PROYECTIVA
Transformando datos en acción climática

Guía Metodológica
Estudio de islas de calor en área urbana y urbana rural en Costa Rica, 2024

Diciembre 2024

Global Gateway

Euroclima está cofinanciado por:

cooperación alemana
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Agencia implementadora:

aecid
Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo

Instituciones ejecutoras:

MINISTERIO DE AMBIENTE Y ENERGÍA | GOBIERNO DE COSTA RICA
INSTITUTO METEOROLÓGICO NACICNAL

FundaciónUCR
Fundación de la Universidad de Costa Rica

Guía metodológica: Estudio de islas de calor en área urbana y urbana rural en Costa Rica, 2024

La formulación del presente documento fue liderada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), la Fundación de la Universidad de Costa Rica y la Acción Proyectiva, con el apoyo de diferentes entidades públicas y organizaciones del sector privado y de la sociedad civil, a quienes se les agradece profundamente por su colaboración.

Esta guía forma parte de la Acción Proyectiva: Fortalecimiento de capacidades para la utilización de información climática para robustecer los procesos de toma de decisiones, cuya finalidad es aportar a la ejecución de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) a partir de capacidades mejoradas de diferentes actores en el ámbito subnacional con el fin de robustecer la Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático.

Los fondos para la implementación de dicha Acción provienen de EUROCLIMA, programa de cooperación regional financiado por la Unión Europea que busca promover el desarrollo ambientalmente sostenible y resiliente al clima en América Latina.

El equipo profesional encargado de la elaboración de este documento fue coordinado por el Programa para la Promoción de la Gestión y el Ordenamiento Territorial de la Escuela de Ciencias Geográficas de la Universidad Nacional y fue integrado por:

- M.Sc. Omar Enrique Barrantes Sotela, líder del equipo: geógrafo especialista en métodos y modelos cuantitativos, desarrollo sostenible y conservación de recursos biológicos.
- Máster Luis Fernando Sandoval Murillo, geógrafo especialista en sistemas de información geográfica y teledetección.
- Máster Greyty Quesada Thompson, geógrafa, especialista en ordenamiento de territorio, planificación y diseño urbano.
- Máster Guillermo Calderón Ramírez, geógrafo especialista en planificación urbano regional y movilidad urbana.
- Bach. Jeaustin Chinchilla Guerrero, asistente de proyecto y apoyo en sistemas de información geográfica.
- Bach. Ania Campos Bermúdez, diseño gráfico.

Equipos encargados de guiar y revisar el documento:

Por AECID

- Dra. Christine Follana

Por IMN

- MSc. Nazareth Rojas
- Lic. Ana Rita Chacón

Por Acción Proyectiva

- Dr. Javier Saborío Bejarano
- MSc. Cristina de San Román Aguilar
- MSc. Mariana Soto Ugarte

Diagramador

- Lic. Christian Mc Koy Carrillo

Forma de citar el documento:

Programa para la Promoción de la Gestión y el Ordenamiento Territorial de la Escuela de Ciencias Geográficas de la Universidad Nacional -Proyectiva- Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). 2024. Guía metodológica para la integración del análisis del riesgo en los proyectos de infraestructura pública vial. 108 p.

Esta publicación ha sido elaborada con la asistencia de la Unión Europea. El contenido es responsabilidad exclusiva de sus autores y, en ningún caso, debe considerarse que refleja los puntos de vista de la Unión Europea.

Resumen ejecutivo

La guía metodológica para el estudio de la isla de calor urbana (ICU) ofrece un marco práctico y accesible para que autoridades locales, técnicos y planificadores territoriales puedan identificar y analizar este fenómeno, que se intensifica con el crecimiento urbano. Las ICU representan un reto significativo en áreas urbanas y semiurbanas, ya que afectan directamente la calidad de vida, la salud pública y el confort térmico de las poblaciones.

