



# Persistencia espacio temporal en las Islas de Calor Urbana en el periodo 2020 - 2024 en las parroquias urbanas y periurbanas del Distrito Metropolitano de Quito

## **COLEGIO DE ARQUITECTOS DEL ECUADOR PROVINCIAL PICHINCHA**

Diego Ordoñez, Arq.

Presidente

## **ENTIDAD COLABORADORA DE PROYECTOS ECP**

Felipe Corral, Arq.

Director Ejecutivo

## **CENTRO DE INFORMACIÓN URBANA DE QUITO - CIUQ**

Paulina Cubillo B. Ing. MSc.

Coordinadora General

## **AUTORES**

Paulina Cubillo B. Ing. MSc.

Juan Fernando Vásquez V. Ing, Msg.

Santiago Bonilla C., Ing.



## Persistencia espacio temporal en las Islas de Calor Urbana en el periodo 2020 - 2024 en las parroquias urbanas y periurbanas del Distrito Metropolitano de Quito

### Cómo citar el contenido de este documento:

Cubillo Betancourt, P., Vásconez Velasco, J.F. y Bonilla Cáceres, S. (2025) *Persistencia espacio-temporal en las islas de calor urbanas en el periodo 2020–2024 en las parroquias urbanas y periurbanas del Distrito Metropolitano de Quito*. Informe técnico. Quito: Centro de Información Urbana de Quito CIUQ – Colegio de Arquitectos de Pichincha.

## Persistencia espacio temporal en las Islas de Calor Urbana en el periodo 2020 - 2024 en las parroquias urbanas y peri urbanas del Distrito Metropolitano de Quito

### Índice General

1.	Introducción .....	7
2.	Área de estudio y fuentes de datos .....	10
2.1.	Área de estudio .....	10
2.2.	Fuentes de datos.....	10
3.	Metodología .....	12
3.1.	Medición de Temperatura Superficial Terrestre y Albedo .....	12
3.2.	Preparación de los datos y estadísticas generales .....	13
3.3.	Análisis de tendencias de LST .....	15
3.4.	Correlación entre LST y Albedo.....	16
3.5.	Persistencia espacio-temporal.....	17
4.	Resultados y Discusión .....	18
4.1.	Estadísticas generales .....	18
4.2.	Hotspots .....	19
4.2.1.	Comportamiento quinquenal 2020 -2024 por zonas.....	19
4.2.2.	Cambios NETOS en temperatura superficial en el periodo 2020 - 2024 .....	21
4.3.	Albedo.....	29
4.3.1.	Comportamiento quinquenal 2020 -2024 de Albedo por zonas .....	29
4.4.	Análisis de tendencias de LST .....	32
4.5.	Correlación entre LST y Albedo.....	35
4.5.1.	Correlación LST- Albedo inversa ( r local negativo) .....	36
4.5.2.	Correlación LST- Albedo directa ( r local positivo).....	38
4.6.	Persistencia espacio temporal .....	40
4.6.1.	Meseta Central de Quito.....	41
4.6.2.	Valle de Tumbaco y Puembo .....	43
4.6.3.	Valle de Los Chillos .....	44
5.	Conclusiones .....	45
6.	Recomendaciones.....	48
7.	Bibliografía .....	50

## Índice de tablas

Tabla 1. Características de sensores utilizados en Google Earth Engine. ....	11
Tabla 2. Coeficientes ponderados para albedo. ....	12
Tabla 3. Estadísticas de 5 años LST y Albedo, Global para el área de estudio. ....	18
Tabla 4. Comparación de valores de albedo para el área de la Av. Colón, Norte de Quito. ....	31
Tabla 5. Comparación de valores de albedo para el área de la Ruta Viva, Tumbaco. ....	32

## Índice de figuras

Figura 1. Área de estudio con divisiones parroquiales (47 parroquias) .....	10
Figura 2. División del área de estudio en zonas determinadas. ....	15
Figura 3. Mapa de calor de temperatura superficial por zona y año (2020 - 2024) .....	20
Figura 4. Temperatura superficial LST 2020-2024. ....	21
Figura 5. Diferencias de temperatura superficial LST 2020-2024. ....	22
Figura 6. Diferencias de temperatura superficial LST 2024 -2020 Parroquias Tumbaco, Puembo, Yaruquí, Tababela. ....	23
Figura 7. Diferencias de temperatura superficial LST 2024 -2020 en parroquias urbanas de Quito. ....	26
Figura 8. Diferencias de temperatura superficial LST 2024 -2020 Valle de Los Chillos. ....	28
Figura 9. Mapa de calor de albedo por zona y año (2020 - 2024). ....	30
Figura 10. Comparación albedo Av. Colón, sector norte de Quito. ....	31
Figura 11. Comparación albedo Ruta Viva, parroquia de Tumbaco. ....	32
Figura 12. Análisis de tendencias. ....	33
Figura 13. Tendencias episódicas o sostenidas .....	34
Figura 14. Correlación entre Albedo y LST para el periodo 2020 -2024. ....	35
Figura 15. Persistencia de signo en la correlación entre Albedo y LST para el periodo 2020 - 2024. ....	36
Figura 16. Persistencia de signo en la correlación entre Albedo y LST para el periodo 2020 - 2024. ....	40
Figura 17. Persistencia espacio - Temporal meseta central de Quito. ....	42
Figura 18. Persistencia espacio - temporal Valle de Tumbaco y Puembo. ....	43
Figura 19. Persistencia espacio - temporal Valle de Los Chillos. ....	44

## Tabla de Abreviaturas

<b>Acrónimos</b>	<b>Denominación</b>
CIUQ	Centro de Información Urbana de Quito
DMQ	Distrito Metropolitano de Quito
ECP	Entidad Colaboradora de Proyectos
FONAG	Fondo para la Protección del Agua
GEE	Google Earth Engine
ICU	Islas de Calor Urbano
IDE	Entorno de Desarrollo Integrado
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
LCZ	Local Climate Zone
LST	Temperatura de la Superficie Terrestre
MDMQ	Municipio del Distrito Metropolitano de Quito
MSI	Instrumento Multiespectral
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDBI	Índice de Diferencia Normalizada Edificada
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
OLI	Imagador Operacional de la Superficie Terrestre
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PMDOT	Plan Metropolitano de Desarrollo de Ordenamiento Territorial
SAQ	Sistemas de Áreas de Quito
STHV	Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda
TIRS	Sensor Térmico Infrarrojo
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos

## **Persistencia espacio temporal en las Islas de Calor Urbana en el periodo 2020 - 2024 en las parroquias urbanas y peri urbanas del Distrito Metropolitano de Quito**

**Paulina Cubillo Betancourt<sup>1</sup>, Juan Fernando Vásconez Velasco<sup>2</sup>, Santiago Bonilla Cáceres<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Centro de Información Urbana de Quito (CIUQ), Colegio de Arquitectos de Pichincha, Quito, Ecuador

<sup>2</sup> Consultor independiente; colaborador externo de CIUQ, Quito, Ecuador

### **Resumen**

El estudio parte desde un análisis multitemporal con 5 años de datos de LST y Albedo; luego analiza si los valores calculados de LST constituyen o no una tendencia con una fuerza y significancia estadística y se corrobora si esa tendencia corresponde a un cambio sostenido, ó a un cambio episódico; posteriormente analiza la incidencia del albedo en la conformación de la Isla de Calor Urbana mediante un análisis de correlación, a fin de diferenciar qué tipo de intervención climática es más adecuada por sectores; y finalmente se analiza la estabilidad de los resultados para identificar sectores en donde los efectos son estructurales y dónde los efectos son temporales, y si los hotspots son nuevos, persistentes o intermitentes. Todo ello, permite validar si la existencia y persistencia de las Islas de Calor Urbana, es estadísticamente representativa. La investigación utiliza como insumos, imágenes satelitales, datos de uso y cobertura del suelo y pruebas geoestadísticas para validar los resultados.

El análisis de tendencias con el test de Mann-Kendall, determinó que predomina un calentamiento episódico (~80% del área), asociado a la variabilidad interanual y a eventos extremos recientes, sin configurar una tendencia monótona, además se establece que el incremento quinquenal oscila entre 1°C y 2°C. En relación a la incidencia del albedo en la conformación de la ICU se identificaron dos patrones: correlación negativa ( $r_{\text{local}} < 0$ ): en sectores donde un mayor albedo reduce la LST, confirmando su rol mitigador, especialmente en áreas urbanas con techos y pavimentos; y correlación positiva ( $r > 0$ ) en coberturas como bosques húmedos, eucaliptos y pastos (naturales y cultivados), donde la relación no se explica solo por el albedo, sino que se explica también por suelos secos, variabilidad estacional y limitaciones en la captación satelital de procesos subterráneos de enfriamiento.

En cuanto a la persistencia espacio-temporal, los resultados evidencian que las zonas de mayor persistencia térmica se localizan en la meseta central de Quito y en sectores de consolidación urbana de los valles de Tumbaco y Los Chillos, donde la urbanización acelerada ha reducido progresivamente la cobertura vegetal y aumentado la superficie impermeabilizada. Se observa una fuerte correlación negativa entre el albedo de las superficies urbanas y la temperatura superficial (LST): materiales constructivos de bajo albedo, como techos de hormigón, cubiertas metálicas y pavimentos asfálticos, registran incrementos de LST de hasta 16–18 °C en áreas de alta densidad. Por el contrario, los espacios verdes urbanos y periurbanos muestran un efecto mitigador, reduciendo la LST en hasta 5 °C en sectores con mayor cobertura arbórea. Estos hallazgos son consistentes con la literatura internacional (*Qian et al., 2019; Trlica et al., 2017; Zoran et al., 2023*), que subraya el papel del albedo y la vegetación como variables críticas en la regulación térmica urbana. Desde el enfoque de crecimiento urbano, los resultados revelan que la expansión dispersa hacia áreas rurales y corredores viales estratégicos (Ruta Viva, Autopista

General Rumiñahui, Av. Ilaló) ha generado patrones de ocupación lineales, fragmentando ecosistemas y ampliando la huella térmica del DMQ. La meseta central, en contraste, refleja un modelo de densificación vertical con alta compactación del suelo, lo que intensifica la acumulación térmica debido a la reducción de ventilación natural y al predominio de materiales oscuros. En conclusión, la investigación confirma que la interacción entre dinámicas urbanas, materialidad constructiva y pérdida de vegetación explica la persistencia de ICU en Quito. Los hallazgos sugieren la necesidad de estrategias integrales de adaptación basadas en la incorporación de materiales reflectivos, el incremento de superficies verdes y el control de la expansión urbana dispersa, con el fin de mejorar la resiliencia térmica y climática de la ciudad.

**Palabras Clave:** islas de calor urbano, albedo, temperatura superficial, persistencia espacio-temporal, crecimiento urbano, Mann-Kendall, Getis-Ord Gi\*, Quito.

## Abstract

The study begins with a multitemporal analysis with five years of LST and albedo data; it then analyzes whether the calculated LST values constitute a trend with statistical strength and significance, and corroborates whether this trend corresponds to a sustained or episodic change. It then analyzes the impact of albedo on the formation of urban heat islands through correlation analysis, in order to differentiate which type of climate intervention is most appropriate for each sector. Finally, it analyzes the stability of the results to identify sectors where the effects are structural and where the effects are temporary, and whether the hotspots are new, persistent, or intermittent. All of this allows us to validate whether the existence and persistence of urban heat islands is statistically representative. The research uses satellite images, land use and land cover data, and geostatistical tests as inputs to validate the results.

Trend analysis using the Mann-Kendall test determined that episodic warming predominates (~80% of the area), associated with interannual variability and recent extreme events, without forming a monotonous trend. It also established that the five-year increase oscillates between 1 and 2°C. Regarding the impact of albedo on the formation of the UCI, two patterns were identified: negative correlation (local  $r < 0$ ): in sectors where a higher albedo reduces the LST, confirming its mitigating role, especially in urban areas with roofs and pavements; and positive correlation ( $r > 0$ ) in cover areas such as humid forests, eucalyptus trees, and pastures (natural and cultivated), where the relationship is not only explained by albedo, but is also explained by dry soils, seasonal variability, and limitations in satellite capture of underground cooling processes.

Regarding spatiotemporal persistence, the results show that the areas with the greatest thermal persistence are located in the central plateau of Quito and in urban consolidation areas of the Tumbaco and Los Chillos valleys, where accelerated urbanization has progressively reduced vegetation cover and increased the impervious surface. A strong negative correlation is observed between the albedo of urban surfaces and surface temperature (LST): low-albedo building materials, such as concrete roofs, metal roofs, and asphalt pavements, record LST increases of up to 16–18 °C in high-density areas. In contrast, urban and peri-urban green spaces show a mitigating effect, reducing LST by up to 5 °C in areas with greater tree cover. These findings are consistent with the international literature (Qian et al., 2019; Trlica et al., 2017; Zoran et al., 2023), which highlights the role of albedo and vegetation as critical variables in urban thermal

regulation. From an urban growth perspective, the results reveal that dispersed expansion into rural areas and strategic road corridors (Ruta Viva, General Rumiñahui Highway, Ilaló Avenue) has generated linear occupation patterns, fragmenting ecosystems and expanding the thermal footprint of the DMQ. The central plateau, in contrast, reflects a vertical densification model with high soil compaction, which intensifies thermal accumulation due to the reduction of natural ventilation and the predominance of dark materials. In conclusion, the research confirms that the interaction between urban dynamics, construction materials, and vegetation loss explains the persistence of ICU in Quito. The findings suggest the need for comprehensive adaptation strategies based on the incorporation of reflective materials, increased green areas, and control of urban sprawl to improve the city's thermal and climate resilience.

**Key words:** urban heat islands, albedo, land surface temperature, spatio-temporal persistence, urban growth, Mann-Kendall, Getis-Ord  $G_i^*$ , Quito.



## **Persistencia espacio temporal en las Islas de Calor Urbana en el periodo 2020 - 2024 en las parroquias urbanas y peri urbanas del Distrito Metropolitano de Quito**

**Paulina Cubillo Betancourt<sup>1</sup>, Juan Fernando Vásconez Velasco<sup>2</sup>, Santiago Bonilla Cáceres<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Centro de Información Urbana de Quito (CIUQ), Colegio de Arquitectos de Pichincha, Quito, Ecuador

<sup>2</sup> Consultor independiente; colaborador externo de CIUQ, Quito, Ecuador

### **1. Introducción**

El Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) atraviesa un proceso acelerado de crecimiento urbano y poblacional que ha transformado de manera significativa su territorio en las últimas décadas. Con una población de 2'679.722 habitantes en 2022 (*INEC, 2022*) y una superficie de 420.091 hectáreas, la ciudad enfrenta presiones constantes sobre su suelo urbano, que representa apenas el 10,33% del total (*PMDOT, 2024*). El aumento poblacional, que en la última década alcanzó un promedio anual de 1,83%, ha derivado en un proceso de expansión hacia zonas rurales en consolidación, generando una demanda creciente de suelo y provocando que el área urbana se duplique, con cerca de 20.000 hectáreas adicionales destinadas a usos residenciales y de servicios (*PMDOT, 2024*).

Este crecimiento ha implicado la pérdida de importantes coberturas naturales. Entre 1986 y 2013, la ciudad perdió alrededor de 29.300 hectáreas de cobertura boscosa debido a la expansión de la frontera agrícola y urbana, así como a la explotación de canteras y minas, lo que equivale a una deforestación promedio de 1.786 hectáreas por año (*MDMQ, 2016*). De manera más reciente, entre 2013 y 2022 se reportó la pérdida de 26.937 hectáreas del patrimonio natural, equivalente al 10% del total, con proyecciones que estiman una disminución de 80.811 hectáreas al 2050 si persisten las tendencias actuales (*SAQ-FONAG, 2022*). Estas transformaciones reducen la capacidad del territorio de regular el clima urbano, intensificando fenómenos como las islas de calor.

Así, los efectos de la urbanización y el cambio climático convergen de manera alarmante (*ONU HABITAT 2011*), pues las ciudades son responsables de gran parte del cambio climático, pese a que ocupan solamente el 2% de la superficie terrestre, consumen cerca del 78% de la energía mundial y generan más del 60% de las emisiones de dióxido de carbono y una proporción considerable de gases de efecto invernadero.

Tal y como señala el Centro de Información Urbana de Quito (2020), las superficies impermeables como asfalto y concreto almacenan grandes cantidades de calor; lo propio ocurre con la vegetación seca y suelo descubierto, que pese a ser superficies permeables, tienden a tener el mismo comportamiento termal o incluso mayor que el asfalto y concreto, como es el caos de las zonas La Delicia y San Blas, en las que la temperatura de la superficie terrestre (LST) se incrementó entre 0.26°C y 1°C.

Así, la dinámica del calor urbano, se ve influenciada por la temperatura de los pavimentos asfálticos, y su respectiva características térmicas del material, pues la transferencia de energía

de los pavimentos calientes al aire circundante se rige por los gradientes de temperatura y la convección.

Otro aspecto relevante, constituye la aplicación de un recubrimiento reflectante, ya que éste tiene el potencial de elevar sustancialmente los valores de albedo, con un aumento observado de hasta 0,60 (*Sen et al., 2019*). El albedo se refiere a las propiedades reflectantes de una superficie, específicamente su capacidad para reflejar la luz solar. El albedo del pavimento asfáltico juega un papel determinante en la cantidad de energía solar que refleja la superficie. Cuanto mayor sea el valor de albedo, más luz solar refleja un pavimento. La calidad reflectante es particularmente importante en el pavimento asfáltico termorreflectivo, ya que ayuda a reducir la temperatura de la superficie del pavimento, evitando que el pavimento absorba y retenga calor excesivo (*Jiang et al., 2020*).

Otro factor determinante es la pérdida de áreas verdes. La sustitución de cobertura vegetal por superficies impermeables disminuye la evapotranspiración y limita la capacidad de enfriamiento natural de la ciudad. En las parroquias urbanas más consolidadas, así como en zonas rurales en transición urbana, la fragmentación de remanentes de bosque y la reducción de espacios arbolados incrementan la magnitud y extensión de las Islas de Calor Urbana (ICU).

La reducción de áreas verdes urbanas también influye en el incremento de temperaturas. A pesar de que en 2023 se contabilizaron 831 parques que cubren 3.239 hectáreas, lo que representa el 46,3% del espacio público, esta superficie resulta insuficiente frente a la acelerada expansión urbana (*Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda & ONU-Habitat, 2023*). La pérdida y deterioro de quebradas urbanas, como Guangahuayco y El Tejado, refleja cómo la ocupación del suelo ha afectado no solo los servicios ecosistémicos, sino también la conectividad ecológica y los mecanismos naturales de regulación hídrica y térmica (*PMDOT, 2024*). La disminución de la cobertura vegetal limita la capacidad de enfriamiento de la ciudad, contribuyendo al incremento sostenido de la temperatura.

Según señala *Maigua (2020)*, en la ciudad de Quito el 46% de la ciudad responde a una morfología urbana *Compacta y de baja altura* denominada LCZ3, que se caracteriza por tener un 78% de cobertura de superficie ocupada por edificaciones, y un 8% de superficie permeable, lo que implica que existe una escasez en la evapotranspiración, y consecuentemente aporta a la isla de calor urbana. La misma autora, señala que en las zonas consolidadas, el segundo prototipo de morfología urbana corresponde a *Compacto de media altura* (LCZ2), con una presencia en el 7.45% en el territorio; que al igual que la LCZ3, existe una carencia de vegetación baja y arborización urbana y consecuentemente una evapotranspiración baja aportando a las ICU. El tercer prototipo presente en la ciudad es el *Alargado de baja altura*, que se caracteriza por tener gran presencia de suelo impermeable y uso de materiales de construcción como el acero, cemento, pavimentos con bajo albedo, y que representan el 6.15% de la ciudad.

