

Artículo

“Análisis de Islas de Calor en la Ciudad de Otavalo Mediante Técnicas de Teledetección”

“Analysis of Heat Islands in the City of Otavalo Using Remote Sensing Techniques”

Anderson Sergio Caicedo Barahona  ¹

Universidad Técnica del Norte, Ecuador¹

Recibido: 17 de junio del 2026

Aceptado: 9 de septiembre del 2026

Publicado: 23 de octubre del 2026



Resumen

El presente estudio analiza la dinámica espaciotemporal de las Islas de Calor Urbanas (ICU) en la ciudad de Otavalo, Ecuador, durante el periodo 2015–2024, empleando técnicas de teledetección y el procesamiento de imágenes LANDSAT que permitieron calcular índices como NDVI, NDBI, Pv, TOA, BT y la Temperatura Superficial Terrestre (LST), se identificaron patrones térmicos y su relación con cobertura y uso de suelo. Los resultados evidencian un crecimiento de la zona urbana del 14.81 %, una disminución significativa de los bosques y una expansión de tierra agropecuaria, tierras en barbecho y pastos. La LST alcanzó su valor máximo en 2024 (29.53 °C), confirmando la intensificación del fenómeno térmico en áreas densamente urbanizadas con alta presencia

de superficies impermeables y baja cobertura vegetal. El análisis revela una relación inversa entre el NDVI y la LST, y una correlación positiva entre el NDBI y las altas temperaturas superficiales. Las “islas verdes” periféricas demuestran un efecto regulador térmico, subrayando la importancia de preservar y aumentar la vegetación urbana. Se concluye que el avance de las ICU en la ciudad de Otavalo está directamente vinculado al crecimiento urbano desordenado y la pérdida de vegetación, lo que plantea riesgos para la salud y el confort térmico de la población. El estudio propone estrategias de mitigación en zonas específicas dentro de la mancha urbana.

Palabras claves: Otavalo, teledetección, ICU, islas de calor urbano, fenómeno.

Abstract

This study analyzes the spatiotemporal dynamics of Urban Heat Islands (UHI) in the city of Otavalo, Ecuador, during the period 2015–2024, using remote sensing techniques and LANDSAT image processing to calculate indices such as NDVI, NDBI, Pv, TOA, BT, and Land Surface Temperature (LST). Thermal patterns and their relationship with land cover and land use were identified. The results show a 14.81% growth in the urban area, a significant decrease in forests, and an expansion of agricultural land, fallow land, and pastures. LST reached its maximum value in 2024 (29.53°C), confirming the intensification of the thermal phenomenon in densely urbanized areas with a high presence of impervious surfaces and low vegetation cover. The analysis reveals an inverse relationship between NDVI and LST, and a positive correlation between NDBI and high surface temperatures. Peripheral “green islands” demonstrate a thermal regulating effect, underscoring the importance of preserving and increasing urban vegetation. It is concluded that the advance of ICUs in the city of Otavalo is directly linked to disorderly urban growth and loss of vegetation, posing risks to the health and thermal comfort of the population. The study proposes mitigation strategies in specific areas within the urban sprawl.

Keywords: Otavalo, remote sensing, ICU, urban heat islands, phenomenon.

Introducción

El incremento acelerado de las ciudades, junto con el aumento de la población y la destrucción de los recursos naturales es uno de los mayores factores que deterioran la calidad ambiental, en especial en los entornos urbanos (Barrera et al., 2022). La variabilidad climática reflejada en la variación de la temperatura y en el aumento en la intensidad y frecuencia de eventos extremos han contribuido a generar condiciones cada vez más adversas en estas zonas. Este incremento urbano constante a ocasiones que cada vez se reduzcan los espacios permeables y las áreas verdes, debido al uso intensivo del suelo y a procesos de urbanización cada vez más acelerados, lo cual limita la capacidad natural de regulación ambiental del territorio (Villanueva et al., 2013).

Asimismo, los centros urbanos se han visto afectados por el fenómeno de la Isla de Calor Urbano (ICU), manifestándose como una consecuencia del cambio climático al experimentar temperaturas más altas en comparación de sus alrededores rurales. Este fenómeno surge porque los materiales de construcción como, pavimento, asfalto, hormigón entre otros presentes en edificios y calles de las ciudades que van absorbiendo, reteniendo y liberando calor, intensificando las condiciones térmicas del territorio. Las ICU se generan principalmente por factores antropogénicos, destacando la manera en que se organiza el espacio urbano, la constante liberación de calor producto de las actividades humanas y la contaminación atmosférica, elementos que en conjunto van favoreciendo la acumulación de calor y afectando en la calidad ambiental de las ciudades (Almeida et al., 2021).

El fenómeno de las ICU se ha registrado en varias partes del mundo, generando afectaciones tanto en los ecosistemas naturales como en los paisajes urbanos y en la salud de las personas (Shi et al., 2005). Se estima que, para el año 2050, cerca del 70 % de la población mundial residirá en zonas urbanas (Chang et al., 2015). Este escenario resulta aún más crítico en regiones con climas húmedos, cálidos y expuesta a una fuerte radiación solar, donde la combinación de estos factores, junto con procesos antropológicos como la deforestación y una planificación urbana inexistente o ilimitada, va intensificando los efectos de las ICU y empeorando las condiciones ambientales (Zezzo et al, 2025).

Con el paso de los años, los avances tecnológicos han permitido incrementar el conocimiento y las posibles soluciones frente a los problemas derivados del crecimiento demográfico, urbano y del cambio climático. En este contexto, la teledetección se ha consolidado como una herramienta fundamental para el análisis y monitoreo del territorio urbano en diferentes escalas espaciales y temporales. Desde el primer lanzamiento del satélite LANDSAT el 23 de Julio de 1972 por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2022), se ha logrado un notable progreso en la adquisición de información de datos espaciales mediante imágenes satelitales de alta calidad. Estas imágenes, combinadas con técnicas de geoprocesamiento de índices espectrales multitemporales, permiten detectar cambios en el uso y cobertura del suelo, así como identificar patrones de acumulación térmica en zonas críticas de las ciudades. Gracias a ello, es posible comprender con mayor precisión cómo los elementos físicos del entorno influyen en la dinámica ambiental y regulación térmica de los espacios urbanos (Shi et al., 2021).

Desarrollo

La Impacto del crimen organizado en el rendimiento escolar

El rápido crecimiento urbano y las variaciones asociadas al cambio climático han provocado alteraciones en el comportamiento térmico de varias ciudades. La expansión de superficies construidas, la disminución de áreas vegetadas y el aumento de actividades antropogénicas han favorecido la aparición de microclimas más cálidos, convirtiendo a las Islas de Calor Urbano (ICU) en una problemática ambiental de creciente atención debido a sus efectos sobre la calidad ambiental (Aguilar & Cabrera, 2022).

La transformación constante del territorio urbano y el crecimiento de las ciudades han intensificado la presencia de las Islas de Calor Urbano, convirtiéndose en uno de los problemas ambientales más relevantes a escala global y local. Debido a la progresiva sustitución de superficies naturales por materiales impermeables y de alta capacidad térmica, ocasiona que las áreas urbanas almacenen y liberen calor con mayor intensidad (Gallo et al., 2024). Como consecuencia se genera incrementos en la temperatura afectando al equilibrio ambiental y condiciones de vida.

A medida que las ciudades añaden infraestructura como edificaciones, pavimentos y asfaltos la capacidad del entorno para regular el calor disminuye, generando ambientes urbanos secos, más cálidos y vulnerables (Lozada, 2020). En ciudades con características climáticas similares a las de Otavalo, donde coexisten la radiación intensa, la variación de humedad y una expansión urbana constante, la aparición de ICU puede ser aún más marcada y persistente.

Justificación

El incremento de las temperaturas en entornos urbanos, como en la ciudad de Otavalo, ha generado efectos negativos sobre la calidad ambiental, el confort térmico, el consumo energético y la salud de la población. Esta situación ha desencadenado la formación del fenómeno conocido como Isla de Calor Urbano, aunque es un problema ampliamente documentado a nivel global, existe una limitada disponibilidad de estudios actualizados y sistemáticos a ciudades intermedias. La falta de información genera vacíos dificultando la implementación de estrategias de mitigación y planificación territorial (Villanueva et al., 2013).

Ante este escenario, resulta fundamental recurrir a herramientas como la teledetección y el geoprocesamiento, que permiten analizar el uso de suelo, identificar patrones térmicos y obtener mediciones precisas de la temperatura superficial (Barrera et al., 2022). El empleo de estas tecnologías es clave para comprender el fenómeno en el área de estudio y apoyar la toma de decisiones hacia un desarrollo urbano más sostenible y resiliente frente al cambio climático.

El presente estudio, se enmarca en los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS), en específico en el ODS 11 el cual promueve ciudades más inclusivas sostenibles y seguras y el ODS 13 que busca impulsar acciones apremiantes para combatir el cambio climático y sus efectos, por medio de una análisis técnico esta investigación pretende fortalecer la planificación urbana controlado y resiliente, para contribuir el desarrollo de políticas públicas que ayuden a mejorar el bienestar de la población y reducir el impacto ambiental (Organización de las Naciones Unidas, 2025).

Preguntas directrices

¿Cómo ha variado la temperatura superficial urbana (LST), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de diferencia normalizada de construcciones (NDBI) en el periodo 2015 – 2024, dentro de la ciudad de Otavalo?

¿Qué influencia existe entre la temperatura superficial (LST), índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de diferencia normalizada de construcciones (NDBI), en la consolidación de islas de calor urbanas en la ciudad de Otavalo durante el periodo de estudio?

Objetivos

Objetivo General

Analizar la temperatura superficial, áreas verdes y edificaciones urbanas mediante técnicas de teledetección como la temperatura superficial urbana (LST), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de diferencia normalizada de construcciones (NDBI) en el periodo 2015 – 2024, dentro de la ciudad de Otavalo

Objetivo Específico

- Determinar los cambios temporales en los índices LST, NDVI y NDBI en la ciudad de Otavalo entre los años 2015 y 2024.
- Analizar la influencia de la presencia de áreas verdes y zonas de construcción urbanas en la consolidación de las islas de calor.

Marco Legal

En la Constitución de la República del Ecuador, se establece las bases para el ordenamiento territorial, la gestión urbana sostenible y la protección ambiental, aspectos claves para enfrentar el fenómeno de las Islas de Calor (Constitución de la República del Ecuador, 2008). Por otra parte, es derecho fundamental de todas las personas a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado (Art.14), con una agricultura sustentable y agroecología, promoviendo un vínculo armónico con el entorno natural (Art. 281). De esta forma se garantiza la conservación del patrimonio natural, lo cual se ve afectado por la expansión urbana acelerada (Ley N°. 2016-1196, 2016).

De acuerdo con el Código Orgánico de Organización Territorial (COOTAD), indica que es obligación de los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) Municipales realizar planes de ordenamiento territorial para regular el uso de suelo urbano y rural (Código Orgánico de Organización Territorial, 2010). Así mismo el artículo 2 del Registro Oficial 449 establece que la planificación territorial debe integrar la dimensión ambiental, de igual forma el Artículo 41 del COOTAD obliga a los GAD a elaborar planes que consideren los riesgos y sostenibilidad. Estas facultades permiten al GAD de la ciudad de Otavalo implementar estrategias contra las ICU, como áreas verdes o regulación sobre materiales constructivos.