El objetivo principal de esta guía es proporcionar herramientas que faciliten la integración de datos geoespaciales en la planificación urbana y la gestión ambiental, al promover un desarrollo territorial sostenible y resiliente. La metodología propuesta puede ser aplicada por personas no especializadas, lo cual permite que municipalidades y otras instituciones estatales puedan replicar los estudios con recursos técnicos y operativos accesibles.

Este documento aborda el fenómeno de la ICU en ciudades clave como Alajuela y Esparza, y destaca la importancia de comprender los patrones de temperatura superficial que generan áreas de calor en zonas urbanizadas y con escasa cobertura vegetal. Se incluyen estrategias de mitigación y adaptación, como la implementación de techos reflectantes, el aumento de espacios verdes urbanos y el uso de materiales de construcción sostenibles que ayudan a reducir la temperatura de la ciudad.

Los principales beneficios que se obtienen con esta guía son: 1) La mejora en la planificación urbana al identificar áreas críticas afectadas por la ICU. 2) El empoderamiento de las autoridades locales para implementar medidas de mitigación y 3) La generación de datos fundamenten que políticas públicas y planes reguladores.

Finalmente, la guía promueve un enfoque interdisciplinario para garantizar que los estudios sean integrales y robustos. Al fomentar la adaptación al cambio climático y la reducción de las ICU, se fortalece la resiliencia de las ciudades y se mejora la calidad de vida de sus habitantes, contribuyendo a un futuro más sostenible.

Tabla de contenidos

Contenido de figuras 4
Contenido de tablas 6
1. Introducción 7
1.1 Contexto y antecedentes 7
1.2 Propósito de la guía técnica: identificación y medición de islas de calor urbanas 8
1.3 Importancia de la acción local 9
2. Sección 1: Información general 9
2.1. Marco conceptual 9
2.2 Diferencia entre isla de calor y ola de calor 12
3. Sección 2: Metodología 14
3.1 Propuesta metodológica 14
3.1.1 Procesos para determinar la ICU 15
3.1.1.1 La delimitación del área de estudio 15
3.1.1.2 Componente de variabilidad climática 17
3.1.1.3 Selección y procesamiento de imágenes satelitales 22
3.1.1.3.1 Análisis zonal 24
4. Método indirecto: Cruce de variables 26
4.1 Análisis de precisión y concordancia de la clasificación de las coberturas de la tierra 30
4.1.1 Matriz de concordancia 30
4.1.2 Índice de Kappa 31
5. Método indirecto: Análisis de transectos 31
6. Método directo: Estaciones fijas 33
7. Problemáticas y amenazas de las islas de calor urbano 38
8. Estrategias de mitigación y adaptación en la planificación urbana 39
9. Estrategias para el seguimiento, mantenimiento y monitoreo 42
10. Retos y desafíos 44
11. Glosario 45

Contenido de figuras

Figura 1. Gradiente adiabático secoonte adiabático seco 11
Figura 2. Esquema de la isla de calor urbana 12
Figura 3. Datos de la ola de calor 13
Figura 4. Densidad de población (hab/ha) en los distritos Espíritu Santo y Macacona. 16
Figura 5. Esparza: área de interés con los distritos Espíritu Santo, Macacona y San Juan Grande 17
Figura 6. Alajuela: localización de estaciones meteorológicas cercanas 18
Figura 7. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría, Alajuela. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal 19
Figura 8. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría. Comportamiento de la variación de la temperatura por año, durante el período 2004 al 2024. 20

