiva entre la distancia a los cuerpos de agua y la IICU, también se determinó que hay una relación negativa entre la densidad urbana y la IICU (las relaciones fueron estadísticamente

significativa para todos los días evaluados, menos el 29 de enero de 2015), por otro lado hay una relación fuertemente negativa entre el NDVI y la IICU, además hay una relación fuertemente positiva entre el NDBI y la IICU y, finalmente, hay una relación positiva con el uso de suelo (campos de cultivo, parques, suelo desnudo y zona edificada, en ese orden) y la IICU. Los coeficientes de correlación (R) más resaltantes fueron R=0,639 para la relación entre NDBI y la IICU del 29 de enero de 2015 y R=0,441 para la relación entre el uso de suelo y la IICU del 16 de abril de 2014.

Con los datos de contaminantes atmosféricos obtenidos se ha determinado que no hay una relación estadística entre la IICU y los contaminantes NO, NO₂, O₃ y PM₁₀. Los P – valores obtenidos para los modelos de correlación realizados entre estas variables varían entre 0,780 y 0,065, valores mayores a 0,05 ($\alpha=0,05$). Por lo tanto, con una significancia de 0,05, se puede decir que las relaciones no son significativas.

5. Literatura citada

- Barros, P. 2010. Modificaciones térmicas en la ciudad de Lima: Análisis de la presencia de Isla de Calor Urbano. Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- EPA [United States Environmental Protection Agency]. 2005. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Cool Pavements.
- EPA [United States Environmental Protection Agency]. 2009. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics.
- INEI [Instituto Nacional de Estadística e Informática]. 2014. Una Mirada a Lima Metropolitana. INEI, Lima, Perú.
- Jiménez-Muñoz, J.C.; Cristóbal, J.; Sobrino, J.A.; Soria, G.; Ninyerola, M.; Pons, X. 2009. Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat Thermal-Infrared Data. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing 47(1): 339- 349.
- Jiménez-Muñoz, J.C.; Sobrino, J.A.;

- Skoković, D.; Mattar, C.; Cristóbal, J. 2014. Land Surface Temperature Retrieval Methods from Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 11(10): 1840-1843.
- Lin, L.; Yuanzhi, Z. 2011. Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER Data: A Case Study in Hong Kong. *Remote Sensing*: 1535-1552. doi:10.3390/rs3071535.
- Liu, H.; Liu, Q. 2012. The Urban Heat Islands Analysis: Factors of Building Surface, Green Area and Lighting. *Tesis de maestría*. 38 p.
- Louiza, H.; Zéroual, A.; Djamel, H. 2015. Impact of the Transport in the Urban Heat Island. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*. doi: [http://dx.doi.org/10.7708/ijtte.2015.5\(3\).03](http://dx.doi.org/10.7708/ijtte.2015.5(3).03)
- Maggee, N.; Curtis, J.; Wendler, G. 1999. The Urban Heat Island Effect at Fairbanks, Alaska. *Theoretical and Applied Climatology* 64(1/2): 39-47.
- Oke, T.R. 1976. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, 268-277. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422>
- Oke, T.R. 1987. *Boundary Layer Climates*. 2ª Edición. Editorial Taylor & Francis.
- Rajeshwari, A.; Mani, N.D. 2014. Estimation of Land Surface Temperature of Dindigul District using Landsat 8 Data. *International Journal of Research in Engineering and Technology* 03(05): 268-277.
- Remote Sensing Systems. (s.f.). *Atmospheric water vapor*. Disponible en <http://www.remss.com/measurements/atmospheric-water-vapor>
- Rizwan, A.M.; Dennis, Y.C.; Liu, C. 2008. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*: 120-128.
- USGS. 2015. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*. Versión 1.0. Disponible en <https://landsat.usgs.gov/documents/landsat8DataUsersHandbook.pdf>
- Santos, F.B. dos; Gomes, H.B.; Silva Azevedo, C.D. da. 2013. Análise da Formação de Ilhas de Calor em Fortaleza-CE por meio de imagens de satélite. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*.
- Skoković, D.; Sobrino, J.A.; Jiménez-Muñoz, J.C.; Soria, G.; Julien, Y.; Mattar, C.; Cristóbal, J. 2014. Calibration and Validation of land surface temperature for Landsat8-TIRS sensor.
- Sobrino, J.A.; Jiménez-Muñoz, J.C.; Paolini, L. 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment* 90(2004), pp. 434–440.
- Weng, Q.; Yang, S. 2006. Urban air pollution patterns, land use, and thermal landscape: an examination of the linkage using GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*: 463-489. doi:10.1016/j.rsjprs.2009.03.007.
- Xiaolei, Y.; Xulin, G.; Zhaocong, W. 2014. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method. *Remote sensing*: 9829-9852. doi:10.3390/rs6109829.