Para el caso de prototipos de cobertura superficie llamados LCZ desde A hasta G, *Maigua (2020)* señala que en la ciudad de Quito, el prototipo LCZ-B representa el 18% de la superficie de Quito y corresponde a árboles dispersos que se concentran en los parques metropolitanos de la ciudad;

no obstante estos prototipos únicamente regulan la temperatura superficial de su entorno inmediato; para el caso del prototipo LCZ-D, este se encuentra en el 9.80% de la ciudad y corresponde a vegetación baja, que contribuye a la regulación de la LST y permite la circulación de vientos. El prototipo LCZ-G, corresponde a la presencia de agua y en Quito se encuentra únicamente en un 0.02%, por lo que no interviene en la regulación del clima urbano.

El crecimiento poblacional es otro factor que ha intensificado la presión sobre el territorio y el microclima urbano. La expansión hacia zonas rurales ha incrementado la proporción de población en estos sectores hasta un 33,7%, con proyecciones que podrían alcanzar el 37% en la próxima década (*STHV, 2021*). Este crecimiento expansivo y fragmentado, caracterizado por urbanizaciones de baja densidad y usos mono-funcionales, ha fomentado una ocupación insostenible del suelo y la consolidación de asentamientos en áreas de riesgo. A su vez, la demanda de servicios, transporte y energía incrementa el calor antropogénico, reforzando los efectos de las islas de calor.

En conjunto, el crecimiento de la mancha urbana, la pérdida de áreas verdes y el aumento poblacional explican el incremento de las temperaturas en Quito y la persistencia de las islas de calor urbano entre 2020 y 2024. Estos fenómenos no solo modifican el clima local, sino que también exacerban las condiciones de vulnerabilidad de la población, especialmente en sectores periféricos con déficit de infraestructura verde y exposición a riesgos naturales. La evidencia resalta la necesidad de integrar políticas de gestión territorial y adaptación climática que permitan mitigar estos impactos y avanzar hacia un modelo de ciudad más compacta, resiliente y sostenible.

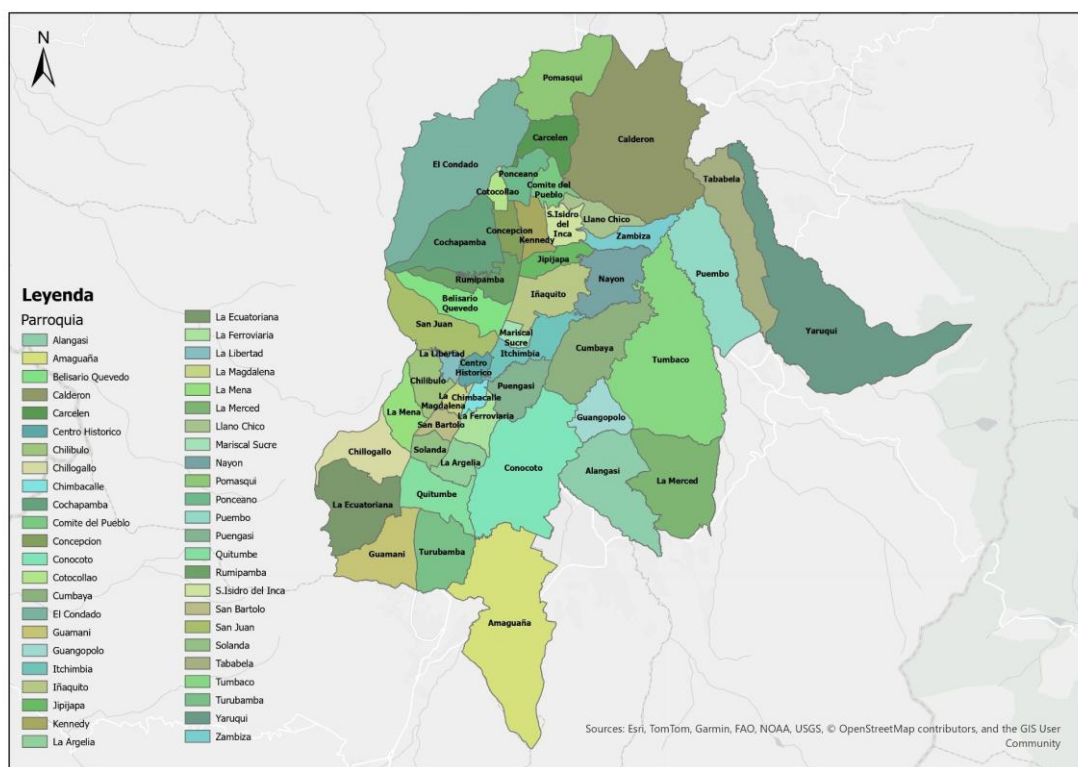
Si bien existen varios estudios que muestran que a más del albedo existen otros factores ambientales urbanos, que aportan a la conformación de las ICU, el presente estudio busca analizar la relación entre la temperatura superficial LST y albedo en el último quinquenio, a fin de establecer - en primera instancia- si existe una relación estadística, y conocer dónde y cómo se manifiesta esa relación en el territorio, y finalmente determinar si existe tendencia espacio-temporal en el periodo 2020 - 2024, en las parroquias urbanas y peri urbanas del Distrito Metropolitano de Quito.

## 2. Área de estudio y fuentes de datos

### 2.1. Área de estudio

El área de estudio la comprenden las 32 parroquias urbanas del DMQ y 15 parroquias rurales (Alangasí, Amaguaña, Calderón, Conocoto, Cumbayá, Guangopolo, La Merced, Llano Chico, Nayón, Pomasqui, Puembo, Tababela, Tumbaco, Yaruqui, Zambiza), que se encuentran en proceso de consolidación, para un total de 47 parroquias contenidas en 88.341,44 hectáreas. Se analizan datos de 2020 al 2024, para el mes de agosto.

**Figura 1.** Área de estudio con divisiones parroquiales (47 parroquias)



Fuente: MDMQ (2025). Elaboración: CIUQ (2025)

### 2.2. Fuentes de datos

En los últimos años, la facilidad de acceso a información satelital ha ido en crecimiento, por la aparición de nuevas plataformas en la web, con altos volúmenes de información, alta resolución espacial y temporal. Esta es la razón por la cual la tecnología en la nube ha tenido un avance significativo. Algunas plataformas son desarrolladas por agencias espaciales nacionales, comunidades de usuarios *open source* (software libre) y empresas privadas que tienen la capacidad económica para optimizar la distribución de datos y capacidades de procesamiento, al

mismo tiempo que optimizan los flujos de trabajo de tal manera que todo tipo de usuario tiene la capacidad de procesar información con estas herramientas (Ravanelli *et al.*, 2018).

En este contexto, la plataforma utilizada para el presente estudio debido a su versatilidad, facilidad de acceso, alta disponibilidad de información y procesamiento en la nube, fue Google Earth Engine (GEE) (<https://earthengine.google.com/>). Esta plataforma tiene en su núcleo una disponibilidad de datos que se mide en petabytes, permitiendo diferentes tipos de análisis dependiendo la necesidad (Gorelick *et al.*, 2017). En el presente estudio, se utilizó sensores remotos para imágenes Landsat-8 y Sentinel-2, las características de dichos sensores se encuentran en la Tabla 1:

**Tabla 1.** Características de sensores utilizados en Google Earth Engine.

Característica	Landsat 8	Sentinel-2
Sensor	USGS Landsat 8 Level 2, Collection 2, Tier 1	Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A (SR)
Fuente	Servicio Geológico de los Estados Unidos	Agencia Espacial Europea
Resolución espacial	30 metros	20 metros
Resolución temporal	16 días	5 días
Corrección atmosférica	Sí	Sí
Corrección radiométrica	Sí	Sí
Desde	2013-03-18	2017-03-28
Hasta	Actualidad	Actualidad

Fuente: Roteta *et al.*, (2021). Elaboración: CIUQ (2025)

Para Landsat 8, se utilizó los datos de Landsat-8 OLI/TIRS, los cuales tienen ya establecida una corrección atmosférica y radiométrica de la superficie, este sensor está diseñado para llevar un OLI (*Operational Land Imager*, por sus siglas en inglés) que tiene una capa de infrarrojo cercano y siete bandas visibles reflectantes. Cabe señalar que estas bandas son capaces de reflejar las longitudes de onda emitidas por los objetos en la superficie terrestre, con la misma resolución de 30 metros (Utama *et al.*, 2024). Con respecto a Sentinel-2, GEE pone a disposición un conjunto de datos armonizados del instrumento multispectral S2 (MSI) para mantener la coherencia de las imágenes S2 recién procesadas con las escenas más antiguas (Berra *et al.*, 2024). Así, se garantiza la calidad de los insumos adquiridos para análisis urbano y toma de decisiones.

### 3. Metodología

#### 3.1. Medición de Temperatura Superficial Terrestre y Albedo

Las islas de calor se definen como la ocurrencia de altas temperaturas en regiones urbanas en comparación con zonas aledañas (*Yin et al.*, 2018). Este fenómeno urbano se determina a través de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST, por sus siglas en inglés). El cálculo de LST se hizo a través de un algoritmo desarrollado por el Instituto Tecnológico de Rochester y el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA. En donde, la banda infrarroja térmica de los productos de Landsat de nivel 2 se corresponde directamente con la temperatura de superficie, sin embargo, este resultado se obtiene en unidades Kelvin de temperatura. Así, la conversión a Celsius se hace con un cálculo de conversión (Ecuación 1).

$$LST = DN \cdot 0.00341802 + 149 - 273.15 \quad (1)$$

Donde DN corresponde al valor de píxel que tiene la colección de imágenes de Landsat.

Por otro lado, el albedo se define como el coeficiente de refracción de una superficie y es definido como la relación entre la radiación reflejada en una superficie y la radiación incidente, por lo tanto, su incidencia oscila de 0 a 1 (*Andrés et al.*, 2023). Ahora, para el cálculo de albedo, se utilizó la metodología de la investigación de *Vanino et al.* (2018), en donde se establece al albedo de superficie de banda ancha como la integración de la reflectancia en superficie a lo largo del espectro de onda corta y se la calcula mediante la aplicación de pesos ponderados para cada una de las bandas de interés (Ecuación 2).

$$\alpha = \sum_{bi} |\rho_{bi} \cdot \omega_{bi}| \quad (2)$$

Donde  $\rho_{bi}$  es la reflectancia superficial por una banda  $bi$  determinada en el nivel 2A de reflectancia superficial de Sentinel-2A,  $\omega_{bi}$  corresponde al coeficiente de ponderación que representa la fracción de radiación solar derivada del espectro de irradiancia solar (*Thuillier et al.*, 2003). Entonces, dentro del rango espectral para las bandas Sentinel, se calcula esta ponderación con la Ecuación 3.

$$\omega_{bi} = \frac{\int_{LO_{bi}}^{UP_{bi}} R_{s\lambda} \cdot d\lambda}{\int_{0.4}^{2.4} R_{s\lambda} \cdot d\lambda} \quad (3)$$

Donde  $R_{s\lambda}$  es la irradiancia extraterrestre para la longitud de onda  $\lambda$  (um), mientras que  $UP_{bi}$  y  $LO_{bi}$  corresponden a los límites superior e inferior de la longitud de onda de la banda  $bi$  de Sentinel-2A. Entonces, en la Tabla 2 se representan las bandas y pesos ponderados para el cálculo de albedo.

**Tabla 2.** Coeficientes ponderados para albedo.

Banda (Sentinel - 2A)	$\omega_{bi}$
1	-



Banda (Sentinel - 2A)	$\omega_{bi}$
2	0.1324
3	0.1269
4	0.1051
5	0.0971
6	0.0890
7	0.0818
8	0.0722
8a	-
9	-
10	-
11	0.0167
12	0.0002

Fuente: *Vanino et al. (2018)*. Elaboración: CIUQ (2025)

### 3.2. Preparación de los datos y estadísticas generales

A partir de los datos obtenidos para LST y albedo, se realizaron varios análisis geo estadísticos que permitan establecer conclusiones respecto a tendencias territoriales; correlación entre LST y albedo, y persistencia de la Isla de Calor en el quinquenio 2020 -2024. Todos los cálculos se realizaron a través del lenguaje de programación R (versión 4.3.3) en el entorno de desarrollo integrado (IDE) de RStudio.

Dado que los datos provienen de diversos sensores (Landsat y Sentinel), las resoluciones de los productos raster generados son distintos: 30m para Landsat y 20 m para Sentinel. Para poder realizar operaciones geoestadísticas, se realizó una alineación de todas las capas ráster a fin de homologarlas a 30 m, utilizando el método “bilinear”. Una vez alineadas y estandarizadas, se genera una aplicación (stack) con los datos alineados de los 5 años disponibles tanto para albedo como para LST, que permite obtener estadísticas generales por cada año y calcular la relación entre LST y albedo.

Dada la amplitud del territorio a analizarse, para la presente investigación, el área de estudio fue clasificada en cuatro zonas homogéneas que muestran patrones característicos en el contexto de desarrollo urbano y de acuerdo al modelo policéntrico que plantea el Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Distrito Metropolitano de Quito, 2024 - 2033. La descripción de cada una se presenta a continuación:

**Zona 1 - Meseta central de Quito.** Comprende el núcleo urbano y el hipercentro del Distrito Metropolitano, concentrando la mayor densidad poblacional, de equipamientos y de edificaciones. En este espacio, el desarrollo constructivo ha alcanzado niveles significativos, generando una fuerte impermeabilización del suelo debido al predominio de materiales como el hormigón y el asfalto. La cobertura vegetal se ha reducido a parques históricos y recreacionales, lo que contrasta con otras zonas del DMQ. En cuanto a centralidades, destacan las de carácter metropolitano como La Carolina, Mariscal, Bicentenario y el Centro Histórico, que combinan

funciones residenciales, comerciales, culturales y turísticas; junto a centralidades zonales como Chimbacalle, Solanda y Río Coca, que actúan como nodos de conectividad y abastecimiento (*Distrito Metropolitano de Quito, 2024*).

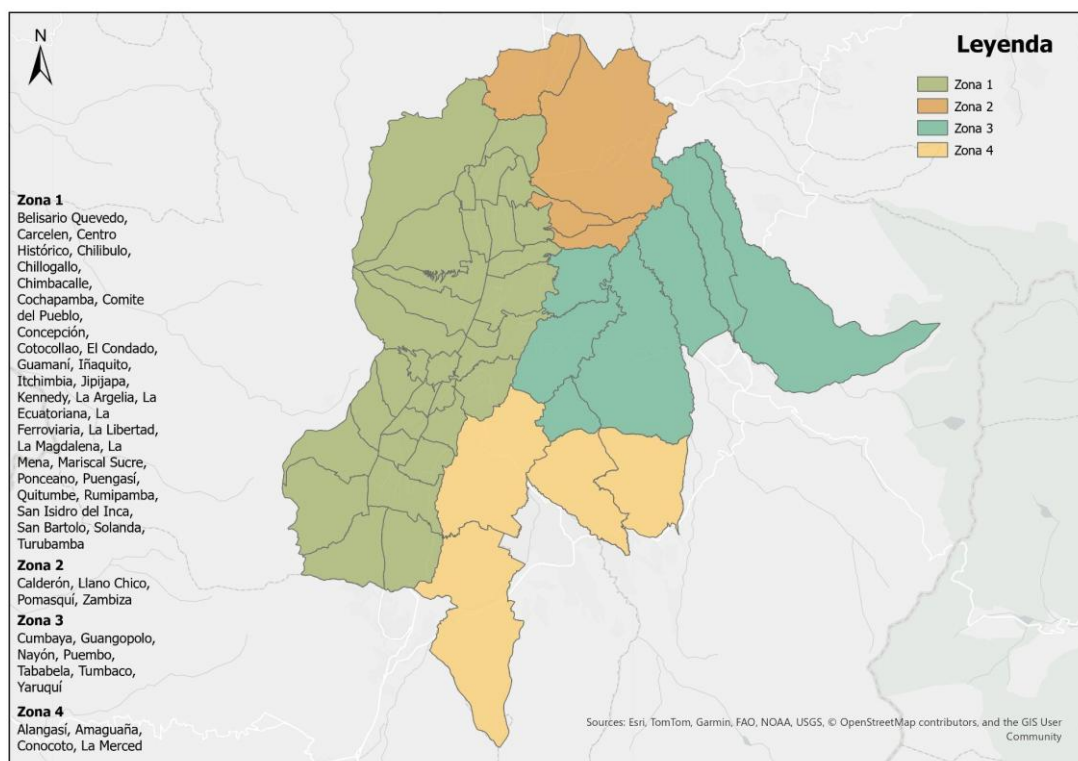
**Zona 2 - Calderón, Llano Chico y Pomasquí.** Corresponde a los sectores de Calderón, Llano Chico y Pomasquí, que se caracterizan por ser un áreas de expansión poblacional con un desarrollo urbano heterogéneo. Presentan una trama menos densa que la meseta central, donde conviven lotes baldíos, áreas agrícolas y ganaderas junto a zonas residenciales. La centralidad de Calderón se proyecta como un punto estratégico de servicios, abastecimiento y equipamiento de salud, con potencial para consolidarse mediante la provisión de vivienda social y el fortalecimiento de dinámicas culturales locales. Por su parte, Carapungo se configura como un nodo de conexión gracias al intercambiador vial que lo enlaza con la Av. Simón Bolívar y la Panamericana Norte, consolidando su vocación residencial y comercial. En el mediano plazo, se espera que estas centralidades diversifiquen su oferta de actividades económicas y equipamientos, contribuyendo a contener la expansión informal y a promover un desarrollo urbano ordenado (*Distrito Metropolitano de Quito, 2024*).

**Zona 3 - Valles de Tumbaco y Puembo.** Representan áreas de conurbación reciente, donde el crecimiento urbano ha sido impulsado por nuevos ejes viales y políticas normativas favorables. Su desarrollo se caracteriza por densidades bajas, aunque con una creciente atracción de actividades y residentes, especialmente en Cumbayá y Tumbaco. La centralidad de Cumbayá, reconocida por su historia, identidad y equipamientos educativos como la Universidad San Francisco, se configura como un nodo empresarial y cultural en expansión. Asimismo, San Patricio, definido como subcentralidad en el marco del Plan Metropolitano y con el apoyo del PUAE aprobado en 2019, constituye un espacio con alto potencial inmobiliario, conectado estratégicamente a la Ruta Viva, lo que facilitará la consolidación de actividades comerciales y residenciales en los próximos años (*Distrito Metropolitano de Quito, 2024*).

**Zona 4 - Valle de Los Chillos.** Comprende las cabeceras urbanas como Sangolquí y Conocoto, se ha consolidado como un espacio de densidad media, orientado principalmente a actividades residenciales y comerciales. La centralidad de Conocoto presenta una amplia cobertura de servicios de transporte, salud y educación, además de áreas verdes y patrimonio histórico. Su condición de cabecera parroquial, junto a su cercanía al cantón Rumiñahui y al nodo de El Triángulo, refuerza la importancia de la cooperación intermunicipal para el desarrollo de dinámicas urbanas conjuntas. La proyección de esta zona a 10 años plantea un mayor equilibrio entre actividades residenciales, comerciales y de servicios, priorizando la ocupación de áreas bien servidas y el fortalecimiento del damero histórico como núcleo articulador (*Distrito Metropolitano de Quito, 2024*).



**Figura 2.** División del área de estudio en zonas determinadas



Fuente: MDMQ (2025). Elaboración: CIUQ (2025)

Para analizar el comportamiento quinquenal 2020-2024, se obtuvieron valores de LST y albedo mediante técnicas de teledetección. A partir de estos datos, se generaron gráficos para visualizar la evolución anual de ambas variables a partir de técnicas estadísticas y geostadísticas.