Contenido de figuras

Figura 9. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría. Comportamiento de la variación de la temperatura según día del año, durante el período 2004 al 2024 **20**
Figura 10. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría. Comportamiento de la variación de la temperatura según hora del día, durante el período 2004 al 2024 **21**
Figura 11. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría. Comportamiento de la variación de la dirección y magnitud del viento por mes. Agrupados por categorías de magnitud de vientos en escala de Beaufort **21**
Figura 12. Alajuela: temperaturas de la superficie terrestre entre 2022-01-16 y 2023-02-20. Sensor TIRS del satélite Landsat **24**
Figura 13. Alajuela: análisis zonal de la TST [°C] por media de las celdas vecinas entre los meses de enero a mayo del periodo 2020 al 2024. En la sección marginal se grafican los perfiles de temperatura **25**
Figura 14. Esparza: Cobertura de la superficie de la tierra en el año 2024 **28**
Figura 15. Alajuela: Cobertura de la superficie de la tierra en el año 2024 **28**
Figura 16. Variación de temperatura habitual de la ICU **31**
Figura 17. Perfil térmico de Alajuela **32**
Figura 18. Perfil térmico de Esparza **32**
Figura 19. Alajuela: perfil térmico A **33**
Figura 20. Alajuela: perfil térmico B **33**
Figura 21. Recolector datos **34**
Figura 22. Esparza: ubicación de los dispositivos HOBO MX2301 para el registro de temperatura y humedad relativa **35**
Figura 23. Ciudad de Esparza: serie de tiempo de temperatura y humedad relativa. Datalogger núm. 6749 **36**
Figura 24. Ciudad de Esparza: serie de tiempo de temperatura y humedad relativa. Datalogger núm.6758 **36**
Figura 25. Ciudad de Esparza: distribución térmica durante el día (15 días de observación) **37**
Figura 26. Ciudad de Esparza: distribución térmica durante la noche (15 días de observación) **37**
Figura 27. Ventilación dentro y entre edificios **40**
Figura 28. Intervenciones integrales para disminuir el efecto de la ICU **41**
Figura 29. Illustarción de efectos y mitigación del efecto de la ICU **43**
Figura 30. Beneficios de la infraestructura verde **43**

Contenido de tablas

Tabla 1. Características básicas de las islas de calor superficial y atmosférica 14
Tabla 2. Esparza: coordenadas máximas del cuadrante de análisis 16
Tabla 3. Estaciones cercanas a la ciudad de Alajuela: estadísticas de las tendencias de temperaturas [°C] derivadas de las series de tiempo 19
Tabla 4. Listado de imágenes sensor Sentinel 2 23
Tabla 5. Listado de imágenes sensor Landsat 23
Tabla 6. Alajuela: resumen estadístico de la estimación de la temperatura de la superficie en las imágenes de satélite 24
Tabla 7. Clave de clasificación de cobertura de la tierra 26
Tabla 8. Esparza: superficies de la cobertura de la tierra en el 2024 29
Tabla 9. Alajuela: superficies de la cobertura de la tierra en el 2024 29
Tabla 10. Escala de valoración de Índice Kappa 30
Tabla 11. Alajuela: matriz de concordancia de la clasificación de la cobertura terrestre 30
Tabla 12. Temperaturas diurnas y nocturnas máximas promediadas por dispositivo de registro 36

1. Introducción

1.1 Contexto y antecedentes

En Costa Rica los estudios del clima urbano orientado al análisis de las islas de calor urbanas (ICU) son limitados. Algunos estudios previos incluyen el elaborado por Arce & Acevedo (2014), quienes analizaron las ICU de la ciudad de Heredia utilizando la técnica de transectos móviles. Este análisis se basó en la metodología empleada por Sarricolea et al. (2008), que estudió la ICU en la ciudad de Rancagua en Chile y posteriormente estudió la superficie del Área Metropolitana de Santiago de Chile, aplicando el análisis de imágenes de satélite Terra-MODIS mediante componentes principales (Espinoza & Martín-Vide, 2014).

A su vez, estos estudios hacen referencia a la investigación de Jauregui (1997) en Ciudad de México, un estudio relevante en América Latina que establece los métodos principales para comparar las diferencias térmicas entre diversos sitios en la ciudad. Además, destaca la observación de superficies con diversas propiedades térmicas y aprovecha la red de estaciones meteorológicas existentes para alcanzar su objetivo.