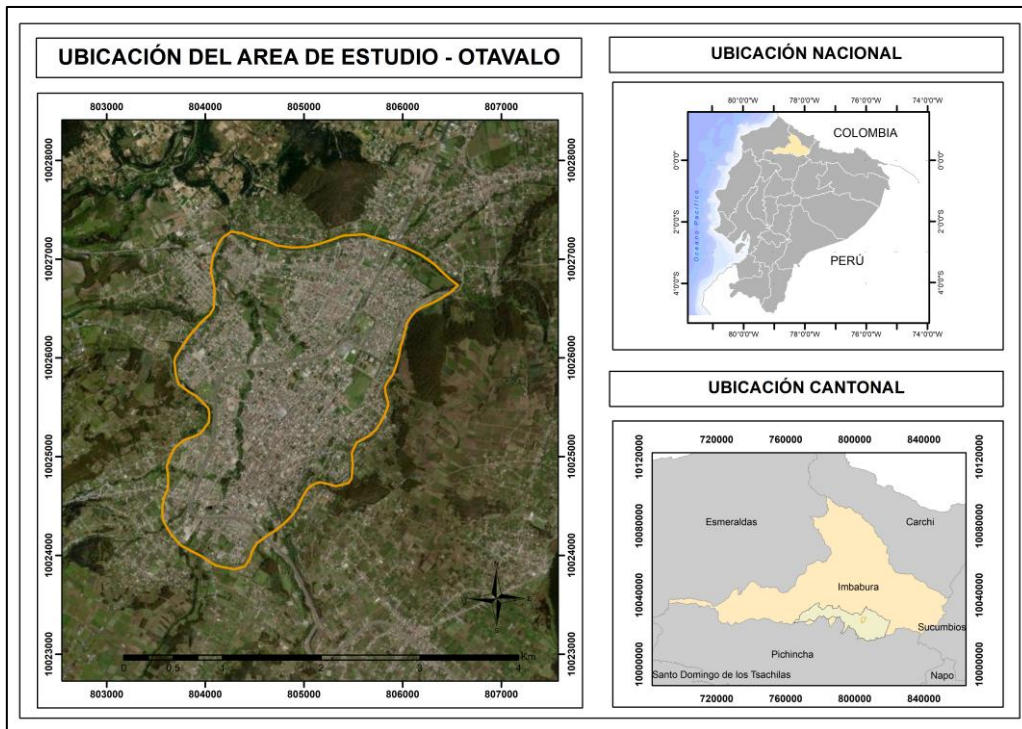
Metodología

La presente investigación se centra en analizar la dinámica espaciotemporal de las islas de calor urbanas (ICU) en la ciudad de Otavalo durante el periodo 2015 - 2024. Para cumplir con los objetivos planteados, se realizó una metodología cuantitativa que constituye la obtención, autocorrelación espacial, procesamiento y análisis de imágenes satelitales multiespectrales, junto con la aplicación de índices térmicos y biofísicos.

Área de Estudio

La ciudad de OTAVALO está ubicada en la región interandina del norte del Ecuador, en las coordenadas UTM (0°14'00" N, 78°16'00" O), en la provincia de Imbabura. Se encuentran a una altitud media de alrededor de los 2550 m.s.n.m. aunque en el cantón se registran variaciones altitudinales: desde zonas bajas hasta montañas que superan los 4100 m.s.n.m (Mendoza & Moncayo, 2012). Presenta un clima andino templado, con una temperatura promedio alrededor de 16 °C, la precipitación es importante a lo largo del año, lo que implica una humedad relativa significativa, un factor climático que puede incidir en los balances térmicos urbanos. Consta con una población total de 125 785 habitantes y en la zona urbana con un aproximado de 41 718 habitantes (INEC, 2022) .

Figura 1. Área de estudio - Ciudad de Otavalo en Imbabura



Según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) el Cantón tiene una superficie de 579 km². La zona urbana del cantón tiene una superficie urbana de 82,10 km², mientras que la parte rural incluye 424,37 km². El cantón tiene varias parroquias rurales y urbanas: nueve parroquias rurales y la cabecera cantonal siendo la ciudad de Otavalo (Gobierno Autónomo Descentralizado de Otavalo, 2020). Este último se presenta como un sitio indicado para el análisis de las Islas de Calor Urbano (ICU) debido a sus características geográficas, demográficas, climáticas y su dinámica de urbanización.

La delimitación del área de estudio se restringió a la mancha urbana consolidada de la ciudad con el propósito de evitar sesgos en la interpretación del comportamiento térmico. La inclusión de áreas periurbanas introduce superficies con dinámicas térmicas controladas por factores agrícolas, topográficos y estacionales, las cuales no responden directamente al efecto urbano y pueden diluir la intensidad real de las Islas de Calor Urbano (Oke, 1987), además se reduce el análisis del contraste térmico entre el núcleo urbano y su entorno inmediato, subestimando la magnitud del fenómeno y afectando la comparabilidad espacial de los resultados (Voogt & Oke, 2003; Arnfield, 2003).

Aunque en los últimos años el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal de Otavalo ha realizado iniciativas orientadas al fortalecimiento de áreas verdes en espacios públicos, estas acciones aún resultan insuficientes frente al avance de la urbanización y la creciente de infraestructura. Entre los proyectos más relevantes se destaca la intervención en el Parque Bolívar, donde se ha renovado mobiliario urbano, áreas recreativas y sistemas de iluminación, para mejorar el uso comunitario. Además, la municipalidad ha desarrollado programas de arborización y reforestación en barrios urbanos a fin de incrementar las áreas verdes (Chacón, 2024). Sin embargo, pese a estos avances, las áreas del centro urbano continúan mostrando una alta ocupación del suelo y una disponibilidad limitada de espacios naturales, lo que mantiene la vulnerabilidad de la ciudad ante el incremento de temperaturas y las Islas de Calor

Primera Fase: Cambios temporales en los índices LST, NDVI y NDBI en la ciudad de Otavalo

Se accedió al portal USGS EarthExplorer para la descarga de imágenes satelitales Landsat 8 OLI/TIRS correspondientes a los años 2015, 2019, 2022 y 2024. Posteriormente, se realizó un pre-procesamiento con la corrección atmosférica en el software ArcGIS Pro y finalmente se recortó con el área correspondiente a zona urbana de Otavalo.

Identificación de la Escena	Sensor	Fecha de Adquisición	Hora de Paso (UTC)
LC08_L1TP_010060_20150823_20200909_02_T1	OLI/TIRS	23-08-2015	15:25:50
LC08_L1TP_010060_20190811_20200902_02_T1	OLI/TIRS	11-08-2019	15:26:07
LC08_L1TP_010060_20220902_20220913_02_T1	OLI/TIRS	02-09-2022	15:26:49
LC09_L1TP_010060_20240830_20240830_02_T1	OLI/TIRS	30-08-2024	15:26:04

Clasificación Supervisada

Para identificar los distintos tipos de cobertura terrestre y uso del suelo (áreas verdes y zonas de construcción), a partir de datos multiespectrales se realizó una clasificación supervisada definiendo cinco coberturas: 1) Zona Urbana, 2) Bosques, 3) Tierras en Barbecho, 4) Pastos y 5) Tierra Agropecuaria. Se utilizará una combinación de bandas 6, 5, 2 (SWIR1, NIR, Rojo) utilizada para resaltar las diferencias entre la vegetación, las áreas urbanas y otros tipos de cobertura. El proceso se realizó en el software ArcGIS Pro, con ayuda de herramientas como *Create Signature* y *Maximum Likelihood Classification*. Este método asigna cada píxel de una imagen satelital a una clase específica basada en la probabilidad de que ese píxel corresponda a esa clase (Arai, 2020). Para la validación con el Índice Kappa se seleccionará aleatoriamente el 75 % de los puntos para entrenamiento y el 25 % restante.

Cálculo de los Índices de Teledetección

Se calculará los siguientes índices para cada año (2015, 2019, 2022 y 2024) utilizando las bandas correspondientes de las imágenes Landsat en ArcGIS Pro, aplicando las siguientes fórmulas:

Índice de vegetación Normalizada (NDVI)

El NDVI cuantifica la densidad y el estado de la vegetación verde. Se calcula usando la siguiente ecuación (1).

$$NDVI = \frac{(Banda\ 5 + Banda\ 4)}{(Banda\ 5 - Banda\ 4)} \quad Ec.\ (1)$$

Los valores resultantes varían entre -1 y +1, donde valores positivos altos indican vegetación densa y saludable, valores cercanos a cero representan suelo desnudo o cuerpos de agua, y valores negativos indican nubes, nieve o agua.

- **Radiancia Espectral (TOA)**

Convierte los valores digitales de la banda térmica a radiancia espectral en la parte superior de la atmósfera, se calculará usando la siguiente ecuación (2).

$$TOA = 0.0003342 * \text{Band 10} + 0.1 \quad \text{Ec. (2)}$$

- **Temperatura de Brillo (BT)**

Convierte la radiancia espectral a temperatura de brillo utilizando la función inversa de Planck, se calcula usando la siguiente ecuación (3).

$$BT = \frac{1321.0789}{\ln\left(\frac{774.8853}{TOA + 1}\right) - 273.15} \quad \text{Ec. (3)}$$

- **Proporción de Vegetación (Pv)**

Estima la fracción de vegetación utilizando el NDVI, en la cual se deben determinar los valores mínimo y máximo de NDVI en el área de estudio para cada año, se calcula usando la siguiente ecuación (4).

$$Pv = \left(\frac{NDVI_{max} - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}\right)^2 \quad \text{Ec. (4)}$$

Tiene rangos equivalentes de 0 a 1 donde, 0 se lo clasifica como suelo desnudo o sin vegetación y 1 cubierto de vegetación.

- **Emisividad (ϵ):**

La emisividad de la superficie se calcula a partir de la fracción de vegetación presente, empleando la siguiente ecuación simplificada:

$$\epsilon = 0.004 * Pv + 0.986 \quad \text{Ec. (5)}$$

Esta fórmula permite estimar la emisividad considerando el porcentaje de cobertura vegetal, ya que las áreas con mayor presencia de vegetación suelen presentar valores más altos de emisividad. En el caso de superficies con poca o nula vegetación como las zonas urbanas o suelo desnudo es posible emplear valores específicos de emisividad correspondientes a esos tipos de cobertura.

La emisividad describe la capacidad de una superficie para emitir energía térmica: a mayor emisividad, menor acumulación de calor, mientras que valores bajos favorecen un mayor calentamiento superficial. Los valores suelen estar en los siguientes rangos: para zonas vegetadas se sitúan entre 0.92 y 0.99, en áreas urbanas pueden oscilar entre 0.92 y 0.96, y para terrenos desnudos pueden descender hasta alrededor de 0.89.

- ***Temperatura de Superficie de la Tierra (LST)***

Por último, se calcula la LST corrigiendo la temperatura de brillo por la emisividad de la superficie, se calcula usando la siguiente ecuación (6).

$$LST = \frac{"BT"}{1 + "TOA" * \left(\frac{"BT"}{14388}\right) * \ln(\varepsilon)} \quad Ec. (6)$$

- ***Índice de diferencia Normalizada de Construcciones (NDBI)***

El NDBI resalta las áreas construidas, se calcula usando la siguiente ecuación (8).

$$NDVI = \frac{(\text{Banda 6} + \text{Banda 5})}{(\text{Banda 6} - \text{Banda 5})} \quad Ec. (8)$$

Los valores se sitúan entre +1 indicando áreas construidas, valores cercanos a 0 representan zonas construidas y valores negativos (-1) pueden indicar cuerpos de agua.

Segunda Fase: Influencia de la presencia de áreas verdes y zonas de construcción urbanas en la consolidación de las islas de calor.