Adicionalmente, se calculó el **cambio neto** de temperatura restando los valores de LST de 2020 a los de 2024. Este análisis permite cuantificar las variaciones térmicas y corroborar si los incrementos o decrementos de temperatura corresponden a una **tendencia sostenida** (un cambio gradual y constante) o a un fenómeno **episódico** (una fluctuación puntual dentro del período).

### 3.3. Análisis de tendencias de LST

Al contar con información de 5 años de temperatura superficial LST, se busca comprender si los resultados obtenidos, constituyen o no una tendencia (creciente o decreciente), y si dicha tendencia es significativa o no.

*Polydoros et al.* (2018) han demostrado tendencias LST y significancia con el método de **Mann-Kendall**, realizando cálculos pixel a pixel. Así, para el presente estudio, se analizarán tendencias anuales y sus respectivas magnitudes aplicando tres estimadores:

- *Thau de Kendall* ( $\tau$ ), que mide la fuerza y dirección de la tendencia, independientemente de la escala.
- *Significancia*: (p- valor), que mide si los resultados son estadísticamente significativos.
- *Pendiente de Theil-Sen* ( $\text{sen}$ ): que mide la magnitud del cambio, y representa a la mediana de todas las pendientes del fenómeno estudiado. En este estudio, representa la magnitud de cambio, en grados celsius por cada año.

El método de Mann-Hendall se define de la siguiente manera:

Sean  $x_1, x_2, \dots, x_n$  un conjunto de  $n$  datos ordenados en un tiempo  $j$ , donde  $x_j$  es el dato en el tiempo. Entonces, el estadístico de Mann-Kendall  $S$  viene dado por:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (4)$$

Donde la función **sign** se define como:

$$\text{sign}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1, & \text{si } x_j - x_k > 0 \\ 0, & \text{si } x_j - x_k = 0 \\ -1, & \text{si } x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Un valor muy alto y positivo de  $S$  indica una tendencia creciente, y un valor muy bajo (negativo) indica una tendencia decreciente, no obstante, se requiere analizar los resultados de los p-valores para reafirmar los resultados.

Todo el cálculo se realiza con el apoyo de un algoritmo realizado en R, que: a) carga el stack de 5 bandas; b) convierte a una matriz con una fila por pixel y una columna por fecha, de tal forma que cada fila constituye una serie temporal de un pixel. Se valida si existen más de 3 años con datos para definir una tendencia; c) calcula Mann Kendall y sus estimadores; ( $\tau$ ) y significancia d) calcula la pendiente de Sen y; e) devuelve un vector final que contiene *tau*, *p*, *sen* por cada pixel. Como resultado, arroja tres mapas para LST: **fuerza/dirección** ( $\tau$ ), **significancia** ( $p$ ) y **magnitud** ( $\text{Sen}$ ).

Finalmente los resultados obtenidos del test de **Mann-Kendall** se combinan con los resultados de los mapas de **Cambio Neto** (sección 4.2.2) para corroborar la existencia de una tendencia sostenida o episódica en los cambios de temperatura, sean éstos positivos (incrementos de temperatura) ó negativos (decremento de temperatura).

### 3.4. Correlación entre LST y Albedo

Existen varios trabajos que analizan la relación entre albedo y LST. Según *Trlica et al. (2017)*, la relación esperada es inversa (a mayor albedo, menor LST), sin embargo su magnitud varía dependiendo del contexto del territorio, siendo que aspectos como lo materiales, la sombra, humedad, época del año, morfología urbana, entre otros, pueden modificar esta relación. Por

otra parte, *Zoran et al. (2024)*, determinó que pueden existir correlaciones fuertes en cubiertas industriales en verano, así como casos de correlaciones débiles en tejido mixto urbano. También en el estudio realizado por *Zoran et al. (2024)*, se determinó que existen correlaciones altas en escenarios controlados o periodos críticos, pero no constituyen un comportamiento general en el tejido urbano.

Por otro lado *Qian et al. (2023)*, en su estudio sobre la sensibilidad de la LST a la vegetación en Beijing-China, utilizan el método de ventana móvil en el espacio, asumiendo que el píxel objetivo, posee un clima comparable al de los píxeles vecinos dentro de la ventana móvil, permitiendo obtener una relación espacio-tiempo. Este estudio señala que la escala espacial de cálculo cambia al variar el tamaño del vecindario, es decir el tamaño de la ventana, estableciendo que el tamaño óptimo de ventana, oscila entre 210 y 270 metros.

Adicionalmente, *Naserikia et al. (2022)* en su estudio sobre el impacto de la cobertura terrestre en la temperatura de la superficie urbana, establecen que los valores  $r$  locales entre albedo y LST pueden ser bajos, debido a la presencia de otros factores como NDVI/NDBI, morfología urbana, entre otros, que explican gran parte de la varianza de LST, lo que implica que valores de  $r$  locales alrededor de 0.20, constituyen efecto típico, y estableciendo este valor como un umbral de relevancia. Así mismo, *Gignac & Szodorai (2016)*, en su estudio de correlación del LST con albedo para el análisis de Islas de Calor Urbana, establecen los valores de  $r \approx .10/.20/.30$  como pequeño/típico/grande en ciencias empíricas. Finalmente *Khalid, W., Shamim, S.K. y Ahmad, A. (2024)*, en su estudio sobre la exploración de la temperatura superficial del suelo urbano con técnicas de modelado geoespacial, establecen recomendaciones prácticas sobre interpretar tamaños de efecto;  $r \approx .20$  como “típico/mediano”.

Con base en los trabajos de *Trlica et al. (2017)* y *Zoran et al. (2024)*, se utilizó la correlación espacial entre albedo y LST para analizar estadísticamente las ICU. Para el efecto, se calculó un  $r$  local por ventana móvil *Qian et al. (2023)* para cada año, con una ventana circular móvil de radio de 270 metros, a fin de mapear los sectores en los que la relación es más o menos fuerte o si cambia de signo. Posteriormente se calcula un promedio de las correlaciones de los 5 años y se analiza la persistencia del signo para obtener las zonas en las que en los 5 años la relación fue positiva, y los sectores en las que la relación fue negativa.

Finalmente, y según señala *Naserikia et al. (2022)*, *Gignac & Szodorai (2016)*, y *Khalid, W., Shamim, S.K. y Ahmad, A. (2024)*, se establece como umbral de relevancia un valor de  $r$  local de 0.20, para determinar las zonas que presentan un efecto positivo o negativo entre albedo y LST.

### 3.5. Persistencia espacio-temporal

Con la finalidad de identificar si existen zonas de mayor temperatura superficial, y si éstas han mantenido su condición a lo largo de los cinco años, se realizó un análisis de puntos calientes (HotSpots) a partir las capas de LST, mediante el método de *Getis-Ord-Gi\**. Este método permite detectar sectores significativos con valores altos (Hotspots) significativos, comparando la

intensidad de la temperatura superficial de un pixel y su vecindario, con la expectativa global, y su resultado se reporta como un *z-score*, *Getis, A. & Ord, J.K. (1992)*.

El estadístico Getis-ord local, está dado por:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{\sqrt{\left[ n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - \left( \sum_{j=1}^n w_{i,j} \right)^2 \right] / (n-1)}} \quad (6)$$

Para este estudio, se establece un umbral de  $z > 1.96$  que representa un nivel de confianza del 95%. El cálculo se realiza para cada año y por cada celda, obteniéndose un mapa binario de hotspots anuales. La suma resultante de cada mapa en cada año y celda, permite medir la **persistencia** (número de años con hotspot significativo) del hotspot. Este resultado nos permite localizar **concentraciones espaciales** de valores altos y su **recurrencia** en el tiempo, aportando una base objetiva para priorizar intervención o monitoreo.

Para el efecto y con la ayuda de R, se crea un algoritmo que: a) usa como insumo el stack raster multitemporal de los 5 años con datos de LST; b) a partir de este stack, se calculan pesos espaciales de cada píxel con una distancia fija, en este caso una matriz de 3 x 3; c) se construye una matriz de pesos binarios para cada celda; d) se calcula  $G_i^*$  para cada celda con un umbral de  $z > 1.96$ , y se calcula el p-valor. Para el cálculo de la **persistencia temporal**, se convierte en binario a cada mapa con un  $z > 1.96$  y se suman los años, resultando en un mapa de valores enteros que indica en cuántos periodos, una celda fue un Hotspot, dando como resultados sectores con Hotspots *nuevos*, *persistente*, *intermitente*. El resultado, es un raster con los valores enteros en rangos de 1 al 5.

## 4. Resultados y Discusión

### 4.1. Estadísticas generales

Tal y como se observa en la Tabla 3, el año con el valor más alto promedio de temperatura superficial corresponde al 2024 con 35.33°C, en tanto que el año más fresco es el 2021 con 27.39°C. Los resultados de anuales promedio, sugieren una tendencia al alta de aproximadamente 1.0 °C, pero con una alta variabilidad interanual.

Para el caso del albedo, éste se presenta bastante estable ya que para el 2020 y 2021, el valor medio anual se mantiene en 0.10, y para el 2022, 2023, 2024 en 0.11.

**Tabla 3.** Estadísticas de 5 años LST y Albedo, Global para el área de estudio.

Año	media LST	media Albedo	Correlación LST Albedo
2020	31.06	0.10	0.17
2021	27.39	0.10	0.20
2022	33.60	0.11	0.16

Año	media LST	media Albedo	Correlación LST Albedo
<b>2023</b>	29.24	0.11	0.25
<b>2024</b>	35.33	0.11	0.23

Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

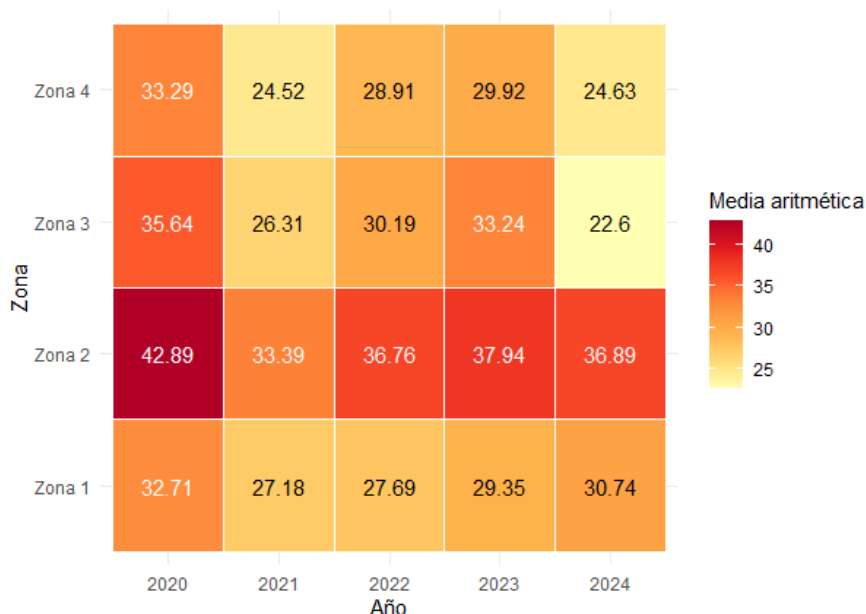
Al analizar los resultados de la correlación global entre LST y albedo en toda la zona de estudio, se observa una tendencia positiva que oscila entre 0.16 y 0.25. Según señala *Naserikia et al. (2022)*, *Gignac & Szodorai (2016)*, y *Khalid, W., Shamim, S.K. y Ahmad, A. (2024)*, el valor del  $r$  local de 0.20 se considera como representativo, no obstante, al ser un indicador positivo, el resultado sugiere que el albedo no incide por sí solo en la LST, sino que los cambios en la LST podrían estar relacionados a otros factores como la variación climática, humedad, materiales de las edificaciones y de la cobertura vegetal. En la sección 4.5, se realiza un análisis espacial sobre la correlación entre LST y albedo en base a su  $r$  local.

## 4.2. Hotspots

### 4.2.1. Comportamiento quinquenal 2020 -2024 por zonas

La LST muestra un comportamiento heterogéneo tanto espacial como temporalmente. Se evidenció un patrón de tendencia dominante para las zonas 1,2 y 4. Estas áreas experimentaron un pico común en su valor de temperatura superficial en el año 2020, seguido de un descenso a sus valores mínimos en 2021 y una posterior tendencia positiva hasta 2024. En este grupo, se destaca a la Zona 2, la cual presenta los valores de temperatura superficial más altos, con 42.89°C en 2020, y su valor más bajo en el año 2021 con 33.39°. Sin embargo, la zona 3 presenta su mínimo en el año 2024, con 22.60 °C, y de igual forma su máximo de temperatura en el 2020 (35.64°C).

**Figura 3.** Mapa de calor de temperatura superficial por zona y año (2020 - 2024)



Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

Para el año 2020, se presentan áreas dentro de la zona de estudio con una LST elevada, particularmente al norte, en las parroquias de Calderón y Pomasquí (42.89°C). Estas parroquias son conocidas por tener un microclima relativamente seco y una mayor insolación al estar cerca de la línea ecuatorial. A este factor climático se añade una cobertura de suelo con escasa vegetación y una actividad comercial/industrial destacable, de tal forma que potencia la absorción y retención de radiación solar. A su vez, las zonas de mayor altitud registran las LST más bajas. Esto es particularmente evidente en las áreas circundantes del complejo volcánico Pichincha (Guagua y Rucu) y en las cumbres de los volcanes Ilaló y Puntas. Este patrón de bajas temperaturas en las zonas de montaña es una característica especial que se mantiene constante a lo largo de todo el período de estudio.

Para el año 2021, el análisis revela un descenso generalizado de la LST en comparación con el año anterior, afectando tanto al norte y sur del distrito como a los valles. Esta variación podría estar asociada a condiciones meteorológicas específicas de ese año, como una mayor precipitación o nubosidad. No obstante, a pesar de esta tendencia al enfriamiento, se destaca una anomalía térmica persistente en la parroquia de Tababela. El Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre se mantiene como un foco de calor intenso (con una media aritmética de  $30.38^{\circ}\text{C} \pm 8.85$ ), en comparación con el enfriamiento de las áreas aledañas. Las extensas superficies de asfalto de las pistas y las edificaciones terminales explican por qué esta zona genera una isla de calor tan prominente.

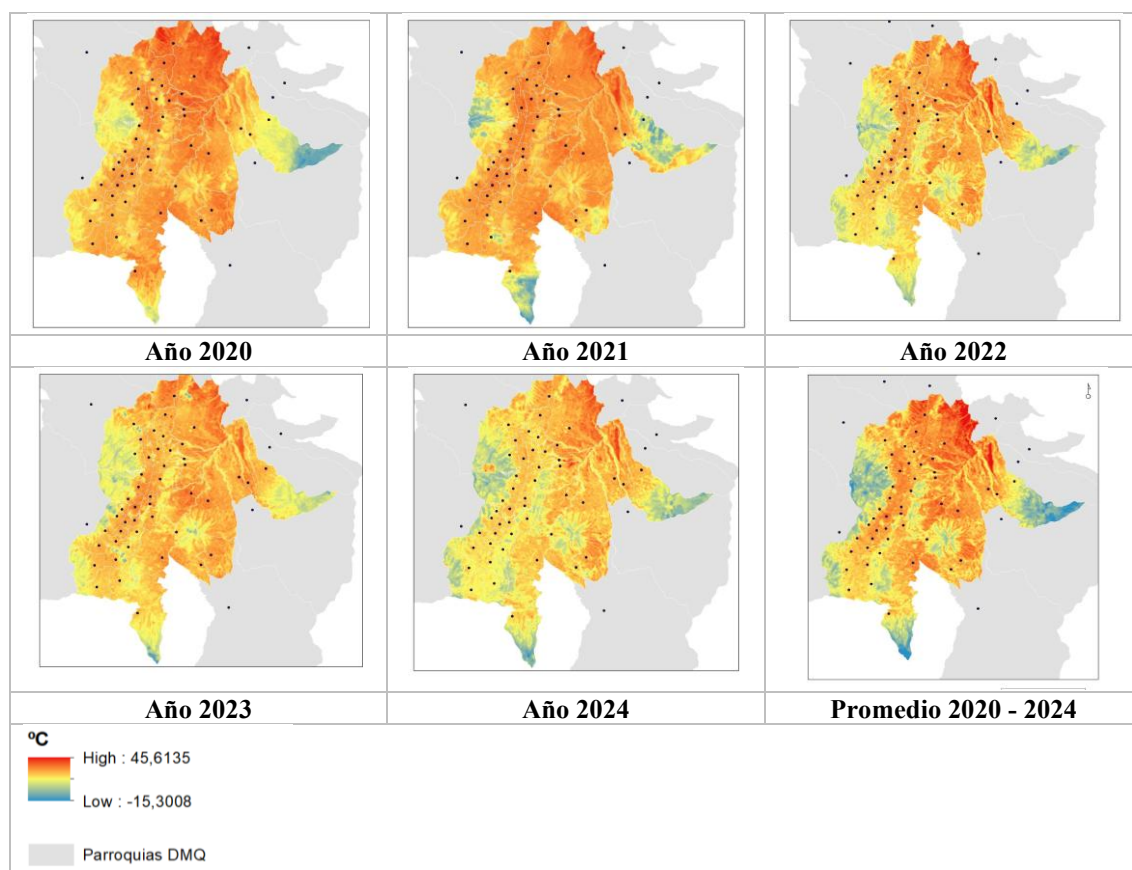
Para el año 2022, se mantiene el patrón espacial general de la LST observado en años anteriores. Sin embargo, la principal novedad es la expansión de las manchas de calor en la periferia de la ciudad. Este fenómeno es particularmente notorio en barrios como San María de Cotacollao y



Atucucho, donde el crecimiento poblacional ha impulsado un proceso de urbanización ascendente por las laderas de la montaña. Este cambio en la cobertura del suelo, se relaciona directamente en un aumento de la LST en dichas zonas periféricas.

Ahora, en el 2023 y 2024, la variabilidad de LST es mínima con respecto a la zona urbana y norte (Calderón, Pomasquí y Llano Chico). El cambio más significativo fue en la zona de los valles, esto puede ser ocasionado por el alza en eventos de precipitación y de nubosidad al considerar la geomorfología y comportamiento de los vientos. También, se puede evidenciar el incremento de ciertos puntos de alza de temperatura en diferentes parroquias rurales, como Puembo, Cumbayá, Tumbaco, Alangasí, Conocoto y Amaguaña, debido a incremento de proyectos inmobiliarios y de producción.