Uno de los estudios más recientes es el desarrollado por Corrales et al. (2019), que analiza las temperaturas superficiales máximas del cantón de Curridabat mediante el software Climate Engine y las imágenes Landsat 8. El estudio abarca 34 meses (2016-2018) y asocia los valores de temperatura con el índice normalizado de construcción y el índice normalizado de vegetación.

El estudio obtiene como principal resultado una alta correlación entre los sitios con mayor intensidad de la isla de calor y aquellas zonas que presentan alta densidad de construcción.

Por su parte, Barrantes-Sotela (2020) analiza el efecto del cambio de cobertura de la tierra y el incremento de la ICU en la ciudad de Heredia. Para ello, adapta el modelo de F. Wang et al. (2015a) al contexto tropical y lo relaciona con el índice de disturbio (Arnett et al., 2014), calculado a partir de una transformación de Tasseled Cap. El estudio abarca un período comprendido entre 1985 y 2019.

Sus principales resultados obtenidos son la asociación entre la forma del perfil térmico de la ICU y el proceso de expansión de las áreas urbanas. La intensidad de la ICU tiende aumentar significativamente cuando los eventos de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) ocurren en intensidades fuertes, tanto en su fase positiva como negativa.

Además, se observa que la mayor intensidad del fenómeno se presenta en la Gran Área Metropolitana (GAM) durante el intervalo de los días 80 y 120 del año, con un punto máximo cercano al día 100 (finales del mes de marzo e inicio del mes de abril). Esto se debe a las condiciones de cielo despejado, aumento de la temperatura, disminución de la humedad relativa y de la velocidad del viento.

Una investigación derivada de la anterior es la elaborada por Bermúdez Méndez y Sánchez Moreira (2022) en la ciudad de Liberia, la cual aplica las metodologías implementadas por Romero Aravena y Romero Aravena (2005) y Romero Dávila et al. (2011). Estos estudios emplean metodologías para medir las temperaturas de los materiales utilizando registradores móviles en los períodos horarios en los que ocurren las condiciones meteorológicas más estables, tanto en época seca como lluviosa.

Otras iniciativas recientes en Costa Rica son la propuesta del índice urbano de calor (IUC) por INISEFOR de la Universidad Nacional, para el proyecto International Cooperation to Restore and Connect Urban Environments in Latin America and Europe (INTERLACE). El índice se implementa en Earth Engine y consiste en normalizar la temperatura superficial en función de la media y desviación estándar observada durante el 2023 en la GAM.

De manera paralela a estas investigaciones, EUROCLIMA+, un programa de cooperación regional financiado por la Unión Europea, busca promover el desarrollo ambientalmente sostenible y resiliencia al cambio climático.

Para ello, el programa acompaña procesos orientados a apoyar la implementación de los compromisos del Acuerdo de París, especialmente las Contribuciones Determinadas Nacionalmente (NDC) en 18 países latinoamericanos, entre ellos Costa Rica, con especial atención a una de las seis líneas de actuación contempladas para género y grupos vulnerables.

En el año 2020 el gobierno de Costa Rica a través de sus tres puntos focales nacionales (PFN): Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto (Cancillería) y Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN), solicitó el inicio de un diálogo país con EUROCLIMA+.

Los PFN con base en la actualización de la NDC 2020 así como otros instrumentos de planificación climática (Plan Nacional de Descarbonización, Política Nacional de Adaptación, entre otros) priorizaron ámbitos de apoyo, los cuales se han estructurado como acciones. AECID apoya la Acción Priorizada 2: "Fortalecimiento de capacidades para la implementación de la Política Nacional de Adaptación de Costa Rica a nivel subnacional".

La Comunicación Nacional sobre la Adaptación, incorporada en la NDC de Costa Rica, destaca la necesidad de contar con información climática, así como capacidades institucionales y locales para impulsar procesos de planificación e implementar acciones de adaptación y de toma de decisiones vinculadas con el desarrollo. Esto requiere análisis exhaustivos de riesgos y vulnerabilidades asociadas al clima.