- ***Cálculo de la Isla de Calor Urbana (ICU)***

El ICU cuantifica la diferencia térmica entre el núcleo urbano y sus alrededores más fríos, reflejando cómo los cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal modulan ese gradiente (Xu et al., 2013; Rahaman et al., 2023). Se calcula usando la siguiente ecuación.

$$ICU = \frac{T_s - T_m}{SD} \quad Ec. (7)$$

Donde:

T_s: es el valor de LST de un píxel o del promedio de LST de un barrio urbano

T_m: es la temperatura superficial media de toda el área de estudio

SD: es la desviación estándar de la temperatura superficial de toda el área de estudio

Posteriormente, los valores resultantes de ICU resultantes, se reclasificarán según los umbrales definidos para categorizar la intensidad de la ICU.

Tabla 1. Clasificación de la intensidad de las Islas de calor (ICU)

Rango de ICU	Clase de ICU
<0	Isla Verde
0-1	ICU Débil
1-2	ICU Medio
2-4	ICU Fuerte

Fuente: Xu et al, (2013).

Relación espacial entre las ICU con áreas de construcción y verdes

La relación espacial entre las Islas de Calor Urbano, las zonas construidas y áreas verdes se analizó a través de una revisión bibliográfica y análisis cualitativo de literatura científica. Para ello, se consultaron artículos y documentos técnicos provenientes de bases de datos académicas como SciELO, ScienceDirect, seleccionando estudios desarrollados entre 2014 y 2024 en regiones andinas o con características ambientales similares al área de estudio. La revisión priorizó investigaciones que contengan información geoespacial y metodologías de teledetección similares al presente estudio, con el propósito de

identificar patrones y dinámicas entre la cobertura vegetal, los espacios urbanizados y la formación de Islas de Calor Urbano.

Materiales y Equipos

En la Tabla 4 se muestra los materiales y equipos necesarios para la fase en campo y de escritorio.

Tabla 2. Materiales empleados en el caso de estudio

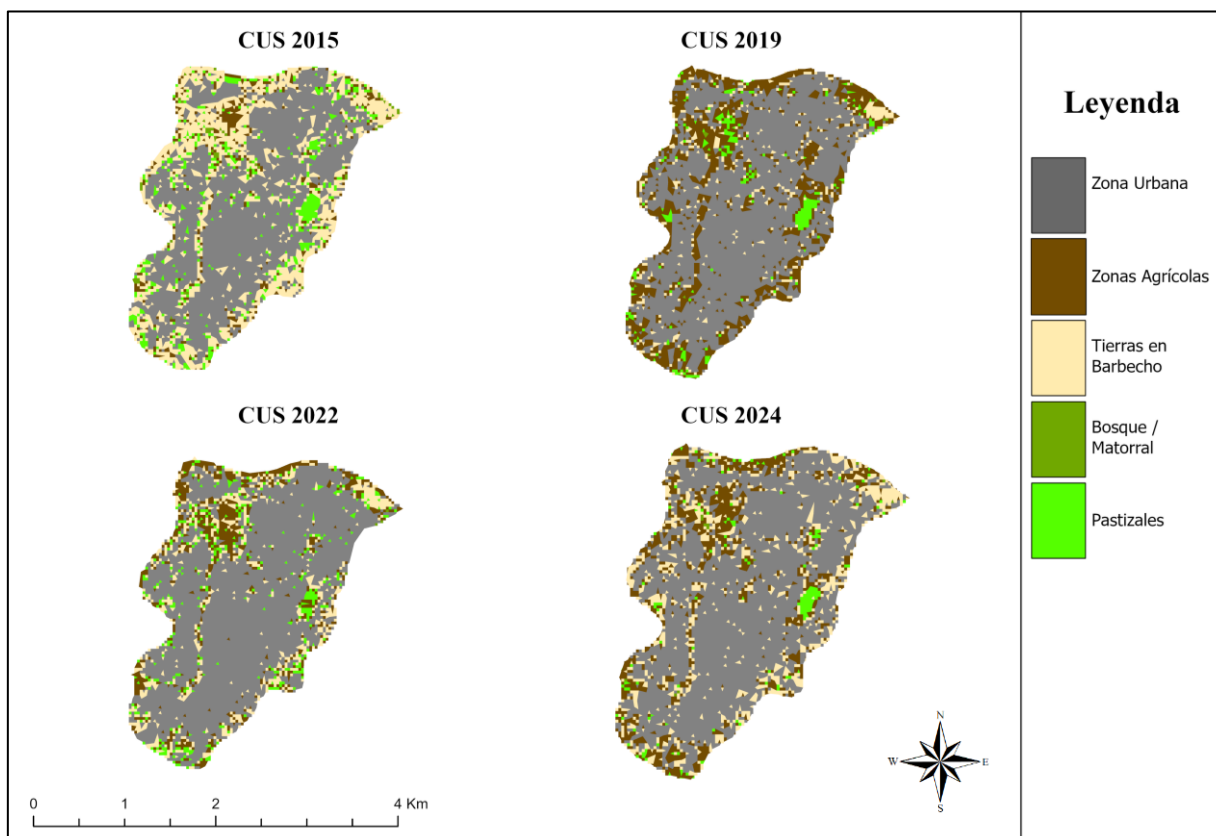
Material/Equipo	Actividad
Computadora	<ul style="list-style-type: none">• Obtención de imágenes satelitales• Procesamiento y análisis de resultados• Preparación de elementos cartográficos

Resultados

Índices de Teledetección y Clasificación Supervisada de Imágenes

Áreas de Uso y Cobertura del Suelo

La clasificación supervisada realizada a partir de imágenes satelitales Landsat 8 para los años 2015, 2019, 2022 y 2024 se obtuvo una validación aceptable en cuanto al índice Kappa con valores de 0.87, 0.94, 0.81 y 0.80 (Anexo 1) respectivamente, además permitió identificar los principales cambios en el uso y cobertura del suelo en la zona urbana de Otavalo. La Figura 2 indica la expansión continua de la zona urbana, así como la conversión de áreas de bosque natural. Las zonas de tierras en barbecho muestran una disminución a lo largo de los años, lo cual evidencia que estos terrenos han sido gradualmente incorporados a actividades productivas. Su reducción coincide con el incremento de zonas agrícolas, lo que indica que las áreas antes destinadas al descanso del suelo han sido aprovechadas como tierra cultivable en la actualidad.

Figura 2. Cobertura y Uso del Suelo

La evaluación multitemporal de la cobertura terrestre en Otavalo evidencia una transformación del paisaje impulsada por la expansión de la infraestructura gris y la intensidad agrícola. Al comparar los datos de 2015 y 2024, se destaca la expansión de la zona urbana, pasó de ocupar 337,92 hectáreas en 2015 a 419,73 hectáreas en 2024, lo que representa un incremento del 14,81%, este dato confirma una presión antropogénica constante sobre el territorio.

En cuanto a la dinámica estacional entre Barbecho y Agrícola se observa una fluctuación inversa mientras que las tierras en barbecho disminuyeron drásticamente en un 77,3% (de 169,17 ha a 38,37 ha), las tierras agropecuarias aumentaron un 3011% (de 36,03 ha a 113,26 ha). Esta variación no implica un cambio de uso de suelo permanente, sino que responde a la fenología y estacionalidad de los cultivos al momento de la captura de la imagen satelital. Y por último el área de Bosques que es fundamental para la regulación climática sufrió una reducción del 85,6%, pasando de 4,63 ha en 2015 a 0,63 ha en 2024.

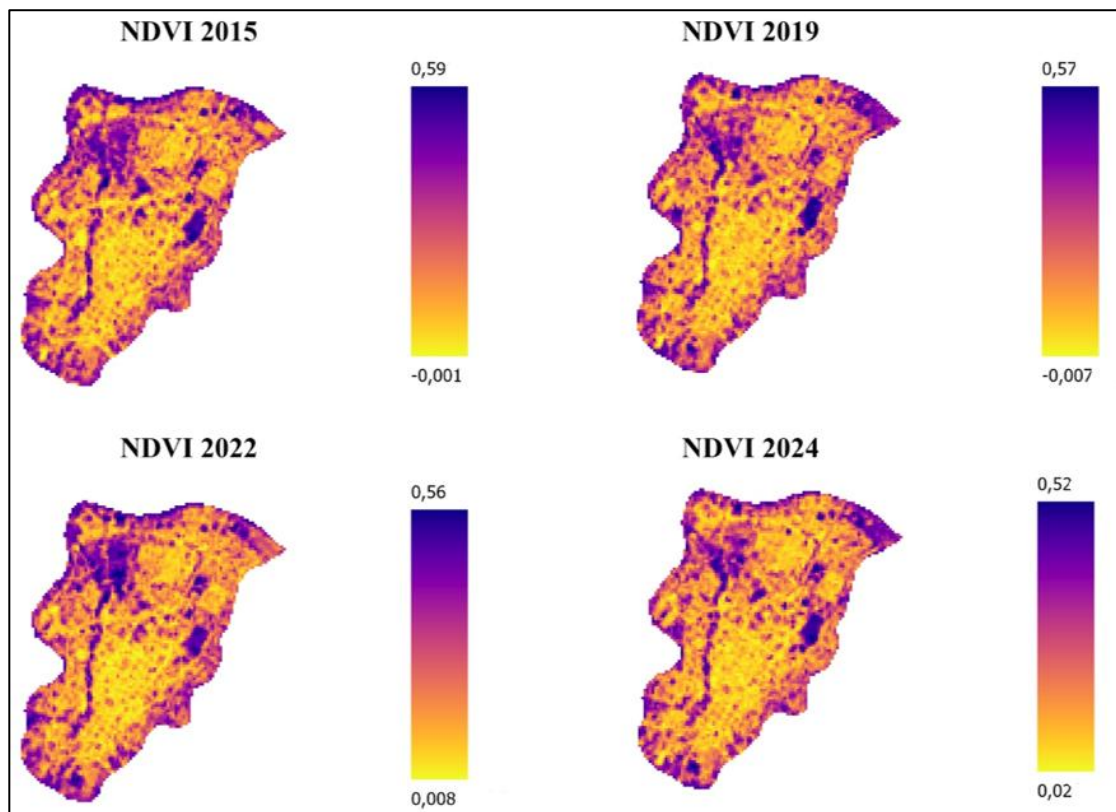
La pérdida de biomasa arbórea es el indicador más preocupante en términos de servicios ecosistémicos.

Tabla 3. Áreas de Uso y Cobertura del Suelo de la ciudad de Otavalo

Categoría de Uso	2015 (ha)	2019 (ha)	2022 (ha)	2024 (ha)
Zona Urbana	337,92	385,02	391,72	419,73
Bosques	4,63	2,80	1,02	0,63
Tierras en Barbecho	169,17	105,50	82,46	38,37
Pastos	46,26	35,50	23,17	21,51
Tierra Agropecuaria	36,03	65,06	95,78	113,26
Total	594,01	593,88	594,15	593,50

Análisis del Índice de vegetación Normalizada (NDVI)

La Figura 3 muestra los cambios del NDVI del 2015 al 2024 en el cual se observa que para 2015 el valor máximo es de 0.59 representado con tonalidades verdes y amarillas, representando una cobertura vegetal saludable en gran parte de la ciudad de Otavalo de manera especial en la zona periférica. En el subperiodo de 2019 y 2022 (valores ligeramente máximos de 0.56 y 0.57) se evidencia un fenómeno de expansión centrifuga de las áreas con bajo NDVI. Estas áreas son características de superficies con suelo desnudo las cuales se extienden desde el centro de la ciudad hacia la periferia. En el año 2024 el valor se reduce a 0.52 esta disminución sugiere una pérdida progresiva de la calidad y la extensión de los espacios verdes en la ciudad y alrededor de la mancha urbana de Otavalo.

