

Artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/athenea.v7i25.148>

Islas de calor superficial en ciudades ecuatorianas costeras y andinas: análisis espacio-temporal mediante Landsat, vegetación urbana y reanálisis meteorológico

Diana Katherine Campoverde Santos*
<https://orcid.org/0000-0001-8538-6747>
diana.campoverde@esPOCH.edu.ec
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba, Ecuador

Carlos Fernando Heredia Villamarín
<https://orcid.org/0000-0002-4411-7513>
fernando.heredia@docentes.educacion.gob.ec
Ministerio de Educación, Deporte y Cultura
Quito, Ecuador

Cristian David Buñay Marcatoma
<https://orcid.org/0009-0002-3543-5111>
cristian.bunay@uaw.edu.ec
Universidad Intercultural de las Nacionalidades y
Pueblos Indígenas Amawtay Wasi
Quito, Ecuador

Lizbeth Carolina Sanunga Guananga
<https://orcid.org/0009-0004-6929-0285>
lizbeth.sanunga@unach.edu.ec
Universidad Nacional de Chimborazo
Riobamba, Ecuador

*Autor de correspondencia: diana.campoverde@esPOCH.edu.ec

Recibido: (12/03/2026), Aceptado: (03/07/2026)

Resumen. El crecimiento urbano modifica las propiedades físicas de la superficie terrestre y puede intensificar los contrastes térmicos entre áreas construidas y zonas periurbanas. Este estudio analizó la dinámica espacio-temporal de las islas de calor superficial en ciudades ecuatorianas costeras y andinas mediante imágenes Landsat, indicadores de vegetación y superficie construida, y variables meteorológicas de reanálisis. Se procesaron productos Landsat en *Google Earth Engine* para estimar temperatura superficial terrestre, calcular índices espectrales y comparar áreas urbanas y periurbanas. Además, se incorporaron datos de reanálisis terrestre de quinta generación del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo de temperatura del aire, precipitación y viento. Los resultados muestran mayor contraste térmico urbano-periurbano en las ciudades andinas, mientras que la ciudad costera presentó mayor variabilidad temporal. La vegetación y la superficie construida mostraron relaciones diferenciadas con la temperatura superficial, y las variables meteorológicas permitieron contextualizar la variabilidad térmica observada.

Palabras clave: isla de calor, temperatura superficial, Landsat, datos meteorológicos.

Surface Urban Heat Islands in Coastal and Andean Ecuadorian Cities: Spatio-Temporal Analysis Using Landsat, Urban Vegetation, and Meteorological Reanalysis

Abstract. Urban growth modifies the physical properties of the Earth's surface and may intensify thermal contrasts between built-up areas and peri-urban zones. This study analyzed the spatio-temporal dynamics of surface urban heat islands in coastal and Andean Ecuadorian cities using Landsat imagery, vegetation and built-up surface indicators, and meteorological reanalysis variables. Landsat products were processed in Google Earth Engine to estimate land surface temperature, calculate spectral indices, and compare urban and peri-urban areas. In addition, fifth-generation terrestrial reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts were incorporated, including air temperature, precipitation, and wind variables. The results show greater urban–peri-urban thermal contrast in Andean cities, whereas the coastal city exhibited higher temporal variability. Vegetation and built-up surface indicators showed differentiated relationships with land surface temperature, and meteorological variables allowed the observed thermal variability to be contextualized.

Keywords: heat island, land surface temperature, Landsat, meteorological data.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano modifica las propiedades físicas de la superficie terrestre al sustituir coberturas naturales por materiales impermeables, como asfalto, concreto y techos. Estos cambios alteran el intercambio de energía entre la superficie y la atmósfera, reducen la evapotranspiración y favorecen el almacenamiento de calor. Como resultado, las ciudades pueden registrar temperaturas superiores a las de sus áreas rurales o periurbanas próximas, fenómeno conocido como isla de calor urbano [1].

La isla de calor superficial permite analizar este fenómeno a partir de la temperatura superficial terrestre, variable que expresa la respuesta térmica de los materiales y coberturas observados por sensores satelitales. A diferencia de la temperatura del aire, la temperatura superficial permite identificar contrastes espaciales asociados con edificaciones, vías, suelos expuestos, vegetación, cuerpos de agua y áreas periurbanas. Por ello, la teledetección térmica se ha consolidado como una herramienta útil para estudiar la distribución espacial del calor urbano, especialmente en ciudades donde las estaciones meteorológicas disponibles no representan adecuadamente la heterogeneidad intraurbana [2], [3].