**Figura 4.** Temperatura superficial LST 2020-2024.



Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

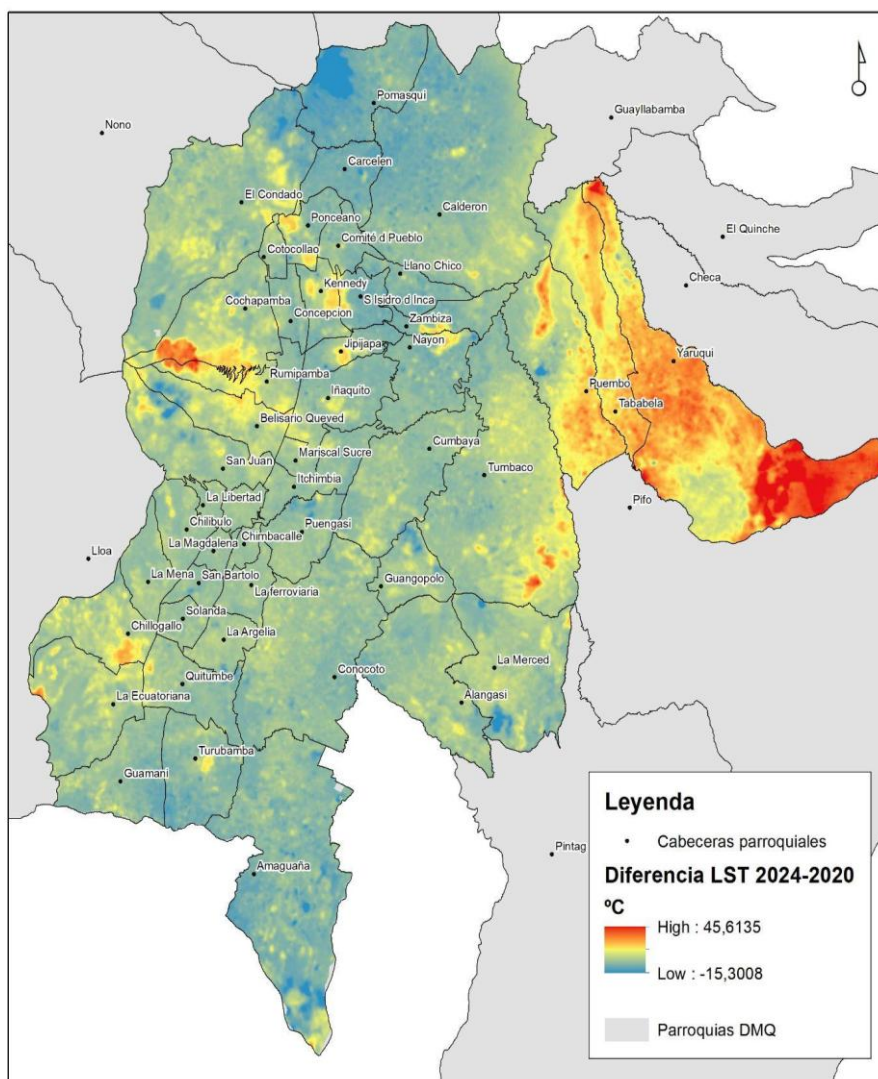
#### 4.2.2. Cambios NETOS en temperatura superficial en el periodo 2020 - 2024

Para esta sección se calcula un *delta* (cambio neto) entre los años 2020 y 2024, que permita determinar qué tanto cambió la temperatura superficial en esos años.

Respecto a la LST, se observa que en el periodo Agosto 2020 - Agosto 2024, existen zonas en las que existió un **cambio neto** en la temperatura superficial que se ha incrementado, en tanto que

en otros sectores ha decrecido. Así, de forma general y como se observa en la Figura 5, los mayores cambios netos positivos (es decir que han incrementado) de temperatura superficial a lo largo de los últimos 5 años, se dan en las parroquias de Puembo, Tababela y Yaruquí, tanto en las zonas urbanas o peri urbanas, como en las zonas rurales.

**Figura 5.** Diferencias de temperatura superficial LST 2020-2024.



Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

Los mayores incrementos de LST en la parroquia de **Puembo**, se observan en los sectores de San Pedro del Chiche, San José de Puembo y Nueva Andalucía; en el caso de **Tababela**, los mayores cambios netos positivos se presentan en los sectores de Guambi, El Vergel, Oyambarillo, destacando la zona que corresponde a la implantación del Aeropuerto de Tababela; y para **Yaruquí**, los mayores cambios netos positivos de LST se localizan en los sectores de Yaruquí Centro, San Vicente, La Joya, Tambillo, El Tejar, Chinangachi. (Figura 6).





Esto se explica principalmente, porque el DMQ ha experimentado en las últimas décadas un crecimiento urbano marcado por la dispersión y la expansión hacia zonas periféricas, valles y áreas de protección natural. Una de las principales causas de este fenómeno es la ausencia de políticas sostenidas de acceso a suelo servido y de provisión de vivienda prioritaria y de interés social en áreas consolidadas. Este déficit ha fomentado la proliferación de asentamientos en la periferia como es el caso que se muestra en la Figura 7, donde los suelos presentan menor valor de mercado, pero a menudo coinciden con áreas de protección ecológica y sectores expuestos a amenazas naturales.

La especulación del suelo urbano en zonas con servicios ha desplazado a la población más vulnerable hacia áreas frágiles, con déficits de servicios básicos, transporte público y equipamientos urbanos. Una vez consolidados estos asentamientos, el límite urbano tiende a ampliarse, generando la consecuente transformación del paisaje natural y la reducción de áreas agroecológicas, aumento de suelo impermeable, lo que impulsa aún más la expansión de la mancha urbana (*Distrito Metropolitano de Quito, 2024*) y consecuentemente ocurre también el aumento de la LST.

En el Valle de **Tumbaco**, el crecimiento urbano ha estado marcado por un proceso de conurbación acelerada durante las últimas tres décadas, consolidándose como uno de los principales polos de expansión del DMQ. A diferencia de la meseta central y del sur de la ciudad, donde predominan densidades altas, Tumbaco presenta densidades urbanas bajas, registrando valores de 12,05 hab./ha en promedio (*PMDOT, 2024*). Este patrón responde a la proliferación de urbanizaciones cerradas y comunidades amuralladas, que generan ocupaciones extensivas con bajo aprovechamiento del suelo, pero con procesos de impermeabilización.

La baja densidad poblacional, lejos de significar menor presión sobre el entorno, ha incentivado un incremento sostenido del parque automotor privado en la zona, debido a la limitada oferta de transporte público eficiente. Esto repercute en mayores emisiones de gases de efecto invernadero y en un incremento de la huella de carbono del valle, lo cual se asocia directamente con la intensificación de las ICU (*Qian et al., 2019*). Además, la fragmentación del territorio y la sustitución de áreas agroecológicas por urbanizaciones cerradas han reducido la cobertura vegetal, debilitando la capacidad reguladora del entorno frente al incremento térmico, en línea con lo observado por *Zoran et al. (2023)* respecto al rol crítico de los espacios verdes en la mitigación de la temperatura superficial.

En los valles orientales, parroquias como Tumbaco (12,05 hab./ha) y Cumbayá (12,81 hab./ha) han liderado la expansión urbana en los últimos 30 años, configurando una ocupación caracterizada por urbanizaciones cerradas y densidades bajas, lo que contrasta con la presión de los sectores populares en la zona suroccidental (*PMDOT, 2024*).

Las consecuencias de este patrón de expansión incluyen el incremento en la congestión vehicular por la insuficiente red vial de conexión con los valles y cantones vecinos, la pérdida acelerada de áreas agroecológicas y de protección, y la fragmentación socioespacial marcada por la segregación en el acceso a equipamientos y servicios de calidad. Si la tendencia actual persiste, se estima que el suelo urbano requerido para acoger el crecimiento poblacional podría duplicarse,

alcanzando cerca de 20.000 hectáreas, es decir, casi el 50% del total urbano existente al 2020 (PMDOT, 2024).

En síntesis, el crecimiento de la mancha urbana hacia el valle de Tumbaco no solo implica una expansión territorial descontrolada, sino también una serie de impactos sociales y ambientales: pérdida de biodiversidad, aumento de riesgos naturales por ocupación en zonas inadecuadas, incremento de la huella de carbono por movilidad extendida, y mayor desigualdad en el acceso a servicios urbanos, como es el caso de las zonas cercanas al aeropuerto internacional Mariscal Sucre que consigo trabajo una serie de dinámicas urbanas las cuales aceleran el crecimiento de la mancha urbana de forma aislada, sin buscar una consolidación y solamente consumiendo áreas verdes aumentando la impermeabilización del suelo y consecuentemente aumentos de temperatura y nuevos fenómenos de LST.

Por otra parte, en la **meseta central de Quito**, destacan ciertos sectores como zonas de cambios netos positivos de temperatura superficial (Figura 7).

Así, en el **norte de Quito**, en la parroquia Kennedy se observan cambios netos positivos en la temperatura en los barrios Hospital de Solca, Rodríguez Aguirre, Julio Matovelle, La Kennedy y Cofavi, en el que en el último quinquenio se han detectado incrementos entre 11°C y 15°C. Así mismo en la parroquia Ponceano, los barrios San José del Condado, Los Cipreses, La Ofelia y Nazareth también presentan cambios netos positivos en la LST en el orden de los 11°C y 15°C.

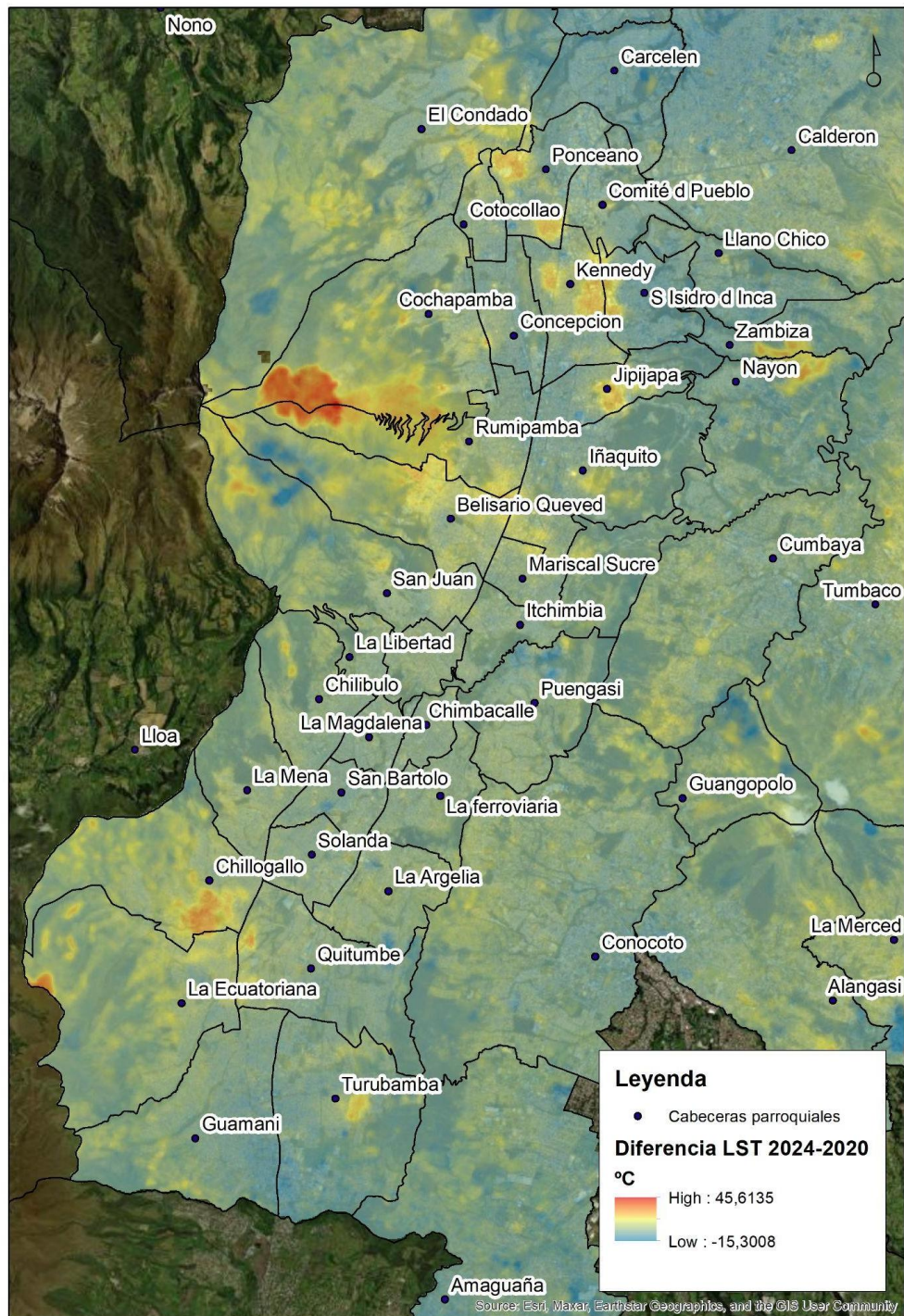
Los resultados obtenidos para la meseta central de Quito muestran que los cambios netos positivos de LST más significativos no se distribuyen de manera aleatoria, sino que corresponden a zonas de consolidación urbana, con un tejido compacto y procesos de transformación inmobiliaria intensiva. La parroquia **Kennedy**, por ejemplo, concentra un uso mixto donde coexisten equipamientos de salud de gran escala (como el Hospital Solca), barrios residenciales y un creciente desarrollo de edificaciones multifamiliares, lo que ha reducido progresivamente la cobertura vegetal y aumentado la superficie impermeabilizada. Esta dinámica urbana explica los incrementos de 11 a 15 °C observados en el último quinquenio, ya que la sustitución de áreas verdes por estacionamientos, pavimentos y techos de bajo albedo genera un efecto acumulativo de calor.

Para el caso del **centro norte de Quito**, en las parroquias Belisario Quevedo y Rumipamba, específicamente en los barrios **Mariana de Jesús / Las Casas / La Granja** junto a la Av. Mariana de Jesús, se observan cambios netos positivos de hasta 16°C de LST. Lo propio ocurre en la parroquia Ñaquito, concretamente en el barrio **La Pradera y Colón** en el sector comprendido entre la Av. República, Av. 6 de Diciembre, Av. Colón, Av. Amazonas y calle La Pradera, en la que se observan cambios netos positivos de hasta 13°C. Otros sectores que destacan, son los localizados **sobre la Av. Mariscal Sucre** sobre las Laderas del Pichincha, principalmente en barrios como Santa Clara del Millán, La Primavera, San Vicente y Ningüilla, que presentan cambios netos positivos entre 10°C y 15°C de LST. También, en la parroquia Jijapa, los barrios Monteserrín y El Inca, presentan cambios netos que van desde los 11°C a los 17°C de LST.





**Figura 7.** Diferencias de temperatura superficial LST 2024 -2020 en parroquias urbanas de Quito.



Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

En las parroquias **Belisario Quevedo, Rumipamba e Iñaquito** presentan algunos de los incrementos más altos de LST (hasta 16 °C). Estas áreas concentran los mayores procesos de verticalización inmobiliaria en Quito, con proyectos de vivienda, oficinas y usos mixtos en torno a las avenidas Mariana de Jesús, Amazonas y República. La densificación, aunque contribuye a la compacidad urbana, se ha realizado con materiales de bajo albedo (vidrio, hormigón y asfalto), lo que favorece la retención de calor y limita la regulación microclimática. A esto se suma la pérdida de jardines residenciales y áreas verdes privadas, sustituidas por edificaciones continuas y patios duros.

Sobre las **laderas del Pichincha**, el crecimiento urbano irregular y la ocupación de zonas de pendiente han intensificado la impermeabilización del suelo, reduciendo su capacidad de infiltración y aumentando los procesos de acumulación térmica. La topografía juega un papel importante en estas áreas, ya que la falta de ventilación cruzada y la exposición solar directa en horas de la tarde generan mayores incrementos de temperatura (10 a 15 °C).

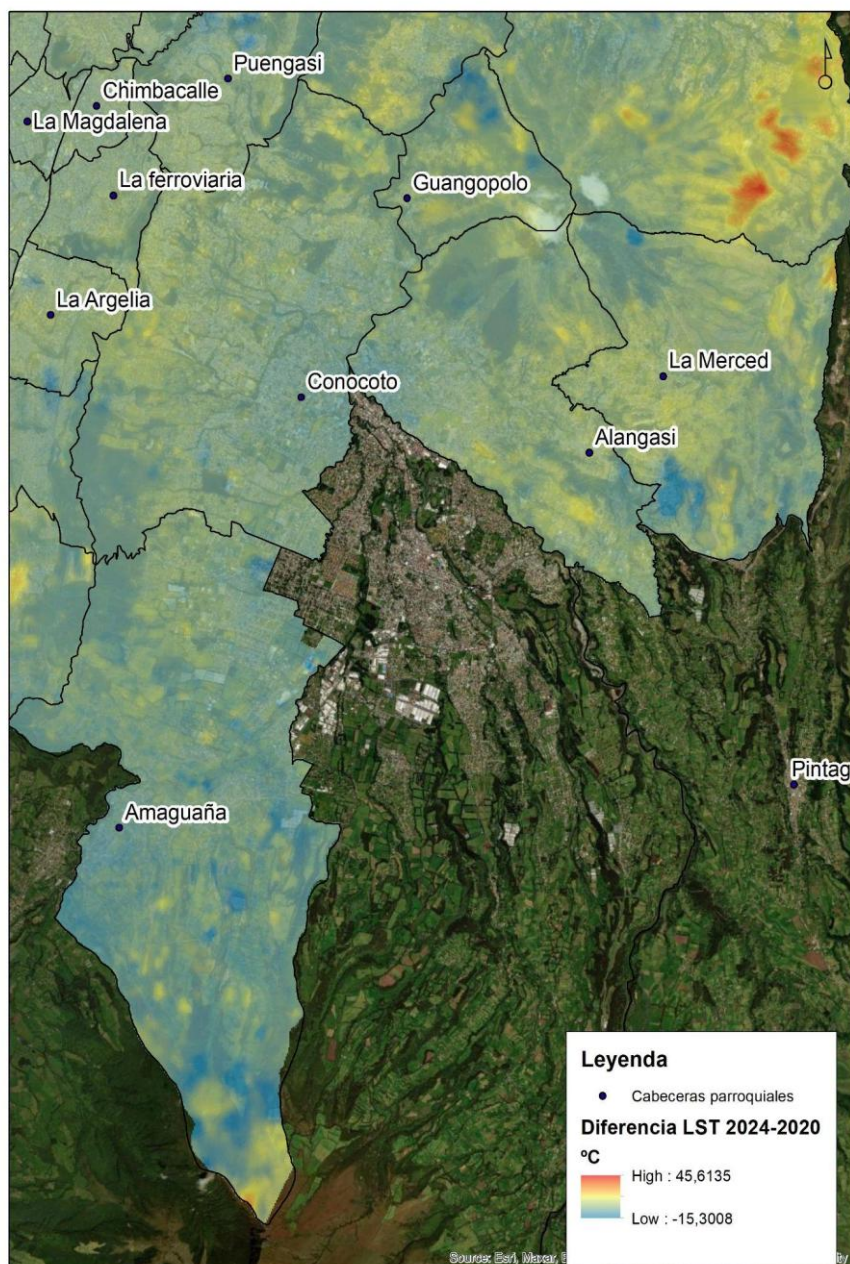
En el **sur de Quito**, destaca los incrementos de LST en la parroquia Chillogallo, en los sectores de El Girón, El Tránsito, Turubamba de Monjas 2, 21 de Mayo, Santa Ana y La Ecuatoriana, en la que los incrementos de la LST en los últimos cinco años, va desde 11°C a 18°C. Así mismo, en la parroquia Quitumbe en los barrios Causayllacta, Huayrallacta y Tamayllacta, se observan importantes incrementos que van desde los 11°C a los 17°C de LST. Por otra parte, en la parroquia Quitumbe, el barrio Ninallacta, presenta incrementos de 15°C de LST en el último quinquenio, especialmente en la zona colindante con la Av. Mariscal Sucre. Por otro lado en la parroquia Turubamba, concretamente en el barrio Bellavista del Sur, se observa que los incrementos de temperatura en el último quinquenio oscilan los 14°C de LST.

Finalmente, en el **sur de Quito**, la expansión de conjuntos habitacionales de baja altura ( $\leq 5$  pisos), bodegas logísticas y comercios minoristas ha generado una alta concentración de pavimento, explanadas y cubiertas metálicas. Estos materiales intensifican la radiación absorbida durante el día y prolongan la liberación de calor en horas nocturnas, explicando los incrementos de entre 11 y 18 °C en parroquias como Chillogallo y Quitumbe. Además, la insuficiencia de áreas verdes y la fragmentación de los espacios recreativos reducen los procesos de evapotranspiración, generando condiciones micro climáticas desfavorables

Hacia el **Valle de los Chillos**, el comportamiento general en las parroquias de Amaguaña, Conocoto, Alangasí y La Merced, corresponde a un incremento entre los 4°C y 9°C de LST.