Figura 1. Índice de vegetación Normalizada (NDVI) para la ciudad de Otavalo

La tendencia observada es un reflejo de la densificación y el crecimiento no planificado del área urbana (Jiménez-Torres, 2024). A medida que el suelo permeable y los espacios verdes son reemplazados por concreto, asfalto y edificaciones, se altera el balance energético de la superficie. Esta alteración, manifestada en los mapas como una reducción del NDVI, es una de las causas directas de que las temperaturas en el centro de la ciudad sean más altas que en sus alrededores con vegetación, exacerbando los impactos negativos de las olas de calor sobre la salud y el consumo energético (Soberón Forsberg & Obregón Párraga, 2016). La planificación urbana para Otavalo, por lo tanto, debería centrarse en aumentar la Infraestructura Verde (parques, techos verdes, arbolado urbano) como una estrategia efectiva de mitigación para revertir la tendencia de pérdida de NDVI y, consecuentemente, reducir la intensidad de la ICS.

Análisis de la Radiancia Espectral (TOA)

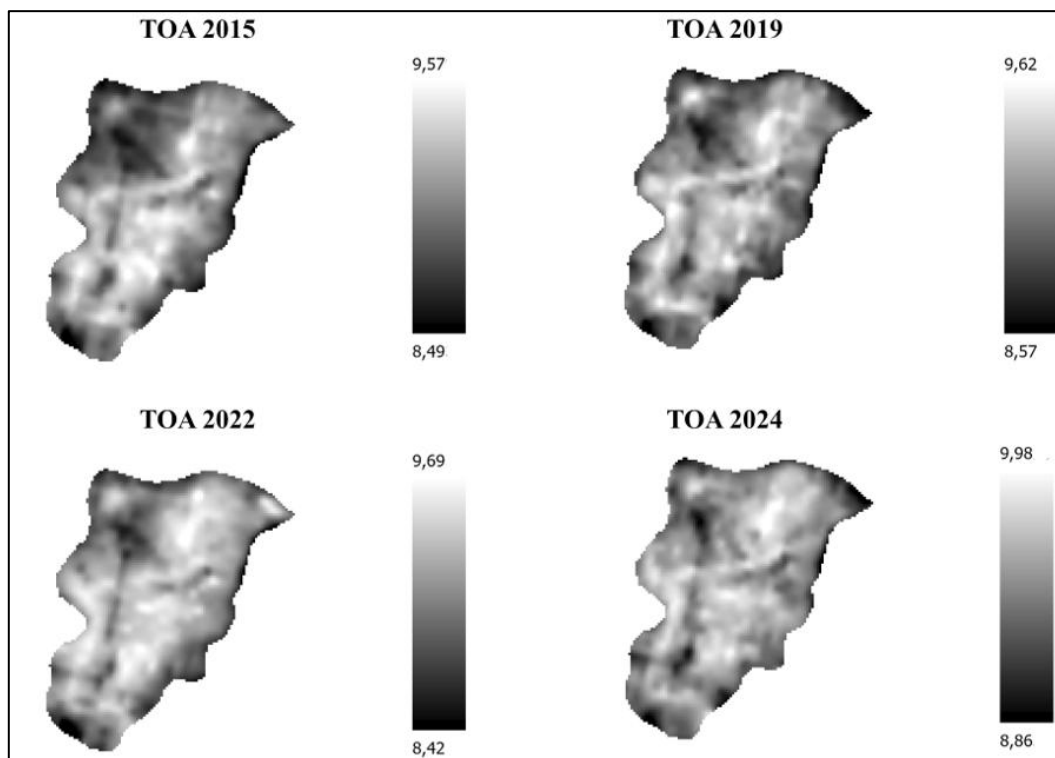
Los mapas de Radiancia Espectral en la parte superior de la atmósfera (TOA) evidencian un patrón espacial en el que las zonas centrales de Otavalo muestran mayores niveles de radiancia (tonos grises claros), mientras que las periferias presentan valores más bajos (tonos grises oscuros). A lo largo del periodo analizado, se observa un incremento en el

valor máximo de radiancia, alcanzando 9.98 en 2024, superior a los valores registrados en años anteriores (9.57 en 2015, 9.62 en 2019 y 9.69 en 2022).

La radiancia térmica registrada en esta banda es un indicador directo de la energía emitida por la superficie terrestre y sirve como base para estimar la temperatura superficial. Las elevadas radiancias en el centro urbano se asocian con los materiales utilizados en la infraestructura urbana como asfalto, concreto y techo que poseen alta capacidad de absorción solar y elevada inercia térmica (Voogt & Oke, 2003).

El notable aumento en la radiancia máxima en 2024 sugiere una intensificación del calentamiento superficial, posiblemente relacionada con la expansión de superficies impermeables, mayor densificación urbana o cambios en los materiales constructivos que favorecen la retención y emisión de calor. Las diferencias interanuales, aunque en algunos casos sutiles, reflejan la evolución térmica de la ciudad influenciada tanto por el uso del suelo como por las condiciones meteorológicas al momento de la adquisición de las imágenes.

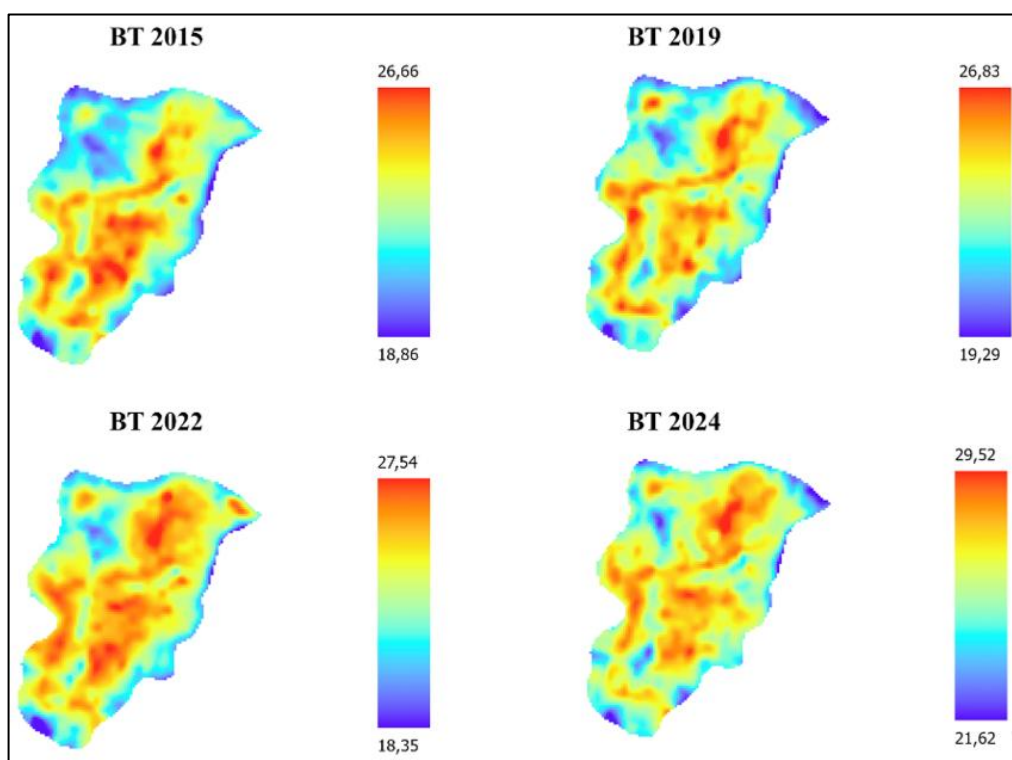
Figura 2. Radiancia Espectral (TOA) para la ciudad de Otavalo



En 2015 se observan temperaturas que varían entre aproximadamente 18.8 °C y 26.6 °C, con zonas cálidas concentradas en áreas con poca vegetación. Para 2019 se aprecia un

incremento en las temperaturas máximas, alcanzando valores alrededor del 26.83 °C. Este aumento coincide con la reducción de tierras en barbecho y pastizales, sugiriendo una mayor superficie agrícola. El año 2022 presenta una temperatura, de aproximadamente 27.5 °C, reflejando una intensificación clara del calentamiento superficial. Sin embargo, en el 2024, la Temperatura de Brillo aumenta significativamente con +2°C (29.5 °C), en zonas cálidas dentro de la mancha urbana. Esto podría estar relacionado con condiciones climáticas particulares del año, incrementos en la radiancia superficial o por la mayor presencia de suelos desnudos, fenómenos que han demostrado influir en el comportamiento térmico registrado por las bandas térmicas de Landsat (Ferreira et al., 2003) (Figura 5).

Figura 3. Temperatura de Brillo (BT) para la ciudad de Otavalo

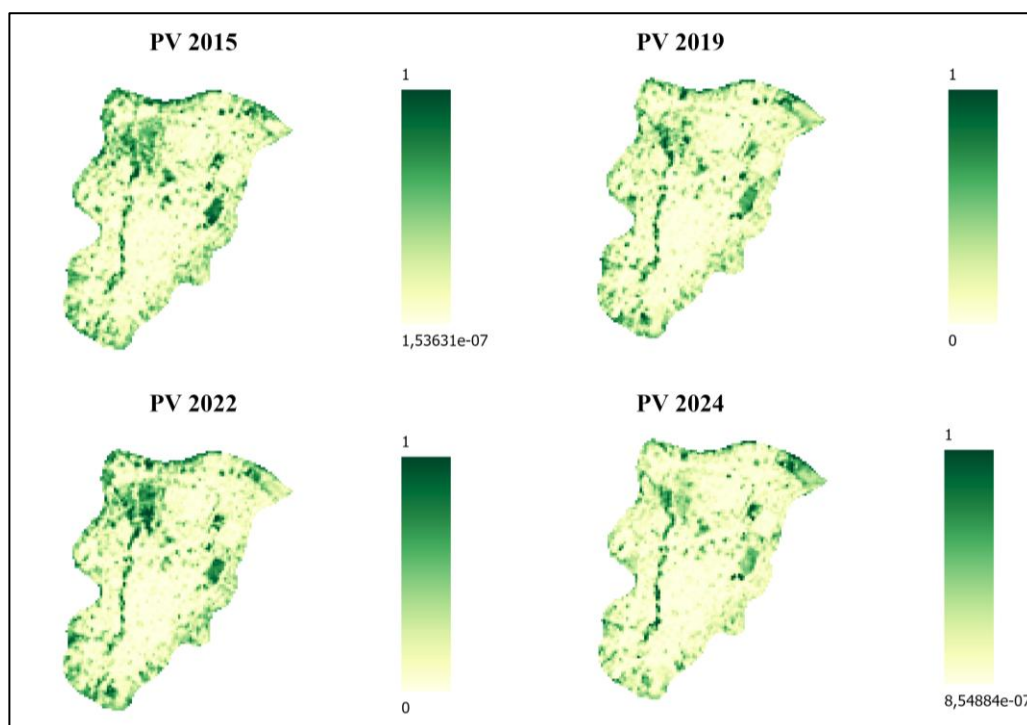


En conjunto la Figura 5, muestra el comportamiento multitemporal de la Temperatura de Brillo el cual tiene una estrecha relación entre el calentamiento superficial y la distribución de coberturas vegetales, tal como lo establecen investigaciones previas en contextos urbanos (Qihao, 2009) Áreas con poca cobertura vegetal, mayor radiancia superficial o actividad agrícola reciente tienden a registrar temperaturas más elevadas, lo que coincide con los patrones observados en el territorio de estudio especialmente en los terrenos con barbechos.