La evidencia científica muestra que la intensidad y distribución de las islas de calor superficial varían según la morfología urbana, la densidad de superficies impermeables, la cobertura vegetal, la humedad disponible y el contexto climático local [4], [5], [6]. En este sentido, las imágenes Landsat ofrecen una base adecuada para analizar la temperatura superficial urbana, debido a su disponibilidad histórica, resolución espacial y posibilidad de combinar información térmica con bandas ópticas. A partir de estas imágenes es posible calcular indicadores como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de diferencia normalizada de áreas construidas (NDBI), los cuales permiten relacionar los patrones térmicos con la vegetación y la superficie urbanizada [7], [8], [9].

Ecuador constituye un escenario pertinente para este análisis porque integra ciudades costeras cálidas y ciudades andinas de elevada altitud en un territorio geográficamente contrastante. En este estudio se seleccionaron Guayaquil, Quito y Cuenca por representar tres configuraciones urbanas y climáticas diferenciadas: Guayaquil, como ciudad costera cálida y húmeda; Quito, como ciudad andina de gran altitud y relieve complejo; y Cuenca, como ciudad interandina con ríos urbanos, áreas verdes y expansión sostenida. Esta selección permite comparar la respuesta térmica superficial en contextos de costa, sierra norte y sierra sur bajo un mismo procedimiento satelital y meteorológico. Además, estudios regionales han mostrado la utilidad de Landsat, LST, NDVI y NDBI para analizar islas de calor superficial en Quito y en ciudades tropicales colombianas, lo que respalda la pertinencia de ampliar análisis comparativos en ciudades ecuatorianas [10], [11].

A pesar del interés creciente por el calentamiento urbano, aún se requieren estudios comparativos en ciudades ecuatorianas que integren series temporales homogéneas, datos satelitales abiertos y variables meteorológicas de reanálisis. El aporte de este estudio consiste en analizar la dinámica espacio-temporal de las islas de calor superficial en Guayaquil, Quito y Cuenca durante el periodo 2014–2024, mediante imágenes Landsat 8/9, indicadores de vegetación y superficie construida, y datos meteorológicos ERA5-Land. El objetivo general es evaluar los patrones térmicos urbano-periurbanos y su relación con la cobertura vegetal, la superficie construida y las condiciones meteorológicas generales.

El artículo se organiza de la siguiente manera: después de esta introducción se presentan los fundamentos conceptuales y físicos del estudio; luego se describe la metodología de procesamiento satelital y meteorológico; posteriormente se exponen y discuten los resultados de temperatura superficial e intensidad de isla de calor; finalmente, se presentan las conclusiones principales.

II. DESARROLLO

El análisis de las islas de calor urbano se sustenta en la modificación del balance energético superficial. La sustitución de coberturas naturales por materiales impermeables reduce la evapotranspiración, incrementa el almacenamiento de calor y modifica los intercambios de energía entre superficie y atmósfera [1]. En este marco, la isla de calor superficial se diferencia de la atmosférica porque se expresa mediante la temperatura superficial terrestre registrada por sensores térmicos satelitales, no mediante temperatura del aire. Por ello, permite identificar contrastes asociados con edificaciones, vías, techos, vegetación, cuerpos de agua, suelos expuestos y áreas periurbanas [2], [3].

La intensidad de la isla de calor superficial puede estimarse mediante la diferencia entre la temperatura superficial media del área urbana y la temperatura superficial media de un área periurbana o no

urbana de referencia, criterio empleado en estudios de teledetección térmica urbana [4], [12]. En este estudio, dicha relación se expresó de la siguiente manera:

$$ICSU = T_{s,u} - T_{s,r} \quad (1)$$

donde $ICSU$ representa la intensidad de la isla de calor superficial, $T_{s,u}$ corresponde a la temperatura superficial media del área urbana y $T_{s,r}$ corresponde a la temperatura superficial media del área periurbana de referencia.

La interpretación de la temperatura superficial requiere considerar la cobertura del suelo y la configuración física del entorno urbano. La vegetación suele reducir la temperatura superficial por sombra y evapotranspiración, mientras que las superficies construidas tienden a elevarla por impermeabilidad y almacenamiento térmico. Esta lectura es coherente con el enfoque de zonas climáticas locales, que diferencia unidades urbanas según cobertura, morfología, materiales y exposición térmica [7], [8], [13], [14]. La incorporación de variables meteorológicas de reanálisis permite contextualizar la variabilidad térmica superficial. La temperatura del aire, la precipitación y el viento pueden modular las condiciones bajo las cuales se observa la temperatura superficial, aunque no sustituyen el análisis térmico satelital. En ciudades con condiciones geográficas contrastantes, como Guayaquil, Quito y Cuenca, esta integración permite diferenciar con mayor claridad los efectos asociados con la cobertura urbana de aquellos relacionados con el contexto climático y atmosférico general [5], [6], [15].

III. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló con un enfoque cuantitativo, observacional y espacio-temporal, basado en el procesamiento de imágenes satelitales y datos meteorológicos abiertos. El procedimiento permitió estimar la temperatura superficial terrestre, calcular indicadores de vegetación y superficie construida, integrar variables de reanálisis meteorológico y comparar la dinámica térmica de tres ciudades ecuatorianas durante el periodo 2014–2024.

El estudio se realizó en Guayaquil, Quito y Cuenca, seleccionadas por su importancia urbana, localización en regiones geográficas contrastantes y posibilidad de comparación bajo un mismo procedimiento. Guayaquil representa una ciudad costera cálida y húmeda; Quito, una ciudad andina de elevada altitud y relieve complejo; y Cuenca, una ciudad interandina de menor escala, con ríos urbanos, áreas verdes y expansión sostenida. Para cada ciudad se delimitó una ventana espacial alrededor del núcleo urbano principal: 30 km para Guayaquil y Quito, por su mayor extensión urbana y periurbana, y 22 km para Cuenca, para evitar la incorporación de áreas rurales o montañosas alejadas. Estas ventanas fueron una decisión metodológica del estudio y funcionaron únicamente como marcos de extracción, ya que la comparación térmica se realizó mediante máscaras urbana y periurbana. La ubicación de las ciudades se presenta en la Figura 1 y sus características generales en la Tabla 1.

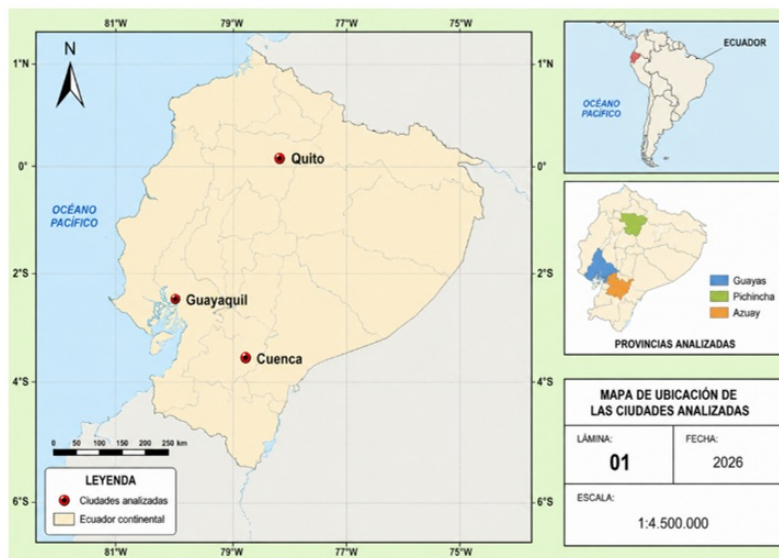


Fig. 1. Mapa de ubicación de Guayaquil, Quito y Cuenca.

La Tabla 1 contextualiza las diferencias geográficas y urbanas utilizadas como criterios interpretativos de los contrastes térmicos observados.

Tabla 1. Características generales de las ciudades analizadas.

Ciudad	Región geográfica	Altitud aproximada (m.s.n.m.)	Condición urbana relevante	Justificación en el estudio
Guayaquil	Costa	4–10	Ciudad costera cálida, con alta urbanización y expansión sobre zonas bajas	Permite analizar la isla de calor superficial en un entorno cálido-húmedo y densamente urbanizado
Quito	Sierra norte	2800–2850	Ciudad andina de elevada altitud, crecimiento longitudinal y relieve complejo	Permite evaluar el comportamiento térmico urbano en condiciones de altitud y topografía marcada
Cuenca	Sierra sur	2500–2560	Ciudad interandina con presencia de áreas verdes, ríos y expansión urbana	Permite comparar patrones térmicos en una ciudad andina intermedia con cobertura vegetal relevante

El periodo de análisis comprendió 2014–2024. Se emplearon imágenes Landsat 8 y Landsat 9 *Collection 2 Tier 1 Level 2*, procesadas en *Google Earth Engine* mediante un *script* para filtrar escenas, aplicar máscaras de calidad, escalar bandas, generar composiciones anuales, calcular variables derivadas y exportar productos tabulares y cartográficos [9], [16], [17], [18]. Las fuentes de datos, variables principales, resolución y uso metodológico se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Fuentes de datos, variables y uso metodológico.