Esta guía técnica presenta experiencias locales de estudios sobre islas de calor urbanas, con el fin de generar y reforzar los datos climáticos necesarios para la toma de decisiones en las principales ciudades del país.

El conocimiento derivado de Acción Proyectiva será de gran ayuda para enfrentar los retos que presenta el cambio climático y la imperativa adaptación al calentamiento global desde lo local.

1.2 Propósito de la guía técnica: identificación y medición de islas de calor urbanas

El objetivo principal de esta guía técnica es servir como un recurso fundamental para la identificación y medición de las islas de calor urbanas (ICU) en Costa Rica. A través de las siguientes dimensiones la guía busca empoderar a los gobiernos locales, profesionales, técnicos, investigadores y comunidades en la lucha contra este fenómeno creciente y relevante en las ciudades:

- **Fundamentación teórica y conceptual:** La guía ofrece una explicación sobre las islas de calor urbano, sus causas e impacto en el ambiente urbano. Esta base teórica facilita la comprensión de la relevancia de la identificación y medición de la ICU en el contexto del cambio climático y la urbanización.
- **Metodología:** Se presenta una metodología para la identificación de las ICU, que incluye técnicas de recolección de información de estaciones meteorológicas. Asimismo, presenta un ejercicio realizado en campo con sensores térmicos. Estos métodos permitirán efectuar diagnósticos precisos sobre la distribución y localización de las ICU.
- **Procedimientos de medición:** La guía proporciona procedimientos para la medición de la temperatura urbana y la comparación de microclimas dentro de la ciudad. Incluye un método para establecer puntos de medición, frecuencias de toma de datos y recomendaciones sobre el equipo adecuado para garantizar la consistencia y precisión de los datos.
- **Análisis de datos y visualización:** Se propone métodos de análisis de los datos y técnicas de visualización que ayudarán a las personas responsables de la toma de decisiones a interpretar correctamente la información recolectada.

Es importante destacar que tanto el análisis como la visualización de los datos incluyen el uso de sistemas de información geográfica (SIG), ya que estos permiten mapear las áreas que presentan el efecto de isla de calor, lo que facilita la priorización de acciones y la formulación de políticas efectivas.

Finalmente, se fomenta la colaboración interdisciplinaria entre áreas como geografía, urbanismo, meteorología, salud pública y gestión ambiental, entre otras; además, reconoce que la identificación y medición de las islas de calor urbanas requieren un enfoque integral que reúna conocimientos variados y experiencias complementarias.

1.3 Importancia de la acción local

El incremento en la temperatura de nuestras ciudades representa uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo, que afecta la calidad de vida de las poblaciones y la salud de los ecosistemas. En este contexto, los gobiernos locales y entidades estatales desempeñan un papel crucial en la formulación e implementación de políticas que aborden estos problemas.

El efecto isla de calor explica la diferencia de temperatura entre la ciudad y el campo: las urbes suelen ser más cálidas porque tienen más materiales que absorben calor y lo disipan lentamente, como el asfalto.

Por lo tanto, es crucial que los estudios relacionados con los incrementos de la temperatura, así como las soluciones, se adapten a las condiciones locales.

Los gobiernos locales poseen el conocimiento y la conexión con sus comunidades para desarrollar e implementar estrategias de adaptación que sean efectivas y sostenibles.

Al estudiar las islas de calor urbanas, las entidades estatales pueden contribuir a la creación de ciudades más resilientes, capaces de enfrentar eventos climáticos extremos.

Esto no solo mejora la calidad de vida de residentes y de quienes transitan por la ciudad, sino que también promueve un entorno urbano más sostenible.

Al integrar la sostenibilidad en la planificación urbana, los gobiernos locales pueden promover que el desarrollo económico respete el ambiente. Esto incluye políticas de uso de suelo y la creación de espacios verdes que mitiguen el efecto de las islas de calor y mejoren la calidad de vida de las personas.