Análisis de la Proporción de Vegetación (Pv)

En la Figura 6 se aprecia que la distribución espacial de la vegetación que mantiene un patrón constante, aunque con diferencias en amplitud e intensidad. En 2015 se identificó un Pv promedio de 0.47, indicando una cobertura vegetal moderada, concentrada principalmente en la zona norte del área de estudio. Para 2019 el Pv promedio disminuyó a 0.42, lo que representa una reducción del 10.6% respecto a 2015. Esta disminución se relaciona con un ligero incremento de suelos desnudos. El año 2022 presentó el valor más alto de todo el periodo, con un Pv promedio de 0.58, equivalente a un incremento del 38% respecto a 2019. Finalmente, el Pv promedio en 2024 disminuyó nuevamente a 0.44, mostrando un descenso del 24.1% respecto a 2022. Esta reducción puede asociarse tanto a cambios en el suelo.

Figura 4. Proporción de Vegetación (PV) para la ciudad de Otavalo



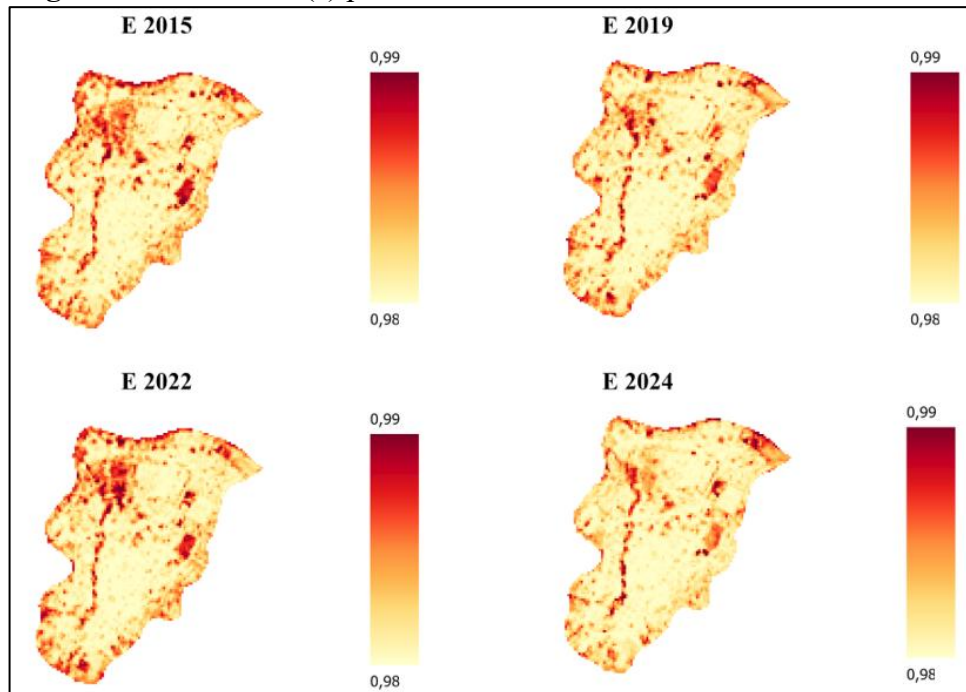
Los resultados muestran fluctuaciones interanuales marcadas de la Proporción de Vegetación, lo que evidencia la sensibilidad del paisaje urbano de la ciudad de Otavalo a las variaciones climáticas y a los cambios en el uso del suelo. La disminución de Pv entre 2015 y 2019 coincide con tendencias globales donde la urbanización reduce la vegetación disponible (Álvarez-Berrios & Mitchell Aide, 2015). Los incrementos de Pv se explican por condiciones climáticas más húmedas, lo que también ha sido reportado por Villarreal

et al. (2021) al analizar la respuesta de la vegetación andina frente a anomalías climáticas. Finalmente, el cambio observado en 2024 concuerda con estudios que demuestran que la vegetación urbana es altamente sensible a estrés hídrico y a la intensificación del uso del suelo (Sun & Chen, 2020). Los valores relativamente bajos de P_v en este año refuerzan la necesidad de incrementar infraestructura verde para mejorar la resiliencia ecológica frente a eventos climáticos extremos.

Análisis de Emisividad (ϵ)

La emisividad superficial (ϵ) es un parámetro clave para estimar la temperatura de superficie terrestre, ya que expresa la capacidad de un material para emitir energía térmica. En general, la vegetación presenta valores altos de emisividad, mientras que los suelos desnudos y las áreas urbanas muestran valores ligeramente menores debido a sus propiedades físicas (Valor & Casalles, 1996). Dado que la emisividad depende en gran medida de la fracción de vegetación, su comportamiento suele relacionarse directamente con la Proporción de Vegetación (P_v).

La Figura 7 muestran valores altos y relativamente estables de emisividad, dentro del rango 0.98 – 0.99, lo cual es característico de superficies con cobertura vegetal y humedad moderada. Aunque se identifican pequeñas áreas con valores ligeramente menores, estas coinciden con zonas donde también se observó en presencia de suelos expuestos. Esta tendencia ha sido demostrada donde señalan que variaciones en la vegetación y en el uso del suelo generan cambios sutiles pero significativos en la emisividad (Snyder et al., 2010).

Figura 5. Emisividad (ϵ) para la ciudad de Otavalo

La emisividad se mantiene en un patrón estable a lo largo del periodo, reflejando que gran parte del territorio conserva propiedades térmicas propias de superficies vegetadas. No obstante, los parches de emisividad más baja señalan zonas potencialmente vulnerables al calentamiento superficial y relevantes para comprender la formación de Islas de Calor Urbano.

Análisis de la Temperatura Superficial Terrestre (LST)

La LST corresponde a la radiancia de la superficie terrestre y no a la temperatura ambiente registrada por estaciones meteorológicas. Las imágenes analizadas corresponden al mes de agosto, caracterizado por condiciones secas y baja humedad según el Boletín Nacional Precipitación y Temperatura para todos los años de estudio, esto favorece a un mayor calentamiento superficial y permite resaltar con mayor claridad las diferencias térmicas entre áreas urbanizadas y zonas con cobertura.

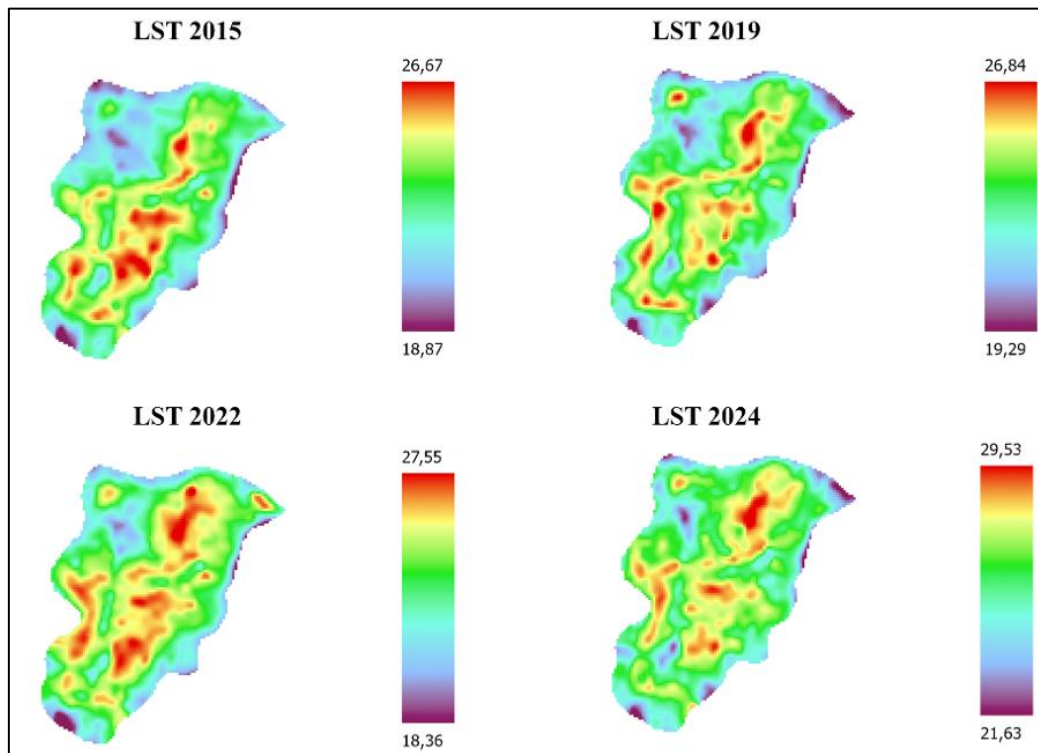
El análisis de la Temperatura Superficial Terrestre (Figura 8) identifico mayores variaciones térmicas en la ciudad de Otavalo en los años de estudio 2015, 2019, 2022 y 2024. En el año 2015, la LST registró valores entre 18.87 °C y 26.67 °C, reflejando condiciones térmicas moderadas y una distribución relativamente equilibrada de temperaturas sobre el territorio. Las temperaturas más altas, se localizan en sectores

urbanizados con menor presencia vegetal y mayor cantidad de superficies impermeables (Li et al., 2018).

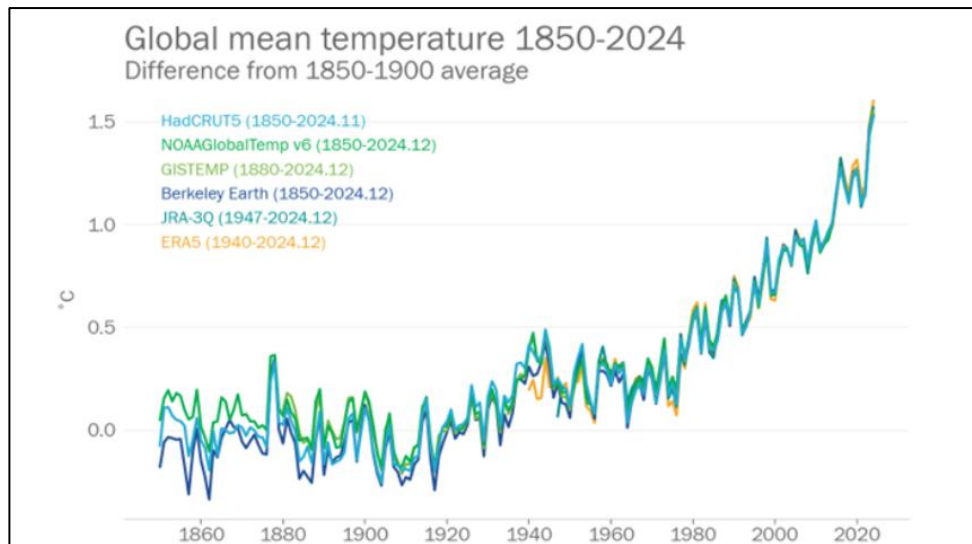
En 2019 se observó un ligero cambio térmico, con valores que varían entre 19.29 °C y 26.84 °C. Este aumento, leve, se reflejó en la expansión de zonas cálidas identificadas en tonos amarillos y rojos, particularmente hacia el centro y suroeste del área de estudio. Dichas zonas generalmente se asocian con actividades antrópicas ocasionando el cambio de la cobertura vegetal. En 2022 se registró una mínima de 18.36 °C, y máxima de 27.55 °C, superando los valores observados en años anteriores. El mapa térmico evidenció un fuerte contraste entre áreas frías asociadas a vegetación densa y zonas calientes vinculadas a superficies urbanas y suelos expuestos. Finalmente, el año 2024 presentó un incremento térmico con las temperaturas más elevadas de todo el periodo de estudio. La LST mínima ascendió a 21.63 °C, mientras que la máxima alcanzó 29.53 °C, lo que constituye un incremento de 1.98 °C respecto a 2022 y de 2.86 °C respecto a 2015.