Fuente de datos	Variable o producto	Resolución	Uso en el estudio
Landsat 8/9 <i>Collection 2 Level 2</i>	Temperatura superficial terrestre, reflectancia superficial, NDVI y NDBI	30 m	Estimación térmica, vegetación, superficie construida e intensidad de isla de calor superficial
ESA <i>WorldCover 2021</i>	Cobertura construida y cuerpos de agua	10 m	Delimitación de áreas urbanas, periurbanas y exclusión de agua
ERA5-Land	Temperatura del aire, precipitación y viento	9–11 km aprox.	Contextualización meteorológica y análisis de relación con la intensidad térmica
<i>Google Earth Engine</i>	Procesamiento geoespacial	Plataforma web	Filtrado, enmascaramiento, composición anual, cálculo de indicadores y exportación de resultados

El preprocesamiento incluyó filtrado por ciudad, fecha y nubosidad, con un umbral máximo inicial de 60%. Luego se excluyeron píxeles afectados por relleno, nube dilatada, cirros, nubes, sombras, nieve y saturación radiométrica. La temperatura superficial terrestre se obtuvo desde la banda térmica ST_B10, aplicando los factores de escala y conversión a grados Celsius; con las bandas ópticas escaladas se calcularon NDVI y NDBI.

La temperatura superficial terrestre se obtuvo a partir de la banda térmica ST_B10, aplicando los factores de escala correspondientes y convirtiendo los valores de Kelvin a grados Celsius. La reflectancia superficial se obtuvo a partir de las bandas ópticas escaladas. Con estas bandas se calcularon el índice de vegetación de diferencia normalizada, mediante las bandas del infrarrojo cercano y rojo, y el índice de diferencia normalizada de áreas construidas, mediante las bandas del infrarrojo de onda corta y del infrarrojo cercano.

Para cada ciudad y año se generó una composición mediana de píxeles válidos, con el fin de reducir valores extremos y nubes residuales. Los mapas de temperatura superficial media 2014–2024 se obtuvieron del promedio multianual de las composiciones anuales, mientras que la serie de ICSU se calculó con los valores exportados por ciudad y año, como diferencia entre temperatura superficial urbana media y periurbana media. Estos valores fueron organizados en una base tabular y utilizados para elaborar la Figura 4.

La delimitación espacial se realizó mediante ventanas circulares alrededor del núcleo urbano principal de cada ciudad. Estas ventanas no fueron tratadas como unidades térmicas homogéneas, sino como marcos para extraer áreas urbanas y periurbanas. Dentro de ellas, la clase construida de la Agencia Espacial Europea (ESA) *WorldCover 2021* se utilizó como máscara urbana, mientras que el área peri-

urbana correspondió a píxeles no construidos, excluyendo cuerpos de agua permanentes y valores no válidos.

La máscara urbana se mantuvo constante para 2014–2024 con el fin de asegurar comparabilidad temporal; sin embargo, esta decisión implica que la expansión urbana anual no fue modelada y que el efecto de nuevas áreas urbanizadas pudo simplificarse. En Quito y Cuenca, además, la interpretación consideró la influencia potencial del relieve, debido a que las diferencias altitudinales pueden incidir parcialmente en la temperatura superficial observada. El procedimiento general de procesamiento satelital, delimitación urbano-periurbana, integración meteorológica y análisis estadístico se esquematiza en la Figura 2.

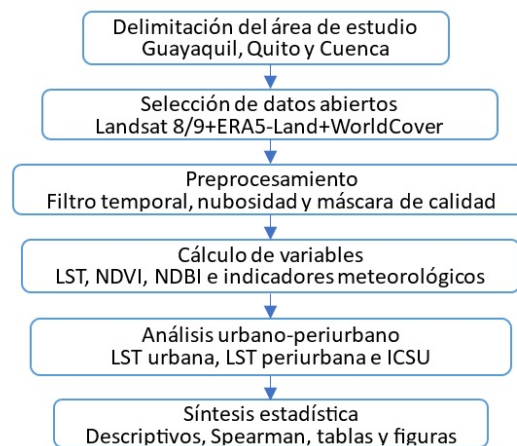


Fig. 2. Flujo metodológico del estudio.