Los problemas asociados a las islas de calor urbanas requieren una respuesta coordinada entre diferentes niveles de gobierno y sectores. Los gobiernos locales pueden servir como un puente entre la ciudadanía y las entidades estatales, garantizando que las políticas sean coherentes y efectivas.

2. Sección 1: Información general

2.1. Marco conceptual

El fenómeno de **isla de calor urbana (ICU)** (Urban Heat Island - UHI) ocurre cuando la centralidad de un área urbana es más cálida que en sus zonas periféricas, por lo general no urbanizadas (Cochran, 2014; Fan et al., 2016). En general se cuantifica la diferencia térmica entre la temperatura de la superficie a una altura de 1.5 m en una región urbana con respecto a su zona periférica usando una estación térmica (Jin, 2012).

La isla de calor urbana presenta dos características claves:

1. La temperatura de la superficie a un metro y medio en la centralidad del área urbana es mayor a la temperatura existente en el sector de la periferia.
2. El máximo efecto de la ICU se presenta durante la noche o en las primeras horas de la mañana.

Por lo anterior, es necesario definir el límite de la aglomeración urbana y su área inmediata mediante un mapa de cobertura de la tierra (Zhao et al., 2016).

Para realizar esta delimitación, es fundamental considerar la definición del concepto ciudad en Costa Rica. Esto asegura que para la gestión y administración de recursos destinados a la implementación de estrategias cuenten con un respaldo legal, especialmente en el caso de los gobiernos locales. El Decreto Ejecutivo 41548 del Ministerio de Gobernación y Policía define ciudad como:

"Área urbana, donde se asentarán las autoridades políticas y administrativas más relevantes cuando se ha aprobado por ley la creación de un cantón, en adelante mantendrá el control administrativo de todo el territorio comprendido como cantón, (Ley 4366, División Territorial Administrativa, de 1969).

A partir de lo indicado en la normativa, para que un asentamiento humano sea considerado como una ciudad en Costa Rica, al amparo de la legislación nacional, debe ser un área urbana en la que se localicen físicamente los centros administrativos del cantón. Esta situación solo ocurre en los distritos cabeceras de cantón y de una manera tácita otros aspectos como el tamaño de la población, cantidad de actividades económicas ni su morfología urbana inciden en la delimitación de las ciudades.

Por tanto, en términos legales la división territorial administrativa de Costa Rica ofrece la delimitación de las ciudades del país. Sin embargo, es fundamental considerar otros criterios para estudiar efectivamente las ICU.

Los materiales de construcción utilizados en las ciudades, que a menudo son oscuros, absorben más energía solar, lo que hace que ciertas áreas de la ciudad sean más propensas al efecto de isla de calor. El proceso de liberación de la energía absorbida es lento, por lo que puede mantener altas temperaturas durante varias horas en este tipo de zonas (Portillo, 2024).

La **infraestructura** incluye elementos como edificios, calles, aceras y asfalto, que retiene el calor de manera más eficiente que los espacios abiertos y naturales, como parques arbolados o los bosques. En este contexto, la ausencia de vegetación en las ciudades reduce la capacidad de enfriamiento natural que se genera mediante la evaporación del agua.

Por tanto, un criterio fundamental a considerar es la **cobertura de la tierra**, el cual consiste en la caracterización y clasificación de entidades complejas con dimensiones espaciales presentes en la superficie terrestre. Es una generalización jerárquica según los elementos superficiales que componen la tierra y el tipo de aprovechamiento o uso antrópico al que se somete (Barrantes-Sotela, 2020).

No solo la forma en que se construyen ciudades incide en el fenómeno de la isla de calor, sino también las actividades que se llevan a cabo en ellas. El uso de sistemas de aire acondicionado, la generación de energía, la industria y el transporte producen calor como subproducto. Además, las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atrapados en las ciudades contribuyen al incremento en la temperatura (Portillo, 2024).

La **variabilidad climática** implica cambios en variables como la temperatura, la precipitación, la humedad y otros factores atmosféricos, los cuales pueden tener relaciones no lineales con los fenómenos (como la frecuencia de eventos extremos, patrones de temperatura a lo largo del tiempo o impactos en ecosistemas).