**Figura 8.** Diferencias de temperatura superficial LST 2024 -2020 Valle de Los Chillos.



Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

De forma general, se observa que los incrementos se localizan en sectores donde se han desarrollado nuevos proyectos constructivos (ECP- 2025), y junto a las vías principales como la Av. Ilaló, Autopista General Rumiñahui, Av. Río Amazonas.

El contexto urbano de la zona muestra un proceso acelerado de conurbación en torno a estos ejes, con el desarrollo de proyectos habitacionales de baja y mediana altura (2 a 4 pisos), urbanizaciones cerradas y equipamientos comerciales que sustituyen progresivamente el suelo agrícola. La **impermeabilización progresiva del territorio** producto de calzadas, estacionamientos y explanadas pavimentadas explica la persistencia de temperaturas más elevadas, en línea con lo observado en otras áreas de expansión del DMQ.

En la parroquia **Conocoto**, los incrementos de LST se concentran en la franja que conecta con el centro parroquial y la Av. Ilaló. Este patrón responde a la consolidación de nuevas centralidades urbanas con funciones residenciales, comerciales y de conectividad, lo que ha generado un tejido urbano compacto pero con déficit de áreas verdes y predominio de materiales de bajo albedo en cubiertas y pavimentos.

Por su parte, en **Amaguaña y Alangasí**, los incrementos térmicos se localizan en áreas donde se han emplazado conjuntos habitacionales dispersos y proyectos recreativos, lo que ha fragmentado las áreas agroecológicas tradicionales. La sustitución de cultivos y pastizales por infraestructuras urbanas ha reducido la capacidad de regulación climática local, amplificando los efectos de las ICU.

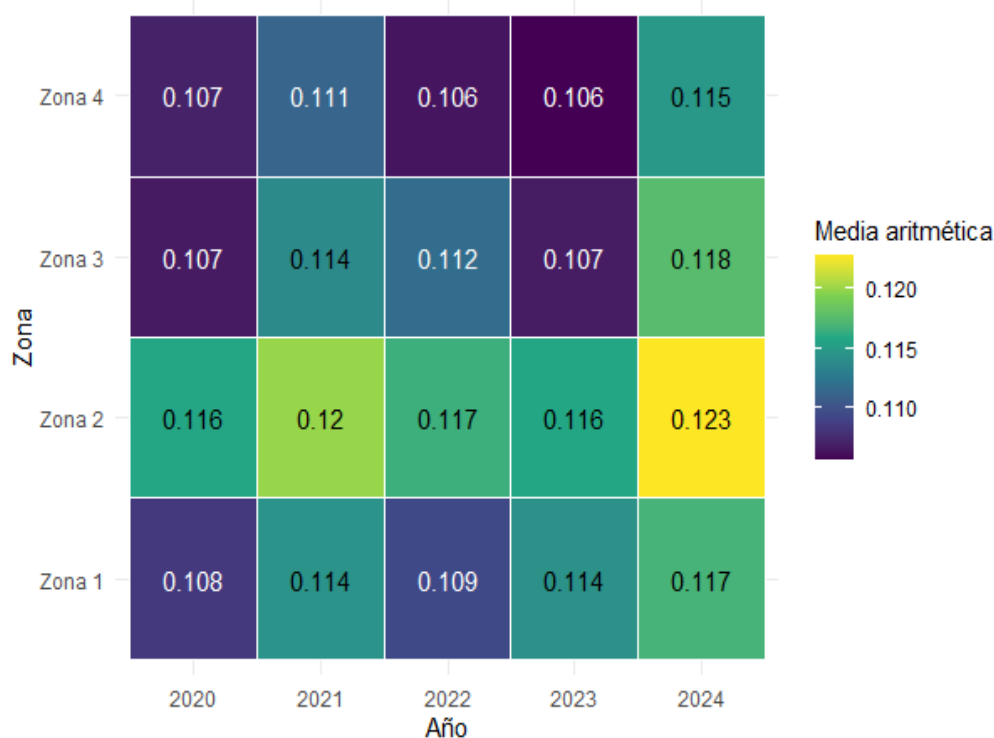
En **La Merced**, los nuevos desarrollos a lo largo de la Av. Río Amazonas y la vía hacia Alangasí muestran un patrón similar, donde la localización de proyectos inmobiliarios y actividades logísticas se vincula directamente con incrementos de entre 4 °C y 7 °C. La condición topográfica del valle a menor altitud respecto de la meseta central y con mayor exposición solar durante la época seca refuerza este efecto, generando un microclima más cálido y estable en comparación con sectores de mayor altitud.

### 4.3. Albedo

#### 4.3.1. Comportamiento quinquenal 2020 -2024 de Albedo por zonas

El albedo mostró variaciones significativas a lo largo de los años en todas las zonas. Se encontró un patrón coincidente para los valores máximos, ya que todas las zonas alcanzaron su punto más alto de reflectividad en 2024. Por el contrario, los valores mínimos se registraron en años diferentes. Las zonas 1, 2 y 3 presentaron su mínimo en 2020 (0.108, 0.116 y 0.107, respectivamente), mientras que la zona 4 lo hizo en 2023 (0.106). Sin embargo, la diferencia del valor de esta zona para 2023, no difiere significativamente con su valor en 2020 (0.107). Esto refuerza aún más su estrecha relación con la temperatura superficial terrestre (LST), donde para el 2020, todas las zonas alcanzaron su pico máximo de temperatura, denotando una posible relación inversa.

**Figura 9.** Mapa de calor de albedo por zona y año (2020 - 2024)



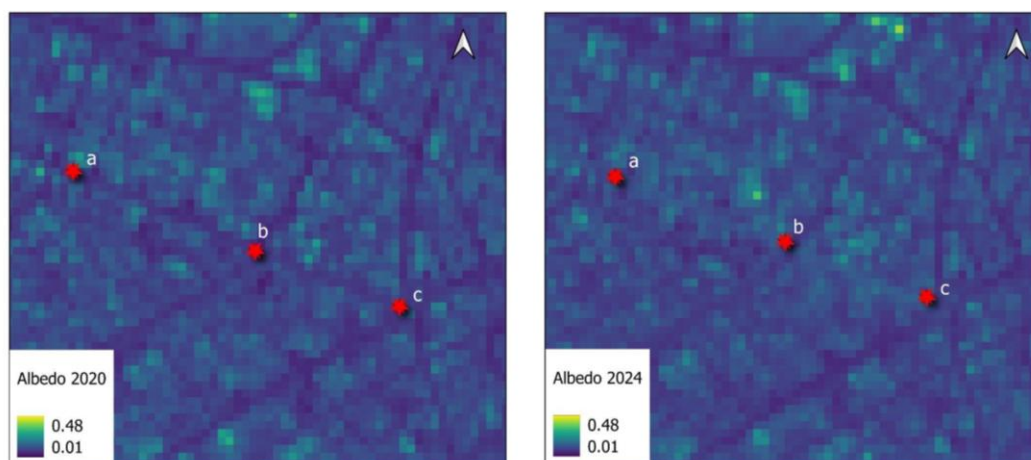
Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

En el caso de albedo, su variación está influenciada por el desarrollo constructivo de la ciudad. Las variaciones significativas de esta variable están sujetas al tipo de cobertura de techo que tienen las edificaciones, ya sean comerciales, industriales o para vivienda, y también a las características de los pavimentos presentes en el entorno urbano. De esta manera, se aprecia como muchos sectores dispersados por toda el área de estudio, presentan cambios en el albedo por este motivo.

Por ejemplo, para el caso de pavimento, en octubre de 2023, se inició el proceso de rehabilitación asfáltica en la Av. Colón, cambiando el material de toda esta vía principal. Los trabajos acabaron en 2024. Sin embargo, si se hace una comparación con el albedo de 2020, se aprecia un aumento de albedo, significando que el nuevo material de la calle refleja las ondas solares, evitando el aumento de LST y sensación térmica a nivel de piso. Esto se traduce en un mejor confort térmico en toda la avenida (Figura 10).



**Figura 10.** Comparación albedo Av. Colón, sector norte de Quito.



Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

En la Tabla 4, se muestra un ejemplo que muestra las diferencias de albedo en este rango temporal, validando que el cambio de material en la vía, inicialmente pavimento y posterior concreto blanco, favorece a un aumento de albedo.

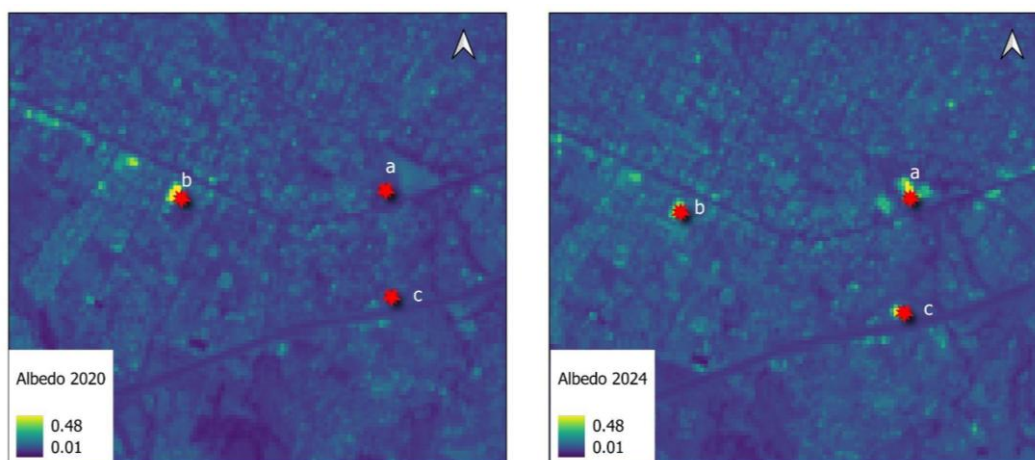
**Tabla 4.** Comparación de valores de albedo para el área de la Av. Colón, Norte de Quito.

Año	Punto a	Punto b	Punto c
2020	0.08	0.06	0.08
2024	0.11	0.13	0.13

Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

A su vez, existen diferentes lugares en las zonas de los valles que también presentan esta variabilidad de albedo, producto del uso de materiales diferentes en techo. Un ejemplo destacado corresponde a la zona alrededor de la Ruta Vida en el Valle de Tumbaco, en la cual, la presencia de nuevas edificaciones, debido al creciente desarrollo económico, y el uso de diferentes materiales en techo, han influenciado en el albedo (Figura 11).

**Figura 11.** Comparación albedo Ruta Viva, parroquia de Tumbaco.



Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

**Tabla 5.** Comparación de valores de albedo para el área de la Ruta Viva, Tumbaco.

Año	Punto a	Punto b	Punto c
2020	0.18	0.27	0.10
2024	0.46	0.20	0.45

Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

Cabe señalar, que este fenómeno se repite por toda el área de estudio. Favoreciendo el confort térmico dentro de las edificaciones.

#### 4.4. Análisis de tendencias de LST

Para el análisis de tendencias y sus magnitudes en el quinquenio 2020-2024, se utilizó el método de Thau Kendal, aplicando tres estimadores:

- *Thau de Kendall* ( $\tau$ ), que mide la **fuerza y dirección** de la tendencia, independientemente de la escala.
- *Significancia* (*p-valor*), que mide si los resultados son estadísticamente significativos.
- *Pendiente de Theil-Sen* (*sen*): que mide la magnitud del cambio, y representa a la mediana de todas las pendientes del fenómeno estudiado. En este estudio, representa la **magnitud de cambio**, en grados celsius por cada año.

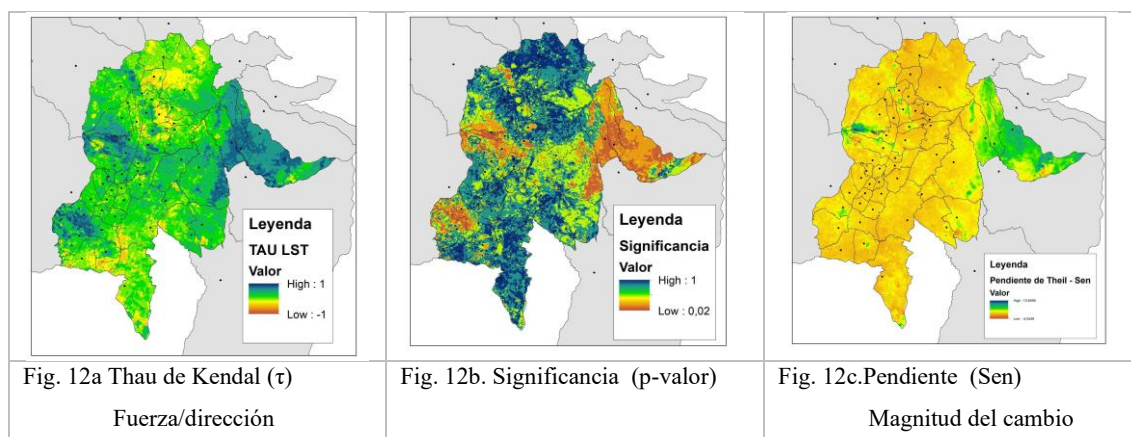
Un valor muy alto y positivo de  $\tau$  indica una tendencia creciente, y un valor muy bajo (negativo) indica una tendencia decreciente, no obstante, se requiere analizar los resultados de los p-valores para reafirmar los resultados.

Como resultado de este análisis se obtuvieron tres mapas para LST: **fuerza/dirección** ( $\tau$ ), **significancia** (p) y **magnitud** (Sen), que se muestran en la Figura 12.

Al analizar los resultados, se observa que los valores de Thau de Kendal (Figura 12a) muestran tendencias crecientes (tonos de verde a azul), y tendencias decrecientes (tonos amarillo al rojo). Por otra parte, el mapa de significancia p-valor (Figura 12b) muestra que la mayor parte del territorio estudiado, tiene un p-valor mayor a 0.05, lo que muestra que no existe significancia estadística que demuestre un incremento sostenido en los 5 años analizados, sino más bien, un incremento de temperatura episódico, es decir que en los cambios de temperatura **predomina la variabilidad interanual**.

Finalmente el mapa de la pendiente Theil-Sen (Figura 12c) indica que los cambios de temperatura superficial en  $^{\circ}\text{C}$ , van desde  $-4.5^{\circ}\text{C}$  (tonos de rojo) a  $10^{\circ}\text{C}$  (tonos en azul) y que la mayor parte de territorio cambió entre  $1^{\circ}\text{C}$  y  $2^{\circ}\text{C}$  (tonos en amarillo).

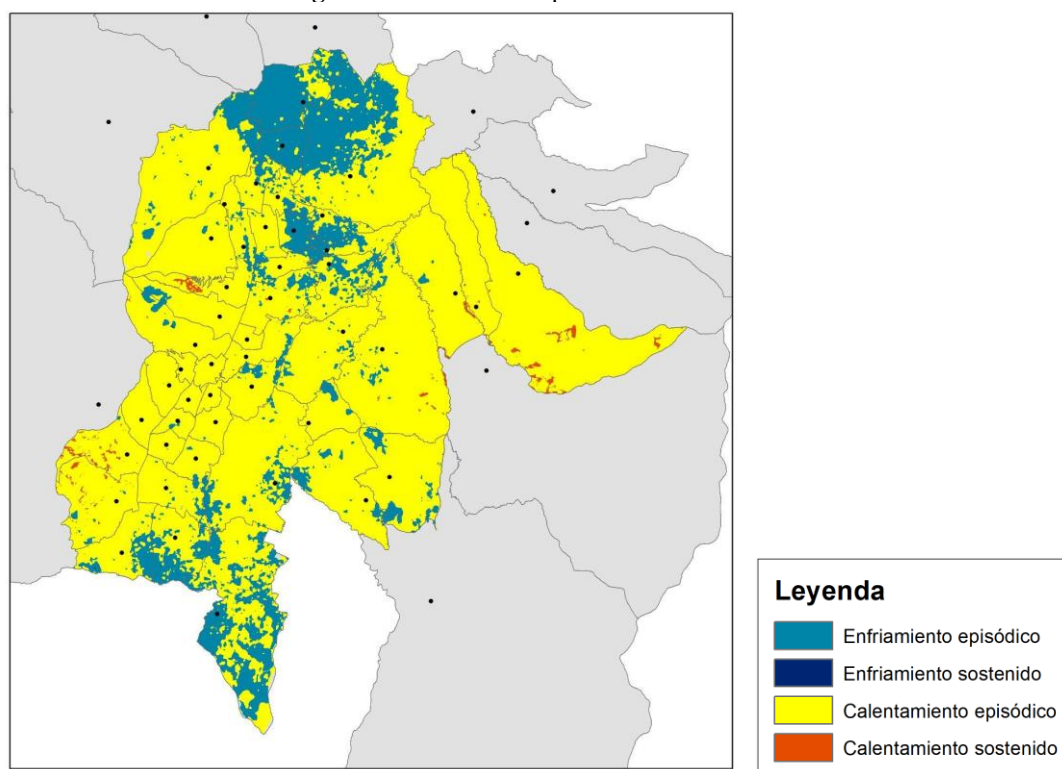
**Figura 12.** Análisis de tendencias



Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

Finalmente para entender la tendencia global del territorio estudiado, los resultados de Mann-Kendall, se combinan con el análisis de Cambio Neto de la sección 4.2.2, para analizar si las tendencias encontradas, son sostenidas o en su defecto son tendencias episódicas. Los resultados muestran (Figura 13), que la mayor parte del territorio, presenta incremento de temperatura episódico, es decir que responden a temas de coyuntura.

**Figura 13.** Tendencias episódicas o sostenidas



Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

No obstante, es importante aclarar que para una serie de datos de 5 años, el test de Mann- Kendall tiene baja potencia para detectar tendencias suaves o no estrictamente monotónicas (Wang *et al.*, 2020), dando como resultado una no-significancia, a pesar que el cálculo del Cambio Neto sea grande.

Adicionalmente el mes de agosto de 2024, fue un año más cálido a nivel global con la presencia de un fenómeno del Niño 2023 - 2024, lo que elevó las temperaturas superficiales, dándole un carácter coyuntural. Esto pudo provocar que el Cambio Neto ( $\Delta$  2020-2024) se infle y no garantice una tendencia monótona entre esos años.

Todo esto nos lleva a concluir que el predominio de calentamiento episódico en ~80% del territorio aporta una lectura más matizada de la dinámica térmica en el periodo 2020–2024. Estos episodios reflejan principalmente la **influencia de condiciones climáticas interanuales y eventos extremos recientes** (como el episodio de El Niño 2023–2024 y la marcada estacionalidad seca de agosto), así como la **heterogeneidad de coberturas** que caracteriza al territorio (urbano consolidado, periurbano, bosques húmedos, eucaliptos, matorrales secos, pastos naturales y cultivados). Estos resultados podrían considerarse como una línea base que podría corroborarse con otras ventanas temporales: 2020-2021, 2020-2022, 2020-2023 o una combinación de ellas.