La intensidad de isla de calor superficial se calculó anualmente como diferencia entre la temperatura superficial media urbana y periurbana. Además, se obtuvieron estadísticos descriptivos de LST, NDVI, NDBI e ICSU. Como complemento, se extrajeron datos diarios agregados de ERA5-Land de temperatura del aire, precipitación y viento, usando la misma ventana temporal de las composiciones Landsat [15]. La velocidad del viento se calculó a partir de sus componentes zonal y meridional.

Las variables consideradas fueron temperatura del aire a 2 m, precipitación acumulada y velocidad del viento a 10 m. Esta última se calculó a partir de sus componentes zonal y meridional. Los datos meteorológicos se agregaron por ciudad y año, y se integraron con los indicadores derivados de Landsat para examinar la relación entre la intensidad de isla de calor superficial y las condiciones meteorológicas generales del periodo analizado.

El análisis temporal se realizó mediante la comparación anual de la temperatura superficial urbana, la temperatura superficial periurbana y la intensidad de isla de calor superficial entre 2014 y 2024. El análisis comparativo entre ciudades se efectuó a partir de los valores medios, rangos y variabilidad interanual de cada indicador. Finalmente, se examinaron las relaciones entre temperatura superficial urbana, índice de vegetación, índice de áreas construidas, intensidad de isla de calor superficial y variables meteorológicas mediante correlación de Spearman. Se eligió este coeficiente porque no exige normalidad estricta, es adecuado para series pequeñas, permite evaluar asociaciones monotónicas y reduce la sensibilidad frente a valores extremos que pueden aparecer en series anuales derivadas de imágenes satelitales y condiciones meteorológicas variables.

Para el control de calidad se verificó que cada ciudad contara con datos válidos para los once años del periodo de estudio. También se revisó la coherencia de los valores de temperatura superficial, la ausencia de valores nulos en el cálculo final de la intensidad de isla de calor superficial y la consistencia de las máscaras urbana y periurbana. Adicionalmente, se realizó una revisión visual de las composiciones anuales de LST en Google Earth Engine para identificar posibles artefactos residuales asociados con nubosidad, sombras o píxeles anómalos. Cuando se observaron vacíos o inconsistencias espaciales, se aplicó la ventana temporal de respaldo o la composición anual, según el criterio definido en el procedimiento.

IV. RESULTADOS

El procesamiento de Landsat 8/9 permitió obtener valores anuales de LST, NDVI, NDBI e ICSU para Guayaquil, Quito y Cuenca durante 2014–2024. Los resultados térmicos corresponden a temperatura superficial terrestre, no a temperatura del aire; por tanto, expresan la respuesta térmica de las coberturas observadas por el sensor satelital y no mediciones atmosféricas a nivel peatonal. La distribución espacial de la LST media del periodo se presenta en la Figura 3.

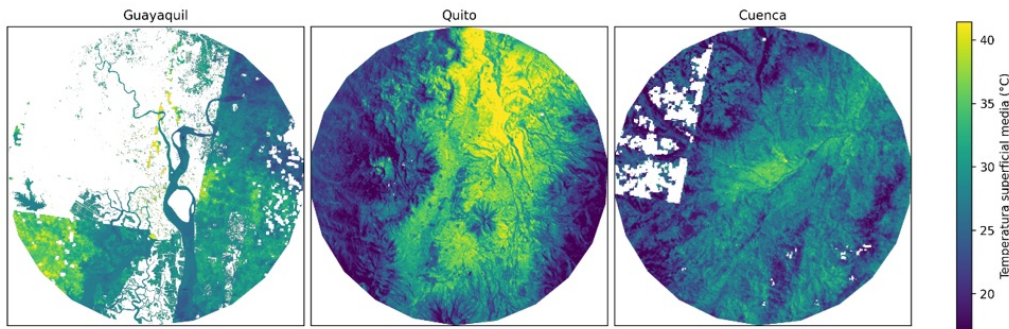


Fig. 3. Temperatura superficial terrestre media, 2014–2024.

La Figura 3 evidencia contrastes térmicos intraurbanos, con sectores más cálidos asociados a coberturas urbanizadas y menor presencia de vegetación, coherente con estudios de teledetección térmica urbana [2], [3], [7], [8]. No obstante, las estimaciones Landsat LST incorporan incertidumbres por corrección atmosférica, emisividad, heterogeneidad superficial y nubosidad residual; por ello, los valores reportados deben interpretarse como estimaciones comparativas de temperatura superficial y no como mediciones absolutas libres de incertidumbre [9], [17], [18]. Los principales estadísticos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Estadísticos de temperatura superficial terrestre (LST) e intensidad de isla de calor superficial (ICSU) por ciudad, 2014–2024.