La tendencia térmica observada entre 2015 y 2024 refleja un proceso de calentamiento progresivo del territorio, influenciado tanto por las condiciones climáticas regionales y la expansión urbana como resultado de la disminución de la cobertura vegetal. El incremento relevante identificado en 2024 puede estar relacionado con las anomalías climáticas del evento El Niño 2023–2024, uno de los más cálidos registrados en la región andina, el cual ha sido señalado como un factor clave en la intensificación de temperaturas superficiales urbanas (Morales et al., 2022).

Los valores elevados de Temperatura Superficial Terrestre (LST) obtenidos para la ciudad de Otavalo son coherentes con resultados reportados en otras ciudades andinas del Ecuador, como Quito y Cuenca, donde se han identificado temperaturas superficiales superiores a 35 °C en sectores urbanos (Salazar & Baño, 2017; Álvarez, 2020). Estas magnitudes responden a que la LST representa el calentamiento de superficies como asfalto y concreto, y no la temperatura del aire (Weng, 2009). Los valores registrados en Otavalo reflejan procesos de urbanización y reducción de cobertura vegetal, más que condiciones climáticas extremas, y son consistentes con la dinámica térmica observada en ciudades de la Sierra ecuatoriana.

Figura 6. Temperatura Superficial Terrestre (LST) para la ciudad de Otavalo

Esto coincide con la publicación de la OMM confirma que 2024 fue el año más cálido registrado, con aproximadamente 1,55 °C por encima del nivel preindustrial, los últimos diez años, 2015-2024, son los diez años más cálidos registrados, es probable que hayamos visto el primer año calendario con una temperatura media global de más de 1,5 °C por encima del promedio de 1850-1900. La OMM utilizan seis conjuntos de datos internacionales para llegar a la cifra global consolidada como el NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, EE. UU.), NASA GISS (Instituto Goddard para Estudios Espaciales, EE. UU.), HadCRUT (Met Office Hadley Centre y la Universidad de East Anglia, Reino Unido), Berkeley Earth (centro de investigación independiente), análisis del ECMWF / Copernicus Climate Change Service (Europa) y Reanálisis de la JMA (Agencia Meteorológica de Japón).

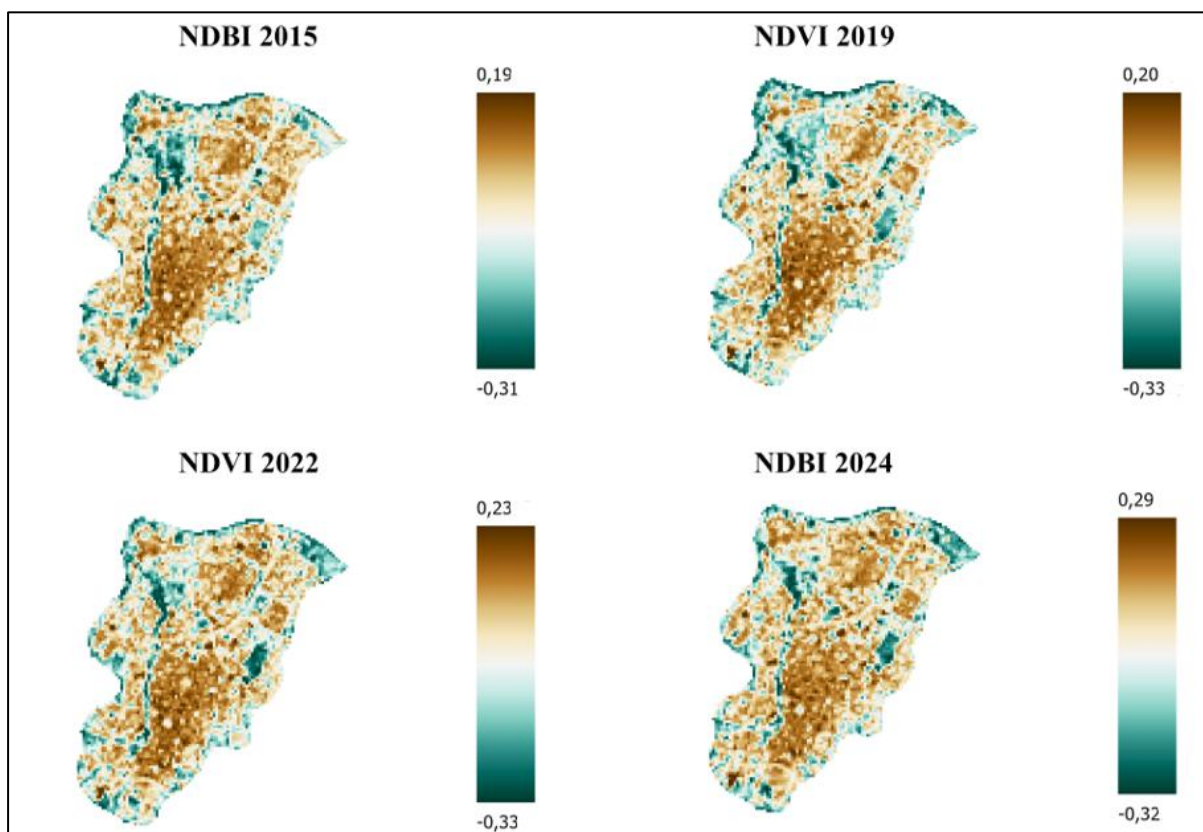
Figura 7. Temperatura media global

Fuente: OMM

Análisis del Índice de diferencia Normalizada de Construcciones (NDBI)

El Índice de Diferencia Normalizada de Construcciones (NDBI) permite identificar superficies urbanizadas mediante valores negativos indican vegetación o humedad y valores positivos que corresponden a edificios, pavimentos y suelos expuestos (Villamil et al., 2022) En los años analizados (2015, 2019, 2022 y 2024) (Figura 9), se observa que el territorio mantiene una predominancia de valores positivos en su zona central, lo que evidencia la presencia constante de superficies construidas. En 2024 los valores aumentan notablemente, sugiriendo mayor exposición del suelo o densidad urbana, lo cual coincide con los incrementos térmicos detectados en la LST para ese mismo año. El índice NDBI confirma que el crecimiento urbano y la reducción de vegetación son factores determinantes en la generación y expansión de islas de calor.

Figura 10. Índice de diferencia Normalizada de Construcciones (NDBI) para la ciudad de Otavalo



Influencia de la presencia de áreas verdes y zonas de construcción urbanas en la consolidación de las islas de calor.

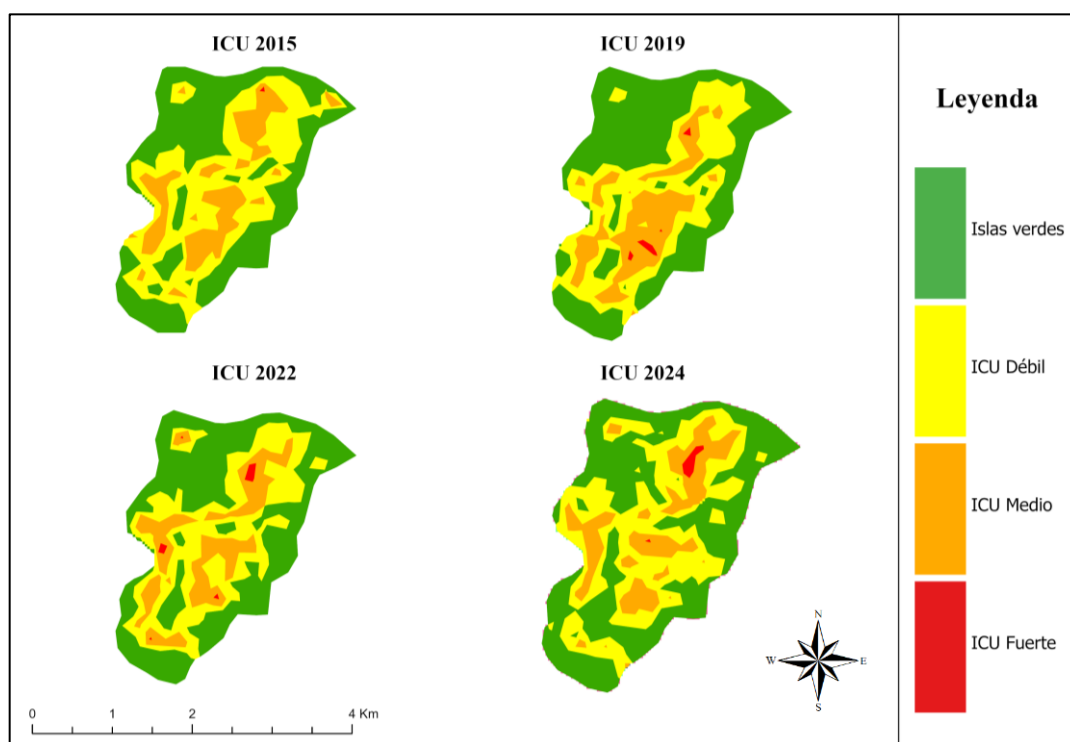
Análisis de la Isla de Calor Urbana (ICU).

La distribución espacial de la Isla de Calor Urbana (ICU) en la ciudad de Otavalo en el periodo de estudio 2015 al 2024 registra cambios relacionados a la presencia o ausencia de áreas verdes. En 2015 (Figura 10), las ICU se encontraban relativamente desarrolladas, con zonas clasificadas como ICU débil y ICU media, en el centro de la ciudad. La presencia de grandes extensiones catalogadas como islas verdes (color verde) sugiere una mayor capacidad de regulación térmica, la cual actuó como amortiguador frente a la acumulación de calor. En 2019 se evidenció una intensificación de las ICU, con una expansión de áreas clasificadas como ICU media y el surgimiento de nuevos núcleos de ICU fuerte.

En 2022, las ICU no mostraron una reducción. Si bien las zonas clasificadas como islas verdes aumentaron en el sector norte, persistieron amplias áreas de ICU débil y ICU

media, además de varios núcleos de ICU fuerte en el centro del territorio. Esto refleja un patrón térmico mixto donde la vegetación contribuyó a disminuir las temperaturas mínimas de la LST, pero la presencia de áreas construidas densas continuó favoreciendo la formación de puntos calientes. Esta situación coincide con lo reportado por Shukla et al. (2017), quienes señalan que la heterogeneidad espacial del uso del suelo produce contrastes térmicos marcados, especialmente cuando la expansión urbana coexiste con parches de vegetación recuperada.