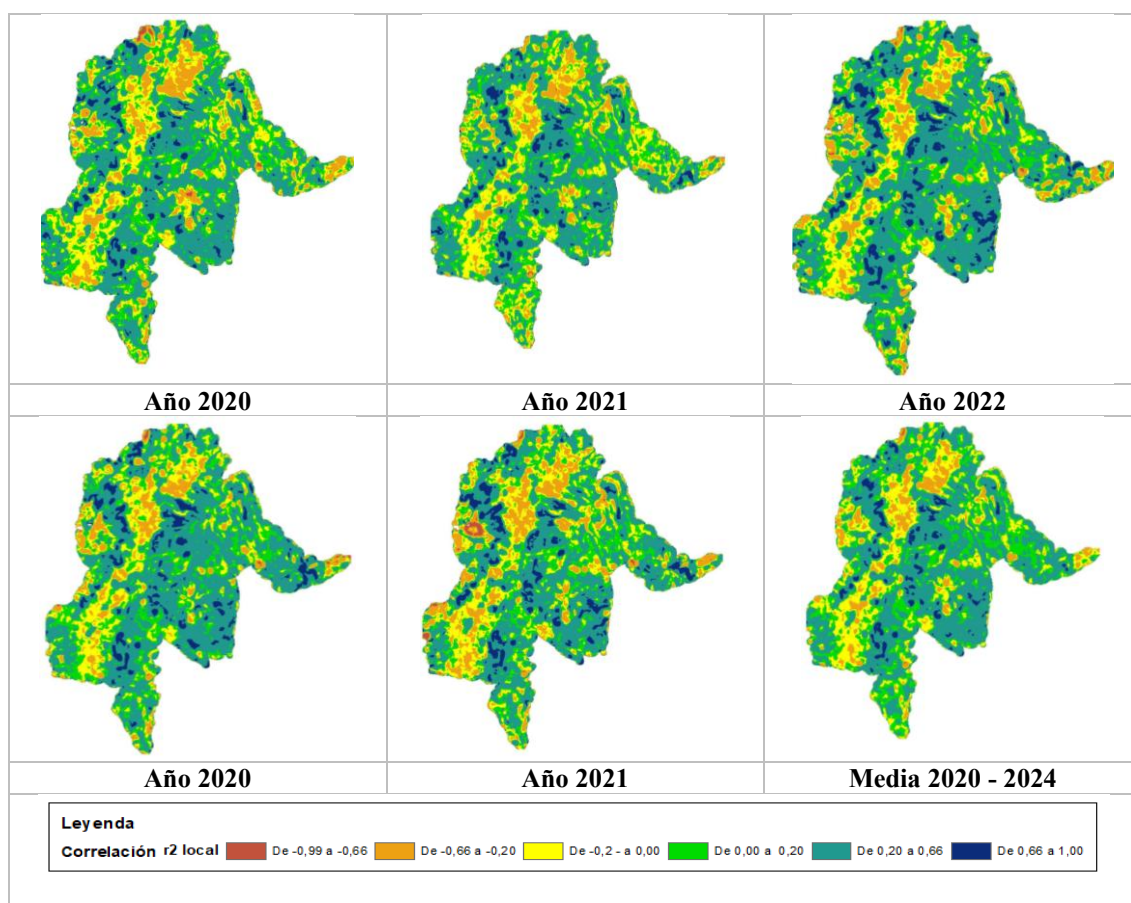


#### 4.5. Correlación entre LST y Albedo

La presente sección, busca analizar la incidencia del albedo en la conformación de la Isla de Calor Urbana, a fin de diferenciar qué tipo de intervención climática es más adecuada en cada sector de las parroquias urbanas y periurbanas estudiadas. Para el efecto, se realiza en primera instancia un cálculo de correlación entre albedo y LST, que identifica patrones de comportamiento entre estos dos factores. Los resultados obtenidos, se someten a una prueba de relevancia, que determine la robustez de las asociaciones detectadas entre albedo y LST.

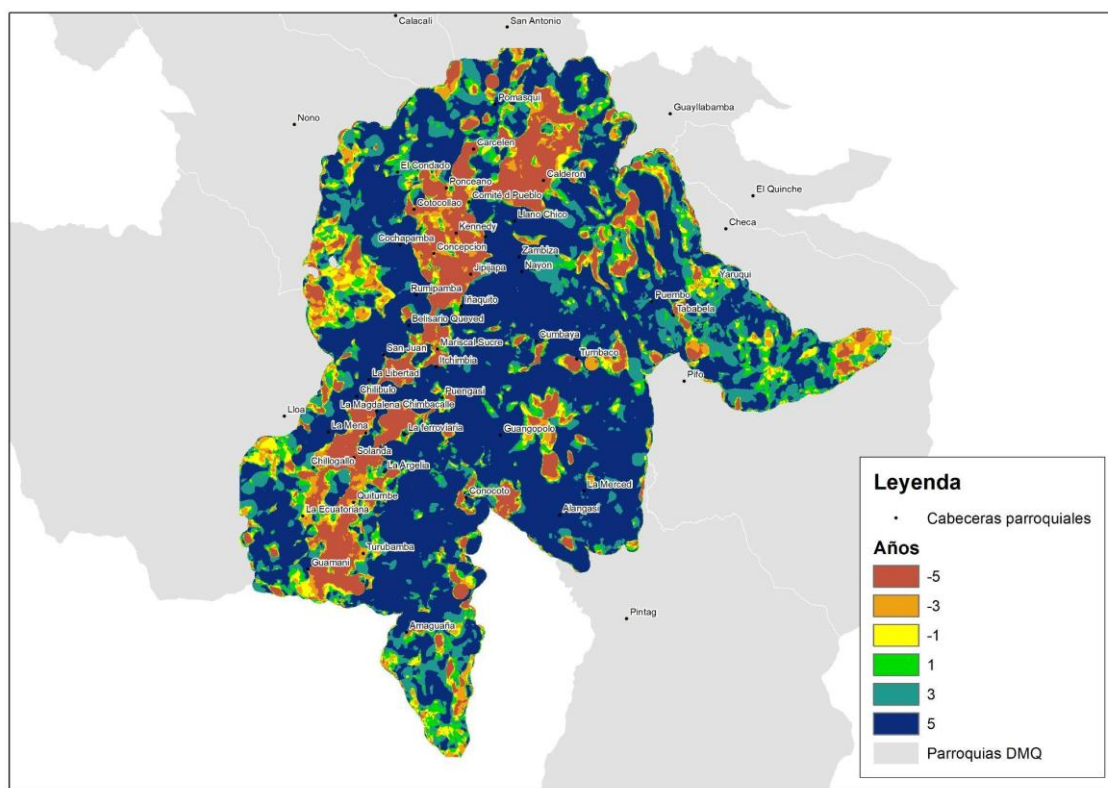
Así, para identificar patrones reales de comportamiento y evitar resultados imprecisos, se requiere analizar la relevancia de los resultados. Para el efecto, se consideran dos aspectos: a) Una **correlación con un umbral de  $r$  local mayor o igual a 0.20** (Figura 14), tal como sugiere *Naserikia et al. (2022)*, *Gignac & Szodorai (2016)*, y *Khalid, W., Shamim, S.K. y Ahmad, A. (2024)*; y b) Una **persistencia en la correlación mayor o igual a 3 años** (Figura 15), la cual fue evaluada mediante un análisis de consistencia temporal. Ambos aspectos se analizaron para valores de correlación positivos y negativos. A continuación se muestran los resultados para cada caso.

**Figura 14.** Correlación entre Albedo y LST para el periodo 2020 -2024



Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

**Figura 15.** Persistencia de signo en la correlación entre Albedo y LST para el periodo 2020 - 2024.



Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

#### 4.5.1. Correlación LST- Albedo inversa ( $r$ local negativo)

Para el  **$r$  local negativo**, los resultados muestran como sectores relevantes, a la meseta central de Quito, en la que los valores de las correlaciones oscilan entre -0.20 y -0.66 (Figura 16), y presentan consistencia temporal superior a los 3 años (Figura 17).

En este grupo, en la zona **norte de Quito**, se encuentran los sectores: Carcelén, Ponceno Alto, Santa Lucía baja, Dammer, Cofavi, La Rumiñahui, Zaldumbide, Jipijapa, La Carolina (entre Av. Amazonas y Av. 10 de Agosto). También se observa este fenómeno en el sector de Carretas, El Arenal, Sierra Hermosa, entre las Av. Giovanni calles y Av. Simón Bolívar. En el **centro norte**, se identifican los barrios: Las Casas y en los alrededores del Coliseo General Rumiñahui, dentro de los barrios La Floresta, La Vicentina y El Dorado. En el **centro de Quito**, se identifican los barrios La Chilena, Gonzáles Suárez (del Centro histórico), San Blas, La Merced, San Sebastián, La Victoria, La Libertad Baja, San Diego, y la parte baja de San Marcos y La Tola cercanas a la Av. Pichincha. En el **sur de Quito** Se identifican barrios como La Unión, La Santiago, 4 de Diciembre, Chiriyacu Bajo, Doscientas casas, Ferroviari, El Recreo, Solanda sector 3 y 4, Mayorista, Ciudadela El Comercio, El Carmen, Palmar de Solanda, Santa Rita, Las Cuadras, Turubamba, Plywood, San José de Guamaní, **Parque Industrial Turubamba**, Los Rosales de Guamaní.

Esto se explica debido a que de forma general, la caracterización material de la ciudad muestra que los techos predominantes en Quito corresponden a losas de hormigón, estructuras de zinc y cubiertas de fibrocemento (INEC, 2022), materiales con bajo albedo que intensifican la absorción de radiación solar. Esto se alinea con los resultados de *Trlica et al. (2017)*, quienes evidencian que los materiales oscuros y con baja reflectancia contribuyen significativamente al incremento térmico urbano.

Así también, la materialidad de las cubiertas y pavimentos se constituye en un factor crítico para explicar la intensidad térmica urbana en Quito. El predominio de techos y calles con bajo albedo coincide con lo planteado por *Trlica et al. (2017)*, quienes subrayan la necesidad de incorporar materiales reflectivos y de alto albedo en el diseño urbano como estrategia de mitigación. En el caso de Quito, la ausencia de políticas orientadas a regular la materialidad constructiva refuerza la vulnerabilidad frente al calentamiento urbano.

En la zona del **valle de Tumbaco**, se observa relevancia en el sector de la cabecera parroquial, alrededor de la Av. Interoceánica, barrios Tolagasi, La Dolorosa, Cochapamba y también en el sector de Las Acacias y Tola Grande. Para el caso del **valle de Los Chillos** se observa altas correlaciones en el sector de La Balvina, Hacienda Chillo Jijón, Mirasierra, San Gabriel, San Francisco en Conocoto, San Carlos, Playa Chica y Lomas de Concepción en La Merced.

Estos resultados se sustentan en que el análisis del crecimiento urbano del DMQ entre 2020 y 2024, revela una clara tendencia de expansión hacia áreas rurales y periurbanas, especialmente en los valles de Tumbaco, Cumbayá y Los Chillos. Este patrón de crecimiento disperso se caracteriza por densidades bajas y un modelo de ocupación fragmentado, lo que coincide con los hallazgos de *Qian et al. (2019)* y *Maigua (2020)*, quienes identificaron que las áreas con mayor impermeabilización presentan incrementos más marcados en la LST, pero que no constituyen el único factor incidente en la ICU.

Se debe considerar que los espacios verdes urbanos y periurbanos, aunque fragmentados, mantienen un efecto mitigador sobre la temperatura. El NDVI registrado en áreas con cobertura vegetal en Quito confirma un patrón inverso frente a la LST, similar al identificado en Bucarest por *Zoran et al. (2023)*. Sin embargo, la continua reducción de parques, quebradas y corredores ecológicos en el DMQ amenaza con debilitar esta capacidad reguladora.

En conclusión, como señala *Trlica et al. (2017)*, un **r local negativo**, implica que **a mayor albedo, menor LST**, lo que sugiere que el albedo actúa como un mitigador térmico, asociado a techos y pavimentos, o mismas condiciones de sombra, humedad y material.

En términos de política pública, estos sectores representan las zonas en las que un cambio en la materialidad, de techos, y pavimentos, podría ayudar a regular la temperatura superficial, mediante la implementación de normas que favorezcan el uso de techos fríos, pavimentos claros, fachadas verdes, entre otros.

#### 4.5.2. Correlación LST- Albedo directa ( $r$ local positivo)

Al igual que en el caso anterior, para el  **$r$  local positivo**, los resultados muestran como sectores relevantes, a las zonas conurbadas de Quito, en la que los valores de las correlaciones oscilan entre 0.20 y 0.66 (Figura 16), y presentan persistencia temporal superior a los 3 años (Figura 17).

Como señala *Trilica et. al (2017)* en el escenario de  **$r$  local positivo** los resultados indican una co-variación en la conformación de la isla de calor, es decir, que a más del albedo, existen otros factores que podrían incidir tales como suelo seco, SVF alto, NDVI bajo, pendientes soleadas, sombra/vegetación/agua, etc.

En este grupo, en la zona **norte de Quito**, se identifican los barrios La Bota, Carmen Bajo, Bella Aurora, que corresponde a zonas en procesos de consolidación, pero colindantes con quebradas con presencia de arbustos secos. Estas dos características, hacen que -por un lado- la pérdida de cobertura vegetal resultante del proceso de urbanización, disminuya la capacidad de evapotranspiración y por lo tanto, la temperatura superficial se eleve; y por otra parte, la cercanía a zonas con presencia de *arbustos secos interandinos*, incide en la alta LST debido a que las hojas pequeñas tienen baja evapotranspiración, y también la presencia de suelos descubiertos pueden elevar la LST. En otros sectores como La Floresta de Carcelén, Pusuquí chico, Atucucho, La Pulida, Jardines del Inca, Campo Alegre, Las Bromelias, Batán Alto, Bellavista, Bellavista Alto, su principal característica, es que colindan con zonas con presencia de vegetación como quebradas, Parque Metropolitano, o el cinturón verde de Quito, con presencia de *arbustos húmedos, o bosques de eucalipto*. Para el caso de los arbustales húmedos, el alto albedo puede deberse al efecto espectral del dosel; otra causa podría ser que los sensores térmicos (p. ej. Landsat TIR) captan la temperatura de la superficie expuesta, no necesariamente el enfriamiento latente subterráneo. El contraste puede llevar a que áreas con arbustales húmedos se muestren más calientes de lo esperado (*Weng, 2009*). De forma similar, en los bosques de eucalipto, el alto valor de LST se debe al calentamiento del dosel y al efecto de sequedad del suelo, debido a la baja humedad edáfica, ya que el eucalipto no siempre proporciona enfriamiento neto medible en las imágenes satelitales. *Maes, W.H. et al. (2018)*

Lo propio ocurre con zonas del **centro norte de Quito**, en sectores como El Panecillo, San José de Monjas, Itchimbía, Orquídeas, El Guabo, Jardín del Valle, Nueva Floresta, Guápulo, que corresponden a zonas que se encuentran en el curso del Río Machángara, también presentan zonas en proceso de consolidación y *arbustos húmedos* dentro de sus quebradas. Tal y como se explicó en el párrafo anterior, los efectos de un albedo elevado y una temperatura elevada se deben al efecto espectral del dosel. (*Weng, 2009*).

En el **sur de Quito**, las zonas con un  $r$  local positivo y persistente, se localizan hacia el occidente en el sector del Parque Metropolitano de Chilibulo y las laderas del complejo volcánico Pichincha, donde se observa presencia de *bosques de eucalipto y pastos naturales en altura*. Tal y como se explicó anteriormente, el eucalipto no siempre proporciona enfriamiento neto medible en las imágenes satelitales (*Maes, W.H. et al. 2018*) por lo que la LST puede resultar elevada, pese al bajo albedo; y en el caso de los pastos naturales en altura, para las épocas secas, -como el mes de Agosto- el pasto se seca, y pierde humedad; esto se refuerza si existen actividades de sobrepastoreo y zonas de pendientes. En los sectores del Parque Metropolitano del Sur y la zona



de Bosques del Chamizal, se observa una combinación de cobertura vegetal entre bosques de eucalipto, arbustos húmedos y pastos naturales, cuyas respuestas espectrales se explicaron anteriormente.

Para el caso del valle de **Tumbaco**, las zonas que muestran alta correlación positiva y persistente entre albedo y LST, se localiza en los sectores colindantes a las zonas de protección de quebradas, y zonas colindantes al Río Chiche, Río San Pedro, Río Guambi, que corresponde a zonas que se caracterizan por estar en proceso de consolidación, y que debido a la pérdida de cobertura vegetal y su reemplazo por materiales que pueden absorber calor, resulta en una mayor temperatura, por lo que el efecto de la temperatura superficial en estas zonas, podría estar condicionado por el contexto físico y urbano. Así mismo, en las laderas del Ilaló, se observa un patrón de  $r$  local positivo. En este caso los resultados podrían imputarse a dos fenómenos: El primero, debido a la proliferación de urbanizaciones, conjuntos habitacionales y vivienda, donde - como vimos anteriormente- el efecto de la temperatura superficial en estas zonas, no responde únicamente al albedo, sino también a una combinación de rasgos biofísicos, estacionales y antrópicos que amplifican el calentamiento superficial pese a aumentos del albedo. El segundo patrón, corresponde a zonas en las faldas del Ilaló con presencia de *arbustos secos interandinos*, en los que el valor del albedo es alto debido a las hojas pequeñas, tallos claros y suelos descubiertos que hacen que estas zonas reflejen más radiación que los bosques secos y también a la baja evapotranspiración del suelo.

En el **valle de Los Chillos**, el patrón es similar a los descritos anteriormente: Las zonas con un  $r$  local positivo entre albedo y LST, se localizan en 1) *zonas en procesos de consolidación* en las que el LST elevado responde a la pérdida de cobertura vegetal y su reemplazo por materiales que pueden absorber calor; 2) presencia de *arbustales secos interandinos* en los que el valor del albedo y LST es alto debido a la baja evapotranspiración producto de las hojas pequeñas, y también debido a la presencia de tallos claros y suelos descubiertos que hacen que estas zonas reflejen más radiación; y 3) *pastos cultivados* en los el valor alto de LST podría estar asociado a un tema de manejo humano, siendo que si el pasto NO tiene riego, se produce un mayor albedo y por lo tanto una mayor LST.

Finalmente, tal y como señala *Trlica et al. (2017)*, un  **$r$  local positivo**, implica que **a mayor albedo, mayor LST y viceversa**, lo que significa que el albedo por sí solo, no incide en la ICU, sino que puede deberse a otros factores como suelos desnudos y secos, poca sombra, materiales que almacenan calor, poca vegetación, morfología urbana.

En términos de política pública, estos sectores representan las zonas en las que **la mitigación de la isla de calor urbana no depende únicamente de aumentar el albedo**, sino de integrar estrategias de revegetación, manejo de suelos y control de morfología urbana en las quebradas, laderas y zonas con presencia de vegetación.

#### **Análisis de correlación LST- Albedo versus Análisis de Tendencias**

En la sección 4.4 se analizó la tendencia en la zona de estudio, dando como resultado que el cerca del 80% del territorio analizado, presenta **calentamiento episódico**.