Ciudad	Años válidos	LST urbana media ± DE (°C)	LST periurbana media ± DE (°C)	ICSU media ± DE (°C)	Rango ICSU (°C)
Quito	11	35,23 ± 2,57	27,72 ± 2,36	7,51 ± 0,52	6,95–8,39
Cuenca	11	31,50 ± 2,26	25,21 ± 2,04	6,29 ± 0,50	5,32–7,04
Guayaquil	11	34,55 ± 4,72	29,72 ± 3,82	4,83 ± 1,30	2,57–6,54

Durante el periodo analizado, las tres ciudades presentaron una temperatura superficial urbana media superior a la temperatura superficial periurbana. La mayor intensidad media de isla de calor superficial se registró en Quito, seguida de Cuenca y Guayaquil. Este resultado indica que, bajo la delimitación urbano-periurbana aplicada, las ciudades andinas presentaron un contraste térmico superficial más marcado que la ciudad costera. La diferencia observada no debe interpretarse únicamente como efecto de la urbanización, sino también como resultado de condiciones geográficas y climáticas diferenciadas, ya que la literatura ha mostrado que el clima de fondo, la altitud, la disponibilidad de humedad y la eficiencia de los intercambios de calor influyen en la magnitud de las islas de calor [5], [6].

En el caso de Quito y Cuenca, el relieve también puede influir en la temperatura superficial observada, debido a diferencias altitudinales, pendiente, orientación de laderas y variaciones locales de exposición solar. Por ello, el mayor contraste urbano-periurbano registrado en las ciudades andinas debe interpretarse no solo como efecto de la cobertura construida, sino también como resultado de la interacción entre urbanización y condiciones topográficas. Esta consideración es especialmente relevante en Quito, donde la expansión longitudinal y la presencia de áreas periurbanas en distintos pisos altitudinales pueden modificar el gradiente térmico superficial.

El comportamiento observado sugiere que la temperatura superficial urbana no depende exclusivamente de la condición costera o andina, sino de la interacción entre cobertura construida, vegetación, topografía, humedad y configuración urbana. En este sentido, la mayor intensidad de isla de calor superficial en Quito puede estar asociada con el contraste entre zonas construidas y áreas periurbanas de referencia, mientras que en Guayaquil el contexto costero, la humedad, la presencia de cuerpos de agua y las coberturas mixtas pueden atenuar o modificar el gradiente urbano-periurbano. La variación anual de la intensidad de isla de calor superficial en cada ciudad se presenta en la Figura 4.

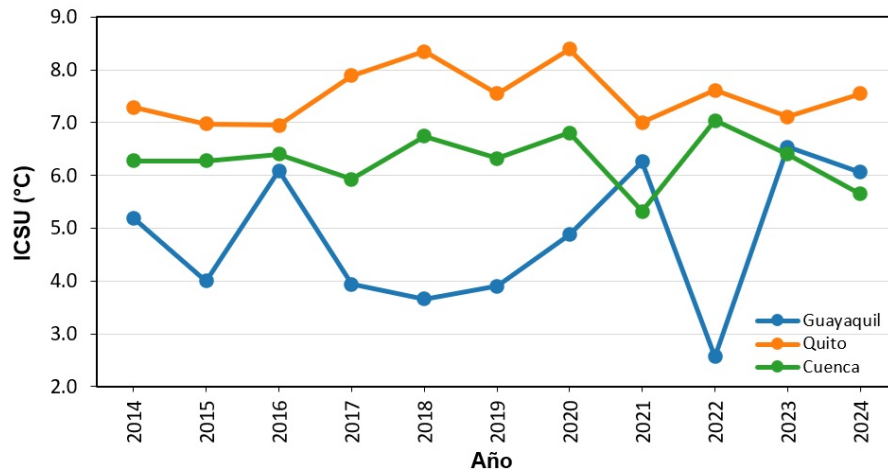


Fig. 4. Intensidad de isla de calor superficial, 2014–2024.

La Figura 4 muestra que Quito mantuvo los valores más altos y estables de ICSU, Cuenca presentó valores intermedios y Guayaquil evidenció mayor fluctuación interanual. Este comportamiento confirma que el contraste térmico fue más persistente en las ciudades andinas, mientras que la ciudad costera registró menor intensidad media y mayor variabilidad temporal. Las asociaciones entre variables se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Relación entre temperatura superficial, vegetación, superficie construida y variables meteorológicas, 2014–2024.