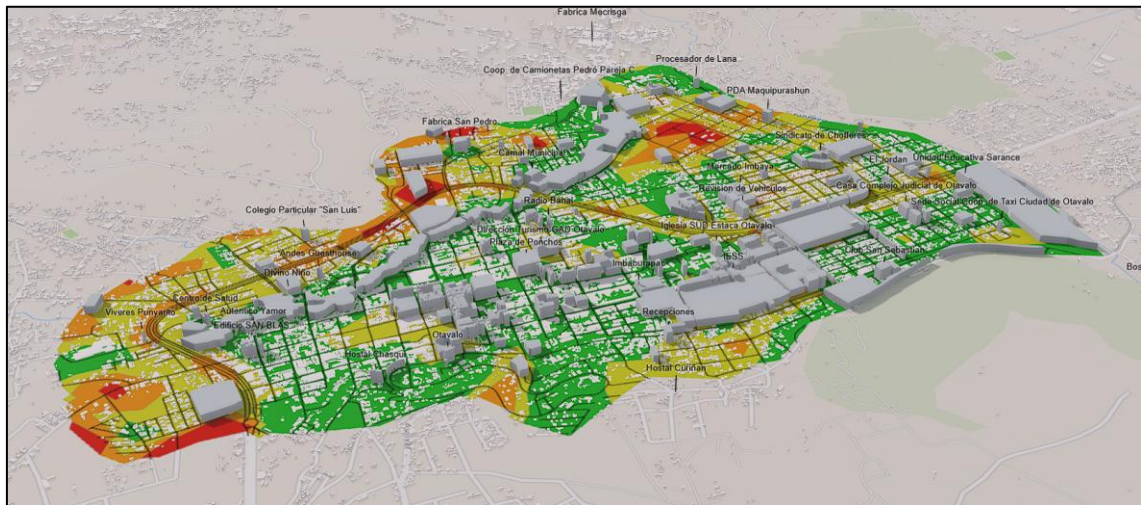
Figura 11. Isla de Calor Urbana (ICU) para la ciudad de Otavalo



El año 2024 (Figura 11) presentó el escenario más crítico del periodo de estudio, con una intensificación de las ICU. Las zonas clasificadas como ICU fuerte se consolidaron y expandieron en el sector central y norte, mientras que las áreas de ICU media se distribuyeron de manera continua a lo largo del territorio. En contraste, las islas verdes experimentaron una reducción significativa, coherente con los valores más altos de NDBI y la menor cobertura vegetal detectada mediante NDVI y Pv. Este patrón se relaciona directamente con el incremento térmico registrado en la LST en 2024, el cual alcanzó los valores máximos de toda la serie y coincide con anomalías climáticas regionales asociadas al evento El Niño 2023–2024. Según Zhao y Chen (2021), la disminución pronunciada de vegetación incrementa la sensibilidad térmica del entorno

urbano y favorece la intensificación de islas de calor incluso en áreas de tamaño intermedio.

Figura 12. Mapa 3D de Islas de Calor de la ciudad de Otavalo



Los resultados demuestran que la formación y consolidación de las ICU responde a una interacción directa entre la presencia de vegetación y la expansión de superficies construidas. La reducción de áreas verdes y el aumento de materiales impermeables incrementan la capacidad del suelo para absorber y retener calor, elevando la temperatura superficial y favoreciendo la aparición de ICU fuertes. Este comportamiento, ampliamente documentado en estudios urbanos, evidencia que la vegetación desempeña un rol clave como regulador térmico, mientras que la urbanización descontrolada agrava el fenómeno de calor urbano (Sun & Chen, 2020). Por lo tanto, la tendencia observada entre 2015 y 2024 muestra claramente que las ICU se intensificaron en paralelo con la pérdida de vegetación y el aumento de infraestructuras, un proceso que incrementa la vulnerabilidad térmica del territorio.

A continuación, se presenta las principales zonas con mayor incidencia de Islas de Calor Urbano en la Ciudad de Otavalo con sus posibles cambios en la infraestructura:

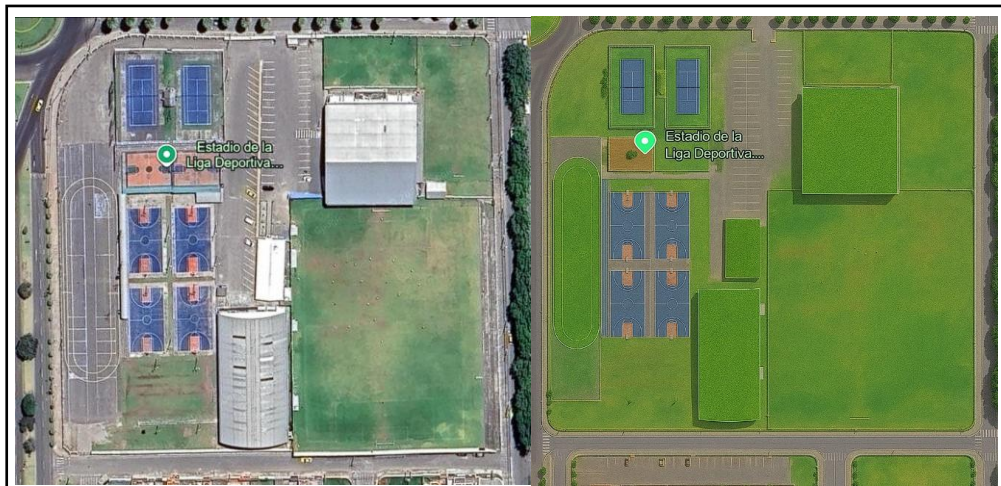
- Fábrica de San Pedro: Isla de Calor Urbano denominado como ICU Fuerte, se propone techos con vegetación verde y zonas de reforestación alrededor de la isla para expandir sus áreas verdes.

Figura 13. Fábrica de San Pedro

- Redondeles: Se evidencia dos Islas de Calor Urbano: 1) Redondel entrada de Otavalo y 2) Redondel salida de Otavalo, ambos denominados como ICU Fuerte, se propone zonas de reforestación alrededor de los redondeles.

Figura 14. Redondeles de la Ciudad de Otavalo

- Coliseo Francisco Páez: Isla de Calor Urbano denominado como ICU Medio. Se propone el reemplazo gradual de superficies asfaltadas por pavimentos ecológicos permeables en los bordes del coliseo, reduciendo el almacenamiento térmico del sustrato.

Figura 15. Coliseo Francisco Páez

- Las islas de calor urbanas débiles, representadas por las zonas de color amarillo, corresponden a áreas de transición entre sectores densamente urbanizados y espacios con mayor cobertura vegetal. La presencia de vegetación dispersa, suelos permeables y cuerpos de agua cercanos contribuye a una menor acumulación de calor superficial en comparación con las islas de calor medias y fuertes. No obstante, estas áreas mantienen temperaturas superiores a las zonas rurales circundantes, lo que evidencia una influencia urbana moderada y un potencial riesgo de intensificación térmica ante futuros procesos de expansión urbana o reducción de la cobertura vegetal.

Figura 16. Distribución espacial de la intensidad de las islas de calor débiles

- **Tejido Urbano:** En cuanto a las islas verdes en el centro urbano de Otavalo, estas se encuentran asociadas a la presencia de cobertura vegetal intraurbana, como quebradas, espacios abiertos con vegetación, parques y áreas verdes. Estas islas actúan como reguladores térmicos disminuyendo la temperatura superficial en comparación con áreas edificadas. Este patrón no es aleatorio, si no que sigue una distribución relacionada a la fragmentación y continuidad de la vegetación urbana. Los espacios verdes mitigan del efecto isla de calor (fuerte y medio) y en la generación de microclimas favorables para la ciudad de Otavalo.

Figura 17 Tejido urbano vegetal de la ciudad de Otavalo



Conclusiones

El análisis de Otavalo mediante teledetección confirmó una relación directa entre el uso del suelo y la generación de Islas de Calor Urbanas (ICU). Se demostró que la expansión urbana y la consolidación de superficies construidas son los principales focos de calor, intensificando los contrastes térmicos en la zona central de la ciudad. Además, de la pérdida de cobertura vegetal y la exposición de suelos, producto de los cambios en los patrones agrícolas, contribuyen significativamente al calentamiento superficial, se aprecia una clara intensificación del fenómeno, alcanzado su punto máximo en el año 2024 con una temperatura más alta ($> 29^{\circ}\text{C}$), lo que indica el aumento del 12 % con respecto al año base de 2015.

La vegetación se establece como el mecanismo de mitigación térmica más eficaz, actuando como un regulador esencial del microclima urbano. Esta evidencia subraya la necesidad crítica de integrar la protección de áreas verdes e infraestructura ecológica dentro de la planificación territorial de Otavalo. En última instancia, el estudio no solo identifica la distribución y causas de las Islas de Calor, sino que también proporciona una base sólida para desarrollar estrategias sostenibles enfocadas en reducir la vulnerabilidad térmica y mejorar la calidad ambiental de la ciudad a largo plazo.

Referencias

- Actualización Del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Del Cantón Otavalo - Provincia de Imbabura (2020). <https://www.imbabura.gob.ec/phocadownloadpap/K-Planes-programas/PDOT/Cantonal/PDOT%20OTAVALO.pdf>
- Aguilar, L., & Cabrera, S. (2022). *Islas de calor urbano y su relación con la cobertura de suelo en la ciudad de Ilo, 2022* [Universidad Continental]. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/14715/3/IV_FIN_107_TE_Aguilar_Cabrera_2024.pdf
- Almeida, C. R. de, Teodoro, A. C., & Gonçalves, A. (2021). Study of the Urban Heat Island (UHI) Using Remote Sensing Data/Techniques: A Systematic Review. *Environments*, 8(10), 105. <https://doi.org/10.3390/environments8100105>
- Álvarez-Berrios, N. L., & Mitchell Aide, T. (2015). Global demand for gold is another threat for tropical forests. *Environmental Research Letters*, 10(1), 014006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/1/014006>
- Álvarez Pucha, H. D. (2020). Caracterización de la isla de calor urbana superficial en la ciudad de Cuenca mediante imágenes satelitales (Trabajo de titulación, Universidad de Cuenca). Repositorio Institucional Universidad de Cuenca. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/34420>
- Arai, K. (2020). Maximum Likelihood Classification based on Classified Result of Boundary Mixed Pixels for High Spatial Resolution of Satellite Images. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11, 24–30. https://thesai.org/Downloads/Volume11No9/Paper_4-Maximum_Likelihood_Classification_based_on_Classified_Result.pdf
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>

- Atugonza, S., Revocatus, M., & Juma, R. (2018). Multi-Temporal NDVI and Surface Temperature Analysis for Urban Heat Island Inbuilt Surrounding of Sub-Humid Region: A Case Study of Two Geographical Regions. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 10, 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.03.007>
- Baño, D., Salazar, J., & Delgado, M. I. (2018). *Remote Sensing in the Design of Urban Planning Strategies, Case Study Urban Heat Island of the Metropolitan District of Quito, Ecuador*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:134593487>
- Baños, D., Salazar, J., & Delgado, M. (2018). Percepción Remota en el Diseño de Estrategias de planificación Urbana, Caso de Estudio Isla De Calor Urbano del Distrito Metropolitano de Quito. *LATIN AMERICAN JOURNAL OF COMPUTING*, 5, 1390–9266. <https://lajc.epn.edu.ec/index.php/LAJC/article/view/143/103>
- Barrera, I., Caudillo, C., Medina, S., Avila, F., & Montejano, J. (2022). La isla de calor urbano superficial y su manifestación en la estructura urbana de la Ciudad de México. *Revista de Ciencias Tecnológicas*, 5, 312–330. doi.org/10.37636/recit.v53312330
- Benavides, H., Correa, V., Pucha, D., & Pucha, F. (2024). Analysis of Land Use Change and Hydrogeological Parameters in the Andean Semiarid Region of Ecuador. *Water*, 16(892). <https://doi.org/10.3390/w16060892>
- Bowler, D., Buyng, L., Knight, T., & Pullin, A. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Chacon, D. (2024, March 15). *Proyecto cambio de cobertura vegetal por especies nativas en la Loma San Vicente de Otavalo*. 2021. <https://www.otavalo.gob.ec/web/proyecto-cambio-de-cobertura-vegetal-por-especies-nativas-en-la-loma-san-vicente-de-otavalo/>
- Chang, Q., Liu, X., Wu, J., & He, P. (2015). MSPA-Based Urban Green Infrastructure Planning and Management Approach for Urban Sustainability: Case Study of Longgang in China. *Journal of Urban Planning and Development*, 141(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000247](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000247)
- Código Orgánico de Organización Territorial, A. y D. (2010). *Registro Oficial Suplemento Número 303 del 2010*.