**Estos resultados no son contradictorios con los resultados del análisis de tendencias**, puesto que si bien la mayoría de los cambios detectados no configuran tendencias temporales

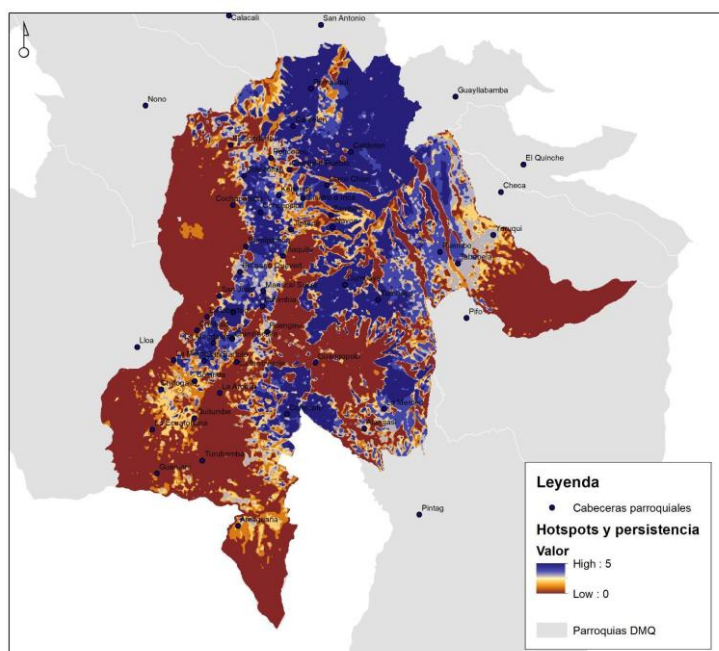
estadísticamente sostenidas, los análisis de correlación espacial y de persistencia siguen siendo válidos y relevantes, pues permiten identificar cómo las distintas coberturas y formas de ocupación del suelo se relacionan con la distribución de la temperatura superficial y con la conformación de islas de calor urbano. En otras palabras, la ausencia de tendencias significativas en amplias zonas no elimina la existencia de **patrones espaciales estructurales** ni la utilidad de correlacionar la LST con variables como albedo, uso de suelo o cobertura vegetal.

#### 4.6. Persistencia espacio temporal

En esta sección se analiza la estabilidad de los resultados para identificar sectores en donde los efectos sean estructurales versus zonas con efectos temporales, puesto que la persistencia espacio-temporal de las ICU en Quito no solo refleja un fenómeno climático aislado, sino que está directamente vinculada con las formas de crecimiento y consolidación del tejido urbano. Por otra parte, esta sección nos muestra un mapa de valores enteros, que indica en cuántos periodos, una celda fue un Hotspot, dando como resultados sectores con Hotspots *nuevos*, *persistente*, *intermitente*.

Así, las zonas en tonos lilas y gris, (Figura 16) corresponden a sectores en los que la isla de calor urbano, persiste desde los 4 años hasta 5 años, que se consideran como hotspot persistentes. Por otra parte, las zonas en tonos naranja o amarillo, corresponde a sectores con persistencia de 3, que corresponde a hotspots intermitentes, y finalmente, las zonas en tonos de café, corresponden a sectores con persistencia de 1 o 2 años, es decir, hotspots nuevos. A continuación se describen los resultados por sectores:

**Figura 16.** Persistencia de signo en la correlación entre Albedo y LST para el periodo 2020 - 2024.



Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

#### 4.6.1. Meseta Central de Quito

Corresponde a **sectores urbanos consolidados**, en los que los procesos de urbanización se han afianzado en el último quinquenio, observándose una persistencia de altas temperaturas superficiales LST entre 4 y 5 años. En estos sectores, se localiza gran parte de proyectos constructivos, lo que significa una mayor superficie impermeable, mayor compacidad del tejido, pérdida de vegetación y materiales de bajo albedo que se mantienen (o aumentan) en el tiempo, estabilizando LST alta.

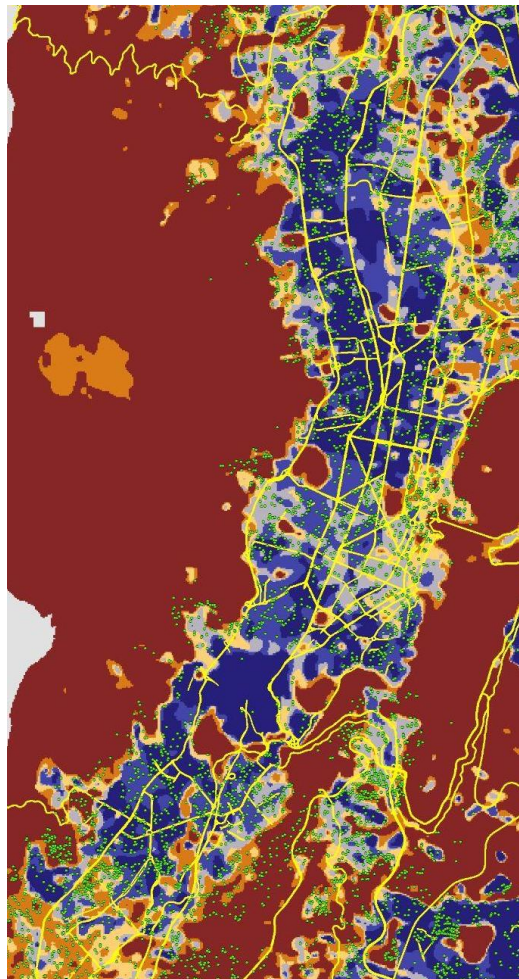
Este patrón se refleja también, en los sectores consolidados de las parroquias **Calderón y Pomasqui**. No obstante en las zonas no consolidados de estas parroquias, la persistencia alta de temperaturas superficiales, corresponde principalmente a zonas con presencia de vegetación arbustiva y arbórea, principalmente arbustos secos interandinos, propios de **estepa espinosa montana-baja**, en la que los altos niveles de LST, se deben a que los arbustos secos presentan menores procesos de evapotranspiración y una mayor presencia de suelo expuesto.

En la **meseta central**, la alta permanencia de temperaturas superficiales responde a décadas de densificación inorgánica, con usos intensivos del suelo y predominio de materiales constructivos de bajo albedo. Estos procesos, además, se ven reforzados por un modelo de verticalización que ha reducido progresivamente las superficies vegetadas y los espacios de ventilación natural, configurando un microclima urbano más estable en cuanto a acumulación de calor.

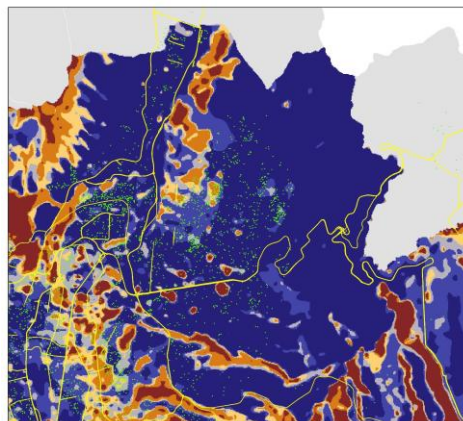
En **Solanda, Chillogallo, Quitumbe y La Mena** (Figura 17c) se observa una **persistencia recurrente** de puntos calientes (1–2 años dentro del periodo analizado), coherente con **procesos de consolidación** caracterizados por la incorporación reciente de **conjuntos de vivienda de baja altura ( $\leq 5$  pisos)**, así como a la **intensificación del comercio de calle**. Este patrón térmico podría ser el resultado de un mayor proceso de impermeabilización por la presencia de pavimentos, cubiertas continuas, patios duros, que reduce la **evapotranspiración** y favorece la acumulación de **calor sensible**. Así mismo, la presencia de manzanas densas, edificaciones adosadas y frentes comerciales, reducen la ventilación y prolonga la **retención térmica**. Finalmente el tráfico, logística de abastecimiento, mayor permanencia peatonal/comercial, pueden incrementar el calor antropogénico, que aunque cada año no sea térmicamente extremos, podrían explicar que las celdas afectadas reaparezcan como “hotspots” en más de una anualidad.

Finalmente en los sectores de **Turubamba, La Argelia, y Guamaní** (Figura 17c), la persistencia de puntos calientes es de 1 año resulta interesante, debido a que son sectores en los que se han desarrollado proyectos constructivos relacionados a bodegas, industria, locales comerciales y vivienda menor a 5 pisos que introducen **grandes superficies de cubierta y explanadas pavimentadas**, las cuales suelen presentar **albedo bajo y alta inercia** durante el día, elevando la LST, mientras que la **variabilidad anual** (avance de obras, cambios de uso, alternancia de ocupación) genera un patrón **menos estable** que en los barrios residenciales consolidados. Es decir, aun con menor duración, los **picos de calor** tienden a coincidir con **hitos de transformación física** (movimiento de tierras, nuevas capas asfálticas, puesta en marcha de naves), dejando una **huella térmica puntual** que se activa en el año más seco/cálido o con mayor actividad.

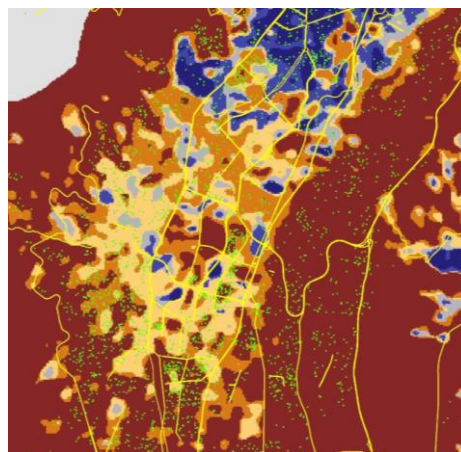
**Figura 17.** Persistencia espacio - Temporal meseta central de Quito.



*Figura 17a - Meseta central*



*Figura 17b - Calderón y Pomasqui*



*Figura 17c - Turubamba, La Argelia, Guamaní*

#### Leyenda

- Proyectos certificados
- Red vial principal
- Hotspots y persistencia**
- Valor**
- High : 5
- Low : 0
- Parroquias DMQ

Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)



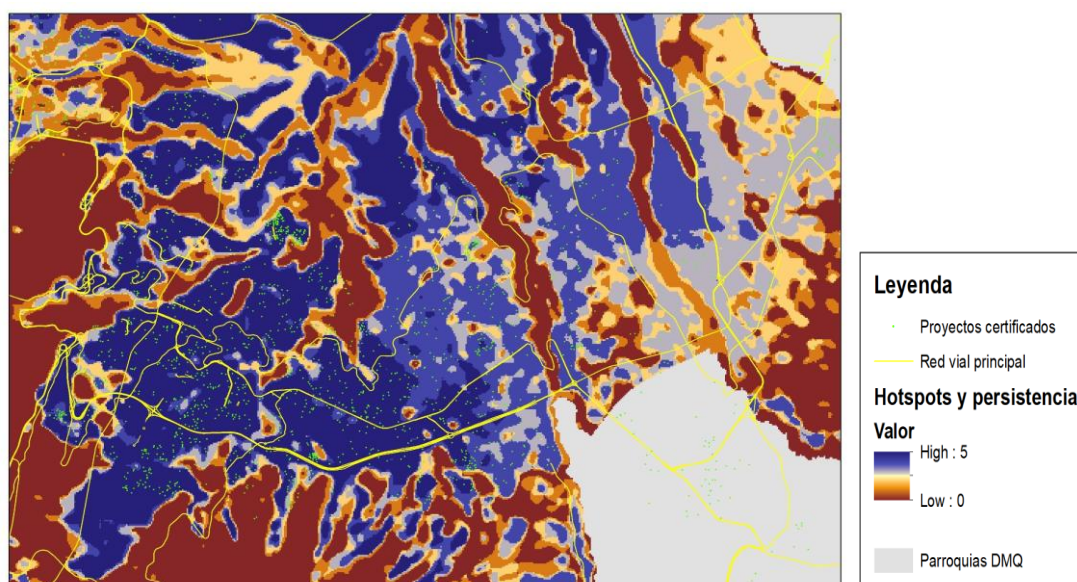
#### 4.6.2. Valle de Tumbaco y Puembo

Para la zona del valle de Tumbaco y Puembo, se destaca que las zonas de mayor persistencia espacio-temporal (4 a 5 años), se localizan sobre los ejes de la **Ruta Viva**, **Av. Oswaldo Guayasamin**, **Línea Férrea**, donde se han desarrollado principalmente, proyectos de vivienda de hasta 3 pisos, locales comerciales, y otros proyectos de ocio como canchas de padel, clubes deportivos, gimnasios. Esto evidencia cómo las infraestructuras de conectividad actúan como vectores de urbanización lineal. La instalación de conjuntos residenciales cerrados, clubes deportivos y equipamientos de ocio ha fragmentado el paisaje agrícola, aumentando la superficie impermeable y reduciendo la capacidad de regulación térmica del valle. A esto se suma la condición topográfica y climática de la zona, que al estar a menor altitud respecto a la meseta central, presenta mayor exposición solar en periodos secos, intensificando los procesos de acumulación térmica. (Figura 18).

Este desarrollo urbano es el resultado de la influencia de estas vías, que han actuado como catalizadores de un proceso inicial de urbanización lineal, que se ha ido expandiendo. Un caso particular de análisis, corresponde a la zona de la cabecera sur del Aeropuerto de Quito en **Tababela** (parque central, como en las zona de El Vergel, El Vergel Bajo, Oyambarillo) y **Yaruqui** (Tambillo, Santa Rosa, Centro de Yaruqui, Chaupi), en donde se observa que la persistencia alta de LST, está en el orden de los 3 años.

La persistencia espacio-temporal en esta zona, surge como consecuencia de una impermeabilización progresiva resultado de la presencia de pavimentos, estacionamientos, explanadas de servicios, pérdida y fragmentación de vegetación, así como su condición climática de valle, con alturas menores y mayor exposición directa a la radiación solar en épocas secas.

**Figura 18.** Persistencia espacio - temporal Valle de Tumbaco y Puembo.



Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

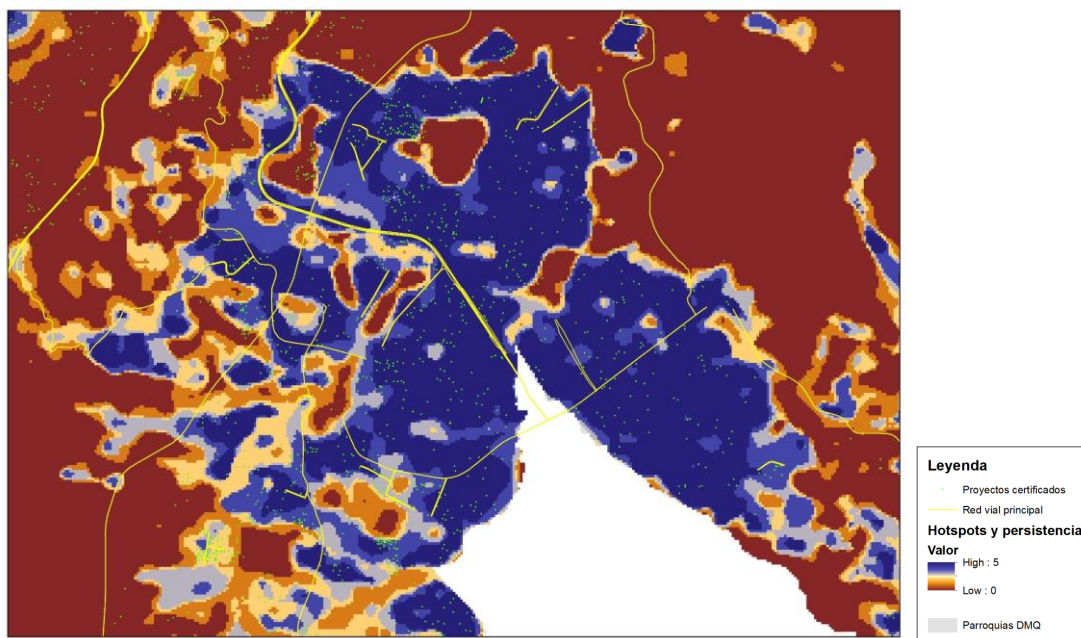


#### 4.6.3. Valle de Los Chillos

Para el sector del Valle de Los Chillos, se observa que las zonas de mayor persistencia (5 años) se inscriben dentro de los ejes de la Autopista General Rumiñahui (desde el ingreso a Conocoto, hasta la Av. Ilaló), Antigua vía a Conocoto, y Av. Ilaló (Figura 19), donde en los últimos cinco años, se han desarrollado proyectos de vivienda principalmente de 2 pisos, y con presencia importante de 3 y 4 pisos y frentes comerciales. La expansión urbana ha seguido reproduciendo un modelo disperso pero con densificación localizada en franjas lineales. La proliferación de proyectos habitacionales de baja y mediana altura ha sustituido progresivamente áreas agroecológicas, lo que, sumado al uso intensivo de pavimento y cubiertas oscuras, prolonga la persistencia de ICU en lapsos de hasta cinco años. Este patrón confirma que la interacción entre urbanización acelerada y características microclimáticas de valle refuerza la estabilidad térmica en la zona

La persistencia espacio temporal, obedece a un proceso de impermeabilización continua, resultante de la presencia de calzadas, estacionamientos, así como la presencia de materiales con bajo albedo como el asfalto, cubiertas oscuras, que tienen una alta absorción y almacenamiento térmico. Al igual que en el caso del Valle de Tumbaco, el Valle de Los Chillos se encuentra a una menor altitud respecto de la meseta central de Quito, con una condición climática con mayores niveles de insolación principalmente en zonas secas, lo que amplifica los picos de LST.

**Figura 19.** Persistencia espacio - temporal Valle de Los Chillos.



Fuente y Elaboración: CIUQ (2025)

En general, la persistencia observada en las distintas zonas del DMQ refleja un proceso de metropolización fragmentada, donde la expansión de la mancha urbana se acompaña de la

sustitución de coberturas vegetales por superficies artificiales y de un modelo de ocupación que privilegia la movilidad privada. Estas dinámicas no sólo intensifican las ICU, sino que también incrementan la segregación socioespacial, al asociarse los mayores niveles de persistencia térmica con sectores de alta densidad y conurbación, en contraste con áreas periféricas aún en transición.

## 5. Conclusiones

### *Comportamiento de las ICU en el quinquenio*

El año con el valor más alto promedio de temperatura superficial corresponde al 2024 con 35.33°C, en tanto que el año más fresco es el 2021 con 27.39°C. Los resultados de anuales promedio, sugieren una tendencia al alza de aproximadamente 1.0 ° C, pero con una alta variabilidad interanual.

Entre 2020 y 2024 se observan incrementos de temperatura superficial (LST) en varias parroquias de los valles orientales (Tumbaco, Puembo, Tababela y Yaruquí), así como en sectores de la meseta central y el sur de Quito. Estos cambios no son homogéneos, sino que responden a dinámicas urbanas, de uso del suelo y a condiciones de cobertura vegetal.

En zonas rurales o periurbanas se registran picos de incremento de temperatura superficial asociados a **pastos secos o no irrigados, suelos desnudos** y **plantaciones de eucalipto**, los cuales tienden a elevar la temperatura superficial debido a la baja humedad, al consumo intensivo de agua y a la menor capacidad reguladora frente a bosques nativos.

El Valle de Tumbaco y los valles orientales muestran un crecimiento urbano acelerado caracterizado por **urbanizaciones cerradas, densidades bajas ( $\approx 12$  hab./ha)** y conurbación desordenada. Esta expansión, al sustituir áreas agroecológicas por suelos impermeables, eleva sostenidamente la LST.

En parroquias como Kennedy, Ponceano, Belisario Quevedo, Rumipamba, Iñaquito y Jipijapa, los incrementos de LST alcanzan **11–16 °C** en barrios con procesos de **densificación y verticalización inmobiliaria**. La sustitución de jardines y áreas verdes por edificaciones, estacionamientos y pavimentos de bajo albedo genera un efecto acumulativo de calor urbano.

En Chillogallo y Quitumbe se registran los mayores aumentos (hasta **18 °C**). Estos se relacionan con la expansión de conjuntos habitacionales, bodegas y comercios que intensifican la impermeabilización del suelo, además de la escasa dotación de áreas verdes y recreativas, lo que reduce los procesos de evapotranspiración.

En parroquias como Conocoto, Amaguaña, Alangasí y La Merced, los incrementos de **4–9 °C** se asocian a proyectos habitacionales dispersos y urbanizaciones en torno a ejes viales principales, lo que está transformando progresivamente suelos agrícolas y agroecológicos en superficies urbanizadas.