Ciudad	LST urbana–NDVI ρ_s (p)	LST urbana–NDBI ρ_s (p)	ICSU–temperatura del aire ρ_s (p)	ICSU–precipitación ρ_s (p)	ICSU–viento ρ_s (p)
Guayaquil	0,05 (0,894)	0,24 (0,484)	0,51 (0,110)	0,15 (0,670)	-0,33 (0,326)
Quito	-0,79 (0,004)	0,76 (0,006)	-0,44 (0,180)	-0,25 (0,467)	0,01 (0,979)
Cuenca	-0,45 (0,170)	0,66 (0,026)	-0,21 (0,537)	-0,04 (0,915)	-0,06 (0,853)
Conjunto	-0,46 (0,007)	0,59 (< 0,001)	-0,33 (0,058)	0,40 (0,022)	-0,57 (< 0,001)

El análisis de correlación mostró asociaciones diferenciadas entre los indicadores térmicos, espectrales y meteorológicos. Se consideraron asociaciones estadísticamente significativas aquellas con $p < 0,05$. Para cada ciudad se utilizaron 11 observaciones anuales; el conjunto integra 33 observaciones ciudad-año. En Quito, la temperatura superficial urbana presentó una relación negativa y significativa con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) urbano, y una relación positiva y significativa con el índice de diferencia normalizada de áreas construidas (NDBI) urbano. Este resultado es coherente con la evidencia que vincula la vegetación con menores temperaturas superficiales y las superficies impermeables o construidas con mayor acumulación de calor [7], [8], [13], [19]. En Cuenca también se observó una relación positiva significativa entre temperatura superficial urbana y NDBI urbano, lo que refuerza el papel de la cobertura construida en la configuración del calentamiento superficial urbano.

En Guayaquil, las asociaciones entre temperatura superficial urbana, índice de vegetación de diferencia normalizada e índice de diferencia normalizada de áreas construidas fueron débiles y no significativas. Este resultado no necesariamente contradice la relación esperada entre vegetación, urbanización y temperatura, sino que puede estar influido por la complejidad del entorno costero, la presencia de cuerpos

de agua, esteros, humedad atmosférica, coberturas mixtas y variabilidad de nubosidad. En ciudades con alta heterogeneidad superficial, los índices espectrales pueden capturar solo parcialmente los procesos físicos que modulan la temperatura superficial, por lo que su interpretación requiere considerar el contexto geográfico y climático.

Respecto a las variables meteorológicas de reanálisis, las relaciones entre la intensidad de isla de calor superficial y la temperatura del aire, precipitación o viento no fueron estadísticamente significativas al analizar cada ciudad por separado. Además, debe considerarse la diferencia de escala espacial entre Landsat y ERA5-Land. Mientras Landsat permitió analizar la variabilidad térmica superficial a resolución de 30 m, ERA5-Land aportó información meteorológica regional con una resolución aproximada de 9–11 km. Por tanto, las variables meteorológicas no representan condiciones microclimáticas intraurbanas, sino un contexto atmosférico general para interpretar la variabilidad térmica anual. Sin embargo, en el conjunto de las observaciones ciudad-año, la intensidad de isla de calor superficial se asoció positivamente con la precipitación y negativamente con la velocidad del viento. Las correlaciones calculadas para el conjunto se interpretaron como un análisis exploratorio complementario, debido a que integran ciudades con condiciones geográficas, altitudinales y climáticas diferentes. Por tanto, estas relaciones no deben entenderse como evidencia causal, sino como indicios de asociación general entre los indicadores térmicos, espectrales y meteorológicos considerados [15].

CONCLUSIONES

El estudio analizó la dinámica espacio-temporal de las islas de calor superficial en Guayaquil, Quito y Cuenca durante 2014–2024 mediante Landsat 8/9, indicadores de vegetación y superficie construida, y variables meteorológicas ERA5-Land. Los resultados evidenciaron LST urbana superior a la periurbana en las tres ciudades, con mayor intensidad media en Quito, seguida de Cuenca y Guayaquil. Este patrón confirma un contraste urbano-periurbano más marcado en las ciudades andinas, mientras que la ciudad costera presentó menor intensidad media y mayor variabilidad interanual.