- Constitución de la República del Ecuador. (2008). *Título II. Derechos. Capítulo Primero: Principios de aplicación de los derechos: Vol. Issue 20.*
- Deilami, K., Kamruzzaman, Md., & Liu, Y. (2018). Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 67, 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.009>
- Dewitte, S., Clerbaux, N., & Cornelis, J. (2019). Decadal Changes of the Reflected Solar Radiation and the Earth Energy Imbalance. *Remote Sens.*, 11, 663. <https://doi.org/10.3390/rs11060663>
- Ferreira, L., Yoshioka, H., Huete, A., & Sano, E. (2003). Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: An analysis within the Large-Scale Biosphere–Atmosphere Experiment in Amazônia (LBA). *Remote Sensing of Environmen*, 87, 534–550. https://www.researchgate.net/publication/222413934_Seasonal_landscape_and_spectral_vegetation_index_dynamics_in_the_Brazilian_Cerrado_An_analysis_within_the_Large-Scale_Biosphere-Atmosphere_Experiment_in_Amazonia_LBA
- Foissard, X., Dubreuil, V., & Quenol, H. (2019). Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city: Rennes (France). *Urban Climate*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100490>
- Gallo, E., Quijal, M., Mendez, R., Tonne, C., Basagaña, X., Achebak, H., & Ballester, J. (2024). Heat-related mortality in Europe during 2023 and the role of adaptation in protecting health. *Nat Med* 30, 30. <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03186-1>
- Hibbard, K. A., Hoffman, F. M., Huntzinger, D., & West, T. O. (2017). *Ch. 10: Changes in Land Cover and Terrestrial Biogeochemistry. Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I.* <https://doi.org/10.7930/J0416V6X>
- Hidalgo, D. (2024). *Saberes ancestrales en el pueblo Kichwa Otavalo, Provincia de Imbabura, en el Cantón Otavalo* [Universidad Central del Ecuador]. <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/1e0a255d-f010-424b-9492-1942e6f0be4d/content>

- Imhoff, M., Zhang, P., Wolfe, R., & Bounoua, L. (2010). Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, 114(3), 504–513. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.008>
- Jiménez-Torres, M. (2024). Análisis espaciotemporal de islas de calor aplicado en la ciudad costera de San Francisco de Campeche, México. *Revista de la Universidad del Bío-Bío*, 27(49), 1-17. <https://doi.org/10.22320/07183607.2024.27.49.01>
- J. B. Campbell, & R. H. Wynne. (2011). *Introducción a la teledetección* (Guilford Press).
- Kotharkar, R., Ramesh, A., & Bagade, A. (2018). Urban Heat Island studies in South Asia: A critical review. *Urban Climate*, 24, 1011–1026. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.12.006>
- Ley N°. 2016-1196. (2016). *Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión de Suelo*.
- Li, K., & Yu, Z. (2008). Comparative and Combinative Study of Urban Heat island in Wuhan City with Remote Sensing and CFD Simulation. *Sensors*, 8(10), 6692–6703. <https://doi.org/10.3390/s8106692>
- Litardo, J., Palme, M., Borbor-Cordova, M., Caiza, R., Hidalgo-Leon, R., del Pilar Cornejo-Rodriguez, M., & Soriano, G. (2021). *Urban Heat Island Simulation and Monitoring in the Hot and Humid Climate Cities of Guayaquil and Durán, Ecuador* (pp. 143–168). https://doi.org/10.1007/978-981-33-4050-3_7
- Litardo, J., Palme, M., Borbor-Cordova, M., Caiza, R., Macias, J., Hidalgo-Leon, R., & Soriano, G. (2020). Urban Heat Island intensity and buildings' energy needs in Duran, Ecuador: Simulation studies and proposal of mitigation strategies. *Sustainable Cities and Society*, 62, 102387. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102387>
- Llacas, L., & Lara, N. (2023). Isla de calor urbana: teledetección en cubiertas de la parroquia San Francisco. *CienciAmérica*, 12(2), 75–89. <https://doi.org/10.33210/ca.v12i2.437>
- Lopez, R., Sanchez, J., Montoro, A., & Intrigliolo, D. (2020). Effect of using pruning waste as an organic mulching on a drip-irrigated vineyard evapotranspiration under a semi-arid climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108064> Get rights and content

- Lozada, V. (2020). *ANÁLISIS DE ISLAS DE CALOR URBANO Y SUS VARIABLES EN EL SUR DE QUITO MEDIANTE TÉCNICAS DE TERMOGRAFÍA DESDE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS* [UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18900/1/UPS%20-%20TTS037.pdf>
- Meili, N., Manoli, G., Burlando, P., Carmeliet, J., Chow, W., Coutts, A., Roth, M., Velasco, E., Vivoni, E., & Fatichi, S. (2021). Efectos de los árboles en el microclima urbano: Diferencias de temperatura diurnas, estacionales y climáticas explicadas separando los efectos de la radiación, la evapotranspiración y la rugosidad. *Silvicultura Urbana y Ecologización Urbana*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126970>
- Mendoza, G., & Moncayo, L. (2012). *ESTUDIO ICONOGRAFICO DE LA CULTURA OTAVALEÑA* [ESCUELA POLITECNICA DEL LITORAL]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/21464/2/Tesis%20Otavalo%20final.pdf>
- Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 197, 522–538. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.095>
- Oke, T. (1987). *Climas de capa límite*. Routledge.
- Oranizacion de las Naciones Unidas. (2025). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Wwww.Un.Org. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Palacios, C. (2013). *Caracterización del fenómeno “Isla Urbana de Calor” en la zona central de la ciudad de Guayaquil*.
- Palacios, E., Fernandez, M., & Vasquez, D. (2020). Variabilidad térmica urbana en ciudades andinas mediante teledetección. *Revista de Climatología*, 20, 45–59. <https://doi.org/10.14198/RevClimatol2020.20.03>
- Rahaman, S. N., Ahmed, S. M. M., Zeyad, M., & Zim, A. H. (2023). Effect of vegetation and land surface temperature on NO₂ concentration: A Google Earth Engine-based remote sensing approach. *Urban Climate*, 47, 101336. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101336>

- Ren, Z., Wang, C., Chang, X., Wang, G., Hong, X., Dong, Y., Guo, Y., & Ma, Z. (2032). Understanding the cooling capacity and its potential drivers in urban forests at the single tree and cluster scales. *Sustainable Cities and Society*, 93. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104531>
- Salazar, J., & Baño Saltos, D. P. (2017). Estudio de la isla de calor urbano del Distrito Metropolitano de Quito mediante técnicas de percepción remota (MGA B228e/2017). Universidad Internacional SEK. <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2144>
- Shi, H., Singh, A., Kant, S., Zhu, Z., & Waller, E. (2005). Integrating Habitat Status, Human Population Pressure, and Protection Status into Biodiversity Conservation Priority Setting. *Conservation Biology*, 19(4), 1273–1285. <http://www.jstor.org/stable/3591312>
- Shi, H., Xian, G., Auch, R., Gallo, K., & Zhou, Q. (2021). Urban Heat Island and Its Regional Impacts Using Remotely Sensed Thermal Data—A Review of Recent Developments and Methodology. *Land*, 10(8), 867. <https://doi.org/10.3390/land10080867>
- Shukla, A., Ojha, C. S. P., Mahajan, S. H., & Singh, A. (2017). Urban growth monitoring using NDBI, NDVI and their variation from LST: A case study of Jaipur city. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 20(1), 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.11.003>
- Snyder, W., Wan, Z., Zhang, Y., & Feng, Y. (2010). Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. *International Journal of Remote Sensing*, 19(14), 2753–2774. <https://doi.org/10.1080/014311698214497>
- Soberón Forsberg, V. S., & Obregón Párraga, E. (2016). Identificación de islas de calor en la ciudad de Lima Metropolitana utilizando imágenes del Satélite Landsat 5TM. *Anales Científicos*, 77(1), 34–44. <https://doi.org/10.21704/ac.v77i1.475>
- Sobrino, J., Li, Z., Tang, B., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., & Trigo, I. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131, 14–37. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>
- Strahler, A., Zhang, X., Friedl, M., & Schaaf, C. (2004). Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Biology*, 10(7), 1133–1145. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00784.x>

- Tyubee, B., Sewuese, P., & Yakubu, C. (2020). Assessment of perceived and observed occupants' thermal comfort in residential buildings in Agan, Makurdi, Northcentral Nigeria. *Urban Climate*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100633>
- Ulah, S., Farid, F., & Valiente, O. (2019). Assessment of land use/land cover change impact on land surface temperature and surface runoff. . *Sustainability*, 11(22), 6543. <https://doi.org/10.3390/su11226543>
- United States Geological Survey (USGS). (2022). *Landsat surface reflectance-derived data products*. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Valor, E., & Casalles, V. (1996). Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. *Remote Sensing of Environment*, 57(3), 167–184. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(96\)00039-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(96)00039-9)
- Villamil, J., Perea, M., & Santa, G. (2022). ANÁLISIS COMPARATIVO DE ASERTIVIDAD PARA TRES ÍNDICES DE ZONAS CONSTRUIDAS APLICADOS A CIUDADES COLOMBIANAS. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 22(2), 16–26. <https://doi.org/10.19053/1900771X.v22.n2.2022.15018>
- Villanueva, J., Ranfla, A., & Quintanilla, A. (2013). Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo. *Información Tecnológica*, 24, 15–24. <https://www.scielo.cl/pdf/infotec/v24n1/art03.pdf>
- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Weng, Qihao. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 335–344. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007>
- Wulder, M. A., Roy, D. P., Radeloff, V. C., Loveland, T. R., Anderson, M. C., Johnson, D. M., Healey, S., Zhu, Z., Scambos, T. A., Pahlevan, N., Hansen, M., Gorelick, N., Crawford, C. J., Masek, J. G., Hermosilla, T., White, J. C., Belward, A. S., Schaaf, C., Woodcock, C. E., ... Cook, B. D. (2022). Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113195>
- Xu et al (J Infect Dis 2013; 208:528–38). (2016). *Journal of Infectious Diseases*, 214(11), 1785–1785. <https://doi.org/10.1093/infdis/jiw404>

- Yang, L., Qian, F., Song, D.-X., & Zheng, K.-J. (2016). Research on Urban Heat-Island Effect. *Procedia Engineering*, 169, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.002>
- Zeppo, L. V., Coltri, P. P., Dubreuil, V., Torres, G. A. L., & de Costa Trindade Amorim, M. C. (2025). Exploring the urban heat island phenomenon in a tropical medium-sized city: insights for sustainable urban development. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(4), 445. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13890-1>
- Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583–594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>
- Zhou, D., Xiao, J., Bonafonim, S., Berger, C., Deilami, K., Zhou, Y., Froking, S., Yao, R., & Qiao, Z. (2019). Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. *Remote Sens*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/rs11010048>