### *Análisis de tendencias*

Al aplicar el test de Mann-Kendall para establecer tendencias, se observa que en el territorio estudiado los valores de Thau muestran tendencias crecientes, y tendencias decrecientes. Por otra parte, los resultados del p-valor indican que la mayor parte del territorio estudiado, tiene un p-valor mayor a 0.05, lo que muestra que no existe significancia estadística que demuestre un incremento sostenido en los 5 años analizados, sino más bien, un incremento de temperatura episódico, es decir que en los cambios de temperatura **predomina la variabilidad interanual**. Finalmente el análisis de la pendiente Theil-Sen indica que los cambios de temperatura superficial en °C, van desde -4.5°C a 10°C, pero la mayor parte de territorio cambió entre 1°C y 2°C de LST en los 5 años analizados

Para una serie de datos de 5 años, el test de Mann- Kendal tiene baja potencia para detectar tendencias suaves o no estrictamente monotónicas, dando como resultado una no-significancia, a pesar que el cálculo del valor neto sea grande.

Adicionalmente el mes de agosto de 2024, fue un año más cálido a nivel global con la presencia de un fenómeno del Niño 2023 - 2024, lo que elevó las temperaturas superficiales, dándole un carácter coyuntural. Esto pudo provocar que el Cambio neto ( $\Delta$  2020-2024) se infle y no garantice una tendencia monótona entre esos años.

Todo esto nos lleva a concluir que el predominio de calentamiento episódico en ~80% del territorio aporta una lectura más matizada de la dinámica térmica en el periodo 2020–2024. Estos episodios reflejan principalmente la **influencia de condiciones climáticas interanuales y eventos extremos recientes** (como el episodio de El Niño 2023–2024 y la marcada estacionalidad seca de agosto), así como la **heterogeneidad de coberturas** que caracteriza al territorio (urbano consolidado, periurbano, bosques húmedos, eucaliptos, matorrales secos, pastos naturales y cultivados). Estos resultados podrían considerarse como una línea base que podría corroborarse con otras ventanas temporales: 2020-2021, 2020-2022, 2020-2023 o una combinación de ellas.

### *Correlación entre albedo y LST*

#### *Correlación inversa*

Al analizar la incidencia del albedo en la conformación de la Isla de calor Urbana mediante el cálculo de la correlación, se encontraron sectores con **r local negativo, relevante y persistente**, lo implica que **a mayor albedo, menor LST**, esto sugiere que el albedo actúa como un mitigador térmico, asociado a techos y pavimentos, o mismas condiciones de sombra, humedad y material.

En términos de política pública, los **sectores con r local negativo** representan las zonas en las que un cambio en la materialidad, de techos, y pavimentos, podría ayudar a regular la temperatura superficial, mediante la implementación de normas que favorezcan el uso de techos fríos, pavimentos claros, fachadas verdes, entre otros.

De forma general para estos sectores, el estudio confirma que el crecimiento de la mancha urbana en el DMQ está directamente asociado con la intensificación y persistencia de las islas de calor urbano. La expansión hacia zonas rurales y de baja densidad, junto con la pérdida de cobertura vegetal, ha reducido la capacidad de regulación térmica natural del territorio.

El análisis estadístico en estos sectores, revela la relación estrecha entre el cambio de LST con respecto a albedo, dando indicios de una relación inversamente proporcional, sin dejar de lado que aspectos como el incremento de construcciones y cambio en los materiales, inciden de forma directa en el confort térmico, que también está estrechamente relacionado con los valores de LST y albedo.

Los resultados coinciden con la evidencia internacional (*Qian et al., 2019; Trlica et al., 2017; Zoran et al., 2023*), en cuanto a que la impermeabilización del suelo, el predominio de materiales de bajo albedo y la disminución de espacios verdes constituyen factores determinantes en el incremento de la temperatura superficial. En Quito, estos procesos se expresan de manera diferenciada según la zona: mayor intensidad térmica en el suroccidente denso y en la meseta central, y condiciones aún más favorables en los valles, aunque bajo amenaza por el crecimiento conurbano.

#### *Correlación directa*

Al analizar la incidencia del albedo en la conformación de la Isla de calor Urbana mediante el cálculo de la correlación, se encontraron sectores con **r local positivo, relevante y persistente**, lo que indica que el albedo por sí solo, no aporta en la regulación de la temperatura superficial, sino que predominan otros factores como suelos secos, falta de sombra, materiales con inercia térmica, poca humedad.

En términos de política pública, **sectores con r local positivo** representan las zonas en las que **la mitigación de la isla de calor urbana no depende únicamente de aumentar el albedo**, sino de integrar estrategias de revegetación, manejo de suelos y control de morfología urbana en las quebradas, laderas y zonas con presencia de vegetación.

Los resultados coinciden con lo señalado por (*Weng, 2009*), en cuanto a que coberturas vegetales densas como **bosques húmedos, bosques de eucaliptos**, donde pueden presentarse valores altos de albedo y LST debido a limitaciones de los sensores para captar procesos de enfriamiento subterráneo. También lo señalado por (*Weng, 2009*), se ratifica en zonas del DMQ con **coberturas herbáceas** (pastos naturales y cultivados), los cuales muestran fuertes variaciones estacionales, donde la pérdida de humedad conduce a correlaciones positivas persistentes entre albedo y LST. En Quito, estos fenómenos se presentan en zonas de laderas del complejo volcánico Pichincha, cerro Ilaló, zonas de quebradas, y zonas en procesos de consolidación en los valles de Tumbaco y Los Chillos.

#### *Correlación LST - Albedo versus Análisis de tendencias*

Si bien la mayoría de los cambios detectados no configuran tendencias temporales estadísticamente sostenidas, los análisis de correlación espacial y de persistencia siguen siendo válidos y relevantes, pues permiten identificar cómo las distintas coberturas y formas de ocupación del suelo se relacionan con la distribución de la temperatura superficial y con la conformación de islas de calor urbano. En otras palabras, la ausencia de tendencias significativas en amplias zonas no elimina la existencia de **patrones espaciales estructurales** ni la utilidad de correlacionar la LST con variables como albedo, uso de suelo o cobertura vegetal.

### *Persistencia espacio - temporal*

El análisis de persistencia espacio - temporal de las islas de calor, permite identificar sectores en los que los efectos de las islas de calor son estructurales y no temporales, así como identificar si los hotspots son permanentes ( 4-5 años), intermitente ( 3 años) o recientes (1-2 años).

Los resultados muestran que las ICU más persistentes (4–5 años) se concentran en la meseta central de Quito y en parroquias consolidadas como Calderón y Pomasqui. En estas áreas, la densificación inorgánica, el predominio de materiales de bajo albedo, la reducción progresiva de superficies vegetadas y la verticalización generan un microclima urbano estable en cuanto a acumulación de calor. La persistencia térmica se convierte así en un reflejo de procesos estructurales de consolidación urbana.

En sectores como Solanda, Chillogallo, Quitumbe y La Mena, la persistencia es reciente (1–2 años), coherente con procesos de consolidación recientes asociados a vivienda de baja altura, intensificación del comercio y aumento de la impermeabilización del suelo. Esto evidencia cómo la consolidación urbana en transición genera patrones de calor que, aunque menos estables, tienden a reaparecer debido a la combinación de cambios físicos y dinámicas socioeconómicas.

En Turubamba, La Argelia y Guamaní, la aparición de ICU con persistencia baja (1 año) se vincula a proyectos constructivos (bodegas, industria, locales comerciales) que introducen superficies de baja reflectancia (albedo bajo) y alta inercia térmica. La variabilidad en el tiempo responde a cambios en el uso del suelo, movimiento de tierras o nuevas infraestructuras, lo que genera huellas térmicas puntuales asociadas a fases de transformación urbana.

En el Valle de Tumbaco y Puembo, así como en Los Chillos, la persistencia (3–5 años) se concentra a lo largo de ejes viales principales (Ruta Viva, Av. Guayasamín, Autopista General Rumiñahui, Av. Ilaló). Estos corredores han inducido procesos de urbanización lineal que sustituyen áreas agroecológicas por proyectos de vivienda y comercio, con superficies impermeables y cubiertas oscuras que intensifican el efecto térmico. La menor altitud y mayor exposición solar de los valles refuerzan la estabilidad térmica.

La persistencia térmica revela que la expansión metropolitana se acompaña de una fragmentación del paisaje natural y un modelo de ocupación que prioriza la movilidad privada. Esto no solo intensifica las ICU, sino que también acentúa la segregación socioespacial: los mayores niveles de persistencia se asocian a áreas consolidadas y densas, mientras que las periferias muestran patrones más transitorios ligados a transformaciones puntuales.

Finalmente, este estudio, plantea una metodología con bases sólidas de criterio científico y geoestadístico, que puede ser aplicado y replicado en investigaciones posteriores con mayor detalle. En especial, estudios de la relación de materiales en edificaciones en Quito donde el aumento de LST tiene una tendencia al alza.

## **6. Recomendaciones**

Las políticas públicas deben priorizar estrategias integrales de mitigación y adaptación, tales como la implementación de techos reflectivos, la arborización intensiva, la protección de



quebradas y corredores verdes, y la consolidación de un modelo de ciudad compacta y policéntrica. De no atenderse estos aspectos, la ciudad corre el riesgo de profundizar sus desigualdades socioambientales y de incrementar su vulnerabilidad frente al cambio climático.

No obstante, y sabiendo que la presente investigación estableció diferencias importantes en distintos sectores de la ciudad, las acciones municipales podrían sectorizar y/o priorizarse de la siguiente manera:

- En zonas con **persistencia espacio-temporal permanente** se recomienda promover estrategias de mitigación estructural (incremento de vegetación, materiales de alto albedo, ventilación urbana).
- En zonas con **persistencia espacio temporal intermitente**, se recomienda establecer políticas para orientar la consolidación hacia modelos menos impermeables, con mayor provisión de espacios verdes, y
- En zonas con **persistencia espacio- temporal reciente**, se recomienda integrar en la planificación urbana y de infraestructura, medidas de regulación térmica y conservación de coberturas naturales.

A nivel de gestión de información, se recomienda generar nuevas técnicas de teledetección que permitan el análisis de LST y albedo de forma automatizada. También, considerar el desarrollo de nuevas metodologías para abordar problemáticas de nubosidad en el momento de obtener las imágenes satelitales gratuitas, de tal forma que el factor climático deje de ser un problema en el estudio de fenómenos urbanos.

## 7. Bibliografía

Andres, P., Sanchez-Aparicio, M., Del Pozo, S., Lagüela, S., Hernández-López, D. & Gonzalez-Aguilera, D. (2024) *A New Methodology for Estimating Surface Albedo in Heterogeneous Areas from Satellite Imagery*. Applied Sciences, 14(1), 75. <https://doi.org/10.3390/app14010075>.

Andrés-Anaya, P., Sánchez-Aparicio, M., del Pozo, S. y Lagüela, S. (2021) ‘Correlation of Land Surface Temperature with IR Albedo for the Analysis of Urban Heat Island’, *Engineering Proceedings*, 8(1), artículo 9. <https://doi.org/10.3390/engproc2021008009>.

Berra, E. F., Fontana, D. C., Yin, F. & Breunig, F. M. (2024) *Harmonized Landsat and Sentinel-2 Data with Google Earth Engine*. Remote Sensing, 16(15), 2695. <https://doi.org/10.3390/rs16152695>.

Cal y Mayor y Asociados & Gonzalo Córdova Abogados (2022). *Formulación del Plan Maestro de Movilidad Sostenible DMQ 2022-2042*. Quito: Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.

Carrión, F. (2019). El espacio público es una relación no un espacio. In F. Carrión Mena & M. Dammer-Guardia (eds.), *Derecho a la ciudad: una evocación de las transformaciones urbanas en América Latina* (pp. 191–219). IFEA, CLACSO, FLACSO Ecuador.

Cubillo, P., Orellana, D. y Maigua, P. (2020) *Análisis de la distribución espacial de la temperatura superficial y la valoración de criterios que influyen en la isla de calor urbano (ICU) en el Distrito Metropolitano de Quito*. Quito: Centro de Información Urbana de Quito (CIUQ), 254 pp. Disponible en: [www.ciuq.ec/IslandsDeCalor.html](http://www.ciuq.ec/IslandsDeCalor.html) Accedido el 17 septiembre 2025.

El Grupo de Liderazgo Climático C40 (2021). *Declaración de C40 por unas Calles Libres de Combustibles Fósiles*. Quito: El Grupo de Liderazgo Climático C40.

Entidad Colaboradora de Proyectos del Colegio de Arquitectos de Pichincha (CAE-P) (2025) *Proyectos certificados de Quito, 2015–2025* [base de datos interna no publicada]. Quito: Entidad Colaboradora de Proyectos del CAE-P. Consultado el 5 de septiembre de 2025.

Getis, A. y Ord, J.K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 24(3), pp. 189–206. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261>.

Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos (2022). *Censo Ecuador*. Disponible en : <https://n9.cl/4eo28c>. Accedido el 05 de septiembre del 2025.

Jana, M. y Sar, N. (2016). Modeling of hotspot detection using cluster outlier analysis and Getis-Ord Gi\* statistic of educational development in upper-primary level, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2, 60. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0122>.

Jiang, Y., Deng, C., Chen, Z. et al. (2020). Evaluación del efecto de enfriamiento y del comportamiento anti-ahuellamiento de pavimentos térmicamente resistentes y termorreflectantes. *Revista Internacional de Ingeniería de Pavimentos*, 21, pp. 447-456.

Khalid, W., Shamim, S.K. y Ahmad, A. (2024) 'Exploring urban land surface temperature with geospatial and regression modelling techniques in Uttarakhand using SVM, OLS and GWR models', *Evolving Earth*, 2, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.eve.2024.100038>.

Maigua, P. (2020) *Ciudad y Cambio Microclimático*. Tesis (Doctorado en Arquitectura y Urbanismo), Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Brasília. 322 f., il. Disponible en: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/38827>.

Maes, W.H. et al. (2018) Can UAV-based infrared thermography be used to study the canopy temperature of Eucalyptus? *Remote Sensing*, 10(12), 2062.

Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (2016). *Atlas Ambiental de Quito*. Quito: MDMQ.

Naserikia, M., Hart, M.A., Nazarian, N. y Bechtel, B. (2022) 'Background climate modulates the impact of land cover on urban surface temperature', *Scientific Reports*, 12, 15433. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19431>.

Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (2023). *Informe técnico del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito: MDMQ.

Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (2024). *Análisis de tendencias urbanas y ambientales del DMQ*. Quito: MDMQ.

Polydoros, A., Mavrakou, T. and Cartalis, C. (2018) 'Quantifying the Trends in Land Surface Temperature and Surface Urban Heat Island Intensity in Mediterranean Cities in View of Smart Urbanization', *Urban Science*, 2(1), 16. <https://doi.org/10.3390/urbansci2010016>

Ravanelli, R., Nascetti, A., Cirigliano, R. V., Di Rico, C., Leuzzi, G., Monti, P. & Crespi, M. (2018) *Monitoring the Impact of Land Cover Change on Surface Urban Heat Island through Google Earth Engine: Proposal of a Global Methodology, First Applications and Problems*, *Remote Sensing*, 10(9), 1488. <https://doi.org/10.3390/rs10091488>

Rodrigues de Almeida, C., Garcia, N., Campos, J.C., Alírio, J., Arenas-Castro, S., Gonçalves, A., Sillero, N. y Teodoro, A.C. (2023). Time-series analyses of land surface temperature changes with Google Earth Engine in a mountainous region. *Heliyon*, 9, e18846. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18846>.

Roteta, E., Bastarrika, A., Franquesa, M. & Chuvieco, E. (2021) 'Landsat and Sentinel-2 based burned area mapping tools in Google Earth Engine', *Remote Sensing*, 13(4), article 816. <https://doi.org/10.3390/rs13040816>.

Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda - Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (2021) *Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Distrito Metropolitano de Quito 2021–2033*. Ordenanza Metropolitana 001\_2021 (13 septiembre 2021). Quito: MDMQ. Disponible en: [gobiernoabierto.quito.gob.ec/plan-pmdot/](http://gobiernoabierto.quito.gob.ec/plan-pmdot/). Consultado el 5 septiembre 2025.

Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda (2021). *Expansión urbana y sostenibilidad en Quito*. Quito: MDMQ.

Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda & ONU-Habitat (2023). *Accesibilidad y cobertura de la red de parques del DMQ: Análisis espacial del sistema de espacio público en el área urbana*. Observatorio Urbano del DMQ.

Secretaría de Ambiente del DMQ (2019). *Reporte Inventario de GEI 2019*. Quito: Municipio del Distrito Metropolitano de Quito

Sen, S., Roesler, J., Ruddell, B. et al. (2019). Estrategias de pavimento frío para mitigar las islas de calor urbanas en los suburbios de Phoenix, Arizona. *Sostenibilidad*, 11(16), p. 4452.

Shawky, M., Ahmed, M.R., Ghaderpour, E., Gupta, A., Achari, G., Dewan, A.M. y Hassan, Q.K. (2023). Remote sensing-derived land surface temperature trends over South Asia. *Ecological Informatics*, 74, 101969. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101969>.

Sistema de Áreas de Quito & Fondo para la Protección del Agua (2022). *Informe sobre cobertura vegetal y cambio de uso del suelo en el DMQ*. Quito: FONAG.

Thuillier, G., Hersé, M., Labs, D., Foujols, T., Peetermans, W., Gillotay, D., Simon, P. C. & Mandel, H. (2003) 'The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the ATLAS and EURECA missions', *Solar Physics*, 214(1), pp. 1–22. <https://doi.org/10.1023/A:1024048429145>.

Trlica, A., Hutyra, L.R., Schaaf, C.L., Erb, A. y Wang, J.A. (2017) *Albedo, Land Cover, and Daytime Surface Temperature Variation Across an Urbanized Landscape*. *Earth's Future*, 5(11), pp. 1084–1101. <https://doi.org/10.1002/2017EF000569>.

Qian, Z., Sun, Y., Chen, Z., Ji, F., Feng, G. y Ma, Q. (2023) 'Analysis of Land Surface Temperature Sensitivity to Vegetation in China', *Remote Sensing*, 15(18), 4544. <https://doi.org/10.3390/rs15184544>.

Utama, P. P., Yoni, D. R., Amalia, D., Ulhaq, I. D. & Arya, M. S. F. (2024) 'Geothermal potential area analysis using Landsat 8 OLI/TIRS and digital elevation model images (case study: Lawu Mount, Central Java)', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1339(1), article 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1339/1/012004>.

Wang, F., Shao, W., Yu, H., Kan, G., He, X., Zhang, D., Ren, M. y Wang, G. (2020) 'Re-evaluation of the power of the Mann–Kendall test for detecting monotonic trends in hydrometeorological time series', *Frontiers in Earth Science*, 8, 14. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00014>

Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), pp.335–344. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007>

Wong, T.L.X., Lim, E.L., Hasan, M.R.M., Sougui, O.O., Milad, A. and Qu, X. (2024). Effectiveness of heat-reflective asphalt pavements in mitigating urban heat islands: A systematic literature review. *Journal of Road Engineering*, 4(4), pp. 399-420. doi: 10.1016/j.jreng.2024.04.008.

Yin, C., Yuan, M., Lu, Y., Huang, Y. & Liu, Y. (2018) 'Effects of urban form on the urban heat island effect based on spatial regression model', *Science of the Total Environment*, 634, pp. 696–704. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.350>.

Zoran, M., Radvan, R., Savastru, D., Tautan, M. y Penache, A. (2024) 'Urban green space and albedo impacts on surface temperature in Bucharest metropolitan area'. En: *Proceedings of SPIE*, 13212: *Tenth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2024)*, Paphos, Chipre, 8–9 abril 2024. Bellingham, WA: SPIE. Paper 132120A. <https://doi:10.1117/12.3034999>.