Las relaciones entre temperatura superficial, vegetación y superficie construida fueron más claras en Quito y Cuenca. En Quito, la LST urbana se asoció negativamente con NDVI y positivamente con NDBI; en Cuenca, la relación significativa se presentó principalmente con NDBI. Estos resultados respaldan la importancia de la cobertura vegetal y de las superficies construidas en la configuración térmica urbana, aunque su efecto varía según el contexto geográfico, climático y topográfico de cada ciudad. Las variables meteorológicas no mostraron relaciones significativas por ciudad, pero aportaron un contexto regional útil para interpretar la variabilidad térmica anual.

Como limitación, la delimitación urbano-periurbana se basó en una máscara global constante y en ventanas espaciales definidas para cada ciudad, lo que favoreció la comparabilidad temporal, pero pudo simplificar procesos de expansión urbana, relieve, cuerpos de agua y coberturas mixtas. Además, ERA5-Land se utilizó como contexto meteorológico regional y no como medición intraurbana. Futuras investigaciones deberían incorporar límites urbanos más detallados, estaciones locales, modelos digitales de elevación, variables topográficas, zonas climáticas locales y análisis estacional diferenciado para separar con mayor precisión el efecto de la cobertura urbana y del relieve.

REFERENCIAS

- [1] T. R. Oke, "The energetic basis of the urban heat island," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 108, no. 455, pp. 1–24, 1982.
- [2] J. A. Voogt and T. R. Oke, "Thermal remote sensing of urban climates," *Remote Sensing of Environment*, vol. 86, no. 3, pp. 370–384, 2003.
- [3] D. Zhou *et al.*, "Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 1, 2018.
- [4] S. Peng *et al.*, "Surface urban heat island across 419 global big cities," *Environmental Science & Technology*, vol. 46, no. 2, pp. 696–703, 2011.
- [5] L. Zhao, X. Lee, R. B. Smith, and K. Oleson, "Strong contributions of local background climate to urban heat islands," *Nature*, vol. 511, no. 7508, pp. 216–219, 2014.
- [6] G. Manoli *et al.*, "Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population," *Nature*, vol. 573, no. 7772, pp. 55–60, 2019.

- [7] Q. Weng, D. Lu, and J. Schubring, "Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies," *Remote Sensing of Environment*, vol. 89, no. 4, pp. 467–483, 2004.
- [8] F. Yuan and M. E. Bauer, "Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in landsat imagery," *Remote Sensing of Environment*, vol. 106, no. 3, pp. 375–386, 2007.
- [9] J. C. Jimenez-Munoz, J. A. Sobrino, D. Skokovic, C. Mattar, and J. Cristobal, "Land surface temperature retrieval methods from landsat-8 thermal infrared sensor data," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, no. 10, pp. 1840–1843, 2014.
- [10] D. Baño, J. Salazar, and M. Delgado, "Remote sensing in the design of urban planning strategies, case study urban heat island of the metropolitan district of quito, ecuador," *Latin-American Journal of Computing*, vol. 5, no. 1, pp. 17–26, 2018. [Online]. Available: <https://doaj.org/article/2f70efe3c73243178289ed26349795d9>
- [11] J. Garzón, I. Molina, J. Velasco, and A. Calabia, "A remote sensing approach for surface urban heat island modeling in a tropical colombian city using regression analysis and machine learning algorithms," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 21, 2021.
- [12] T. Chakraborty and X. Lee, "A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 74, pp. 269–280, 2019.
- [13] J. Schwaab, R. Meier, G. Mussetti, S. Seneviratne, C. Bürgi, and E. L. Davin, "The role of urban trees in reducing land surface temperatures in european cities," *Nature Communications*, vol. 12, no. 1, 2021.
- [14] I. D. Stewart and T. R. Oke, "Local climate zones for urban temperature studies," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93, no. 12, pp. 1879–1900, 2012.
- [15] J. Muñoz-Sabater *et al.*, "ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications," *Earth System Science Data*, vol. 13, no. 9, pp. 4349–4383, 2021.
- [16] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, "Google earth engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone," *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, pp. 18–27, 2017.
- [17] X. Yu, X. Guo, and Z. Wu, "Land surface temperature retrieval from landsat 8 TIRS—comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method," *Remote Sensing*, vol. 6, no. 10, pp. 9829–9852, 2014.
- [18] S. B. Duan *et al.*, "Validation of landsat land surface temperature product in the conterminous united states using in situ measurements from SURFRAD, ARM, and NDBC sites," *International Journal of Digital Earth*, vol. 14, no. 5, pp. 640–660, 2021.
- [19] E. Massaro *et al.*, "Spatially-optimized urban greening for reduction of population exposure to land surface temperature extremes," *Nature Communications*, vol. 14, no. 1, 2023.