Tanto la cobertura de la tierra como la variabilidad climática pueden ser estudiadas mediante **sensores remotos**. Un sensor remoto es un dispositivo que permite recolectar información sobre un objeto, área o fenómeno sin necesidad de estar en contacto directo con él.

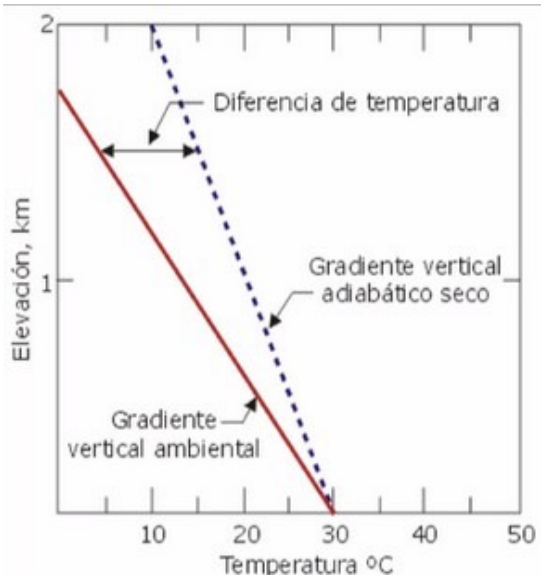
Estos sensores –instalados en plataformas como satélites, aviones o drones– detectan la radiación electromagnética reflejada o emitida por los elementos de la superficie terrestre, como rocas, suelos, vegetación y agua. Asimismo, los sensores remotos permiten determinar la temperatura de la superficie terrestre, así como identificar los tipos de coberturas, la emisividad y la reflectividad de los materiales dispuestos en la ciudad (Kala et al., 2014; Oke, 2006a).

También, se puede hacer recolección de los datos en campo con el objetivo de disminuir los posibles sesgos derivados del uso de los sensores remotos. La información obtenida por los sensores remotos y mediciones de los instrumentos en campo permite generar el perfil térmico del área de estudio.

Un perfil térmico, utilizado para determinar islas de calor urbanas, es una representación gráfica de las variaciones de temperatura en diferentes puntos de una ciudad. Este perfil se obtiene mediante sensores de temperatura distribuidos estratégicamente en áreas urbanas y rurales para medir las diferencias térmicas.

El **gradiente adiabático** seco se refiere a la tasa en la que la temperatura disminuye a medida que aumenta la altitud (ver siguiente Figura 1). El factor aproximado es una tasa de disminución de la temperatura de 0.98 °C por cada incremento de 100 metros.

Figura 1. Gradiente adiabático secoonte adiabático seco



Una de las características físico-espaciales más determinantes para tener en cuenta en el estudio de las ICU es el gradiente adiabático seco.

Debido a la diferencia de temperatura que se genera por la altitud, se recomienda que la diferencia altitudinal no debe superar más de 100 m, ya que se introduciría un sesgo asociado a la variabilidad de la temperatura por gradiente adiabático y no por las características de los materiales presentes en la superficie de la ciudad.

En el estudio de las ICU se pueden distinguir dos tipos:

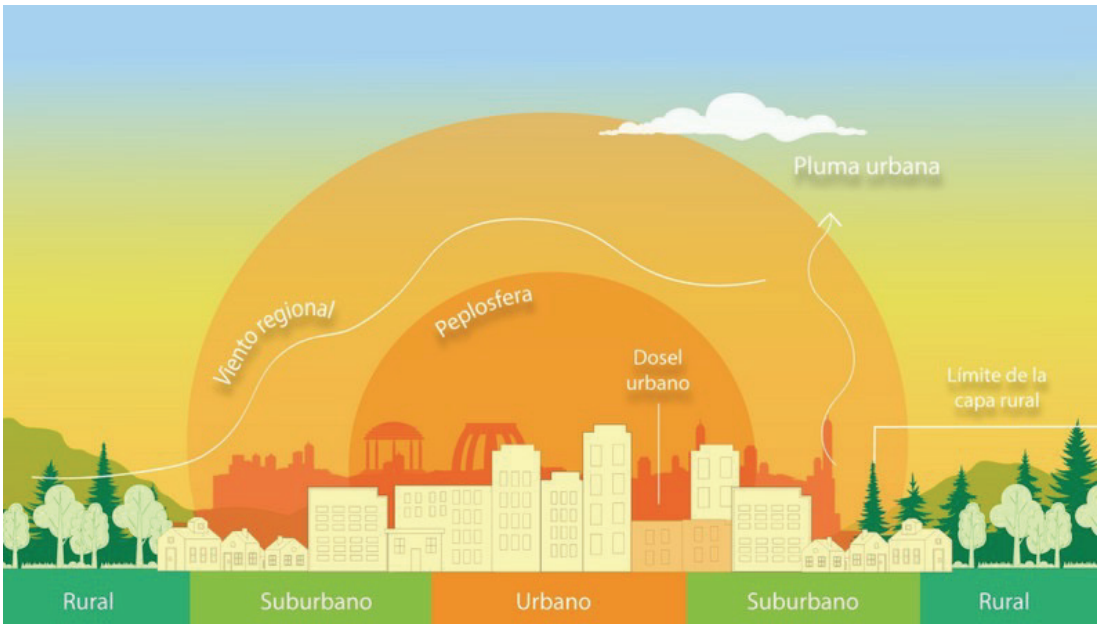
- **Isla de calor atmosférica**, que representa las diferencias en la temperatura entre las zonas urbanas y las rurales;
- **Isla de calor superficial**, que indica las diferencias térmicas entre las superficies artificiales (pavimento, aceras, edificios, entre otros) y las naturales (vegetación, cultivos, entre otros) (Fernández & Martilli, 2012).

Ambas, presentan diferencias en los mecanismos de formación y en las técnicas metodológicas aplicadas para su identificación.

La isla de calor superficial se identifica de manera indirecta mediante técnicas de teledetección; mientras que la isla de calor atmosférica se identifica de forma directa, con datos de estaciones meteorológicas fijas y mediaciones por transectos. También se diferencian en la representación de las ICU: la ICU superficial se representa mediante imágenes térmicas, en tanto que la ICU atmosférica se representa con mapas de isotermas y gráficos térmicos.

En esta guía se proponen metodologías que contemplan la determinación de la ICU superficial, urbana y suburbana/rural, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Esquema de la isla de calor urbana



2.2 Diferencia entre isla de calor y ola de calor

Estos términos suelen ser origen de confusiones y en algunos casos se utilizan como sinónimos.

Si bien las olas de calor son eventos climáticos no permanentes que no están relacionados en forma directa con la urbanización, al ser simultáneos actúan en conjunto. Las islas de calor urbanas por su parte amplifican el fenómeno de la ola de calor, lo que afecta directamente en la vida de la ciudad.

Cuando una ola de calor afecta una región que incluye una ciudad con ICU, las temperaturas en esa ciudad pueden intensificarse, lo que incrementa el riesgo de problemas de salud y estrés térmico para la población urbana.

Las principales características de las **islas de calor**:

- Es un fenómeno local que ocurre en áreas urbanas.
- Se produce cuando una ciudad o área densamente poblada tiene temperaturas más altas que sus alrededores rurales.
- Ocurre debido a la infraestructura urbana, como edificios, carreteras y pavimento, que absorben y retienen más calor que áreas naturales como parques o campos.
- Suelen darse de manera permanente o cíclica, afectando la temperatura de la ciudad principalmente durante la noche.
- Las causas incluyen la falta de vegetación, el uso de materiales que retienen calor (como asfalto), la alta densidad de edificios y el uso de vehículos y maquinaria que generan calor.

Por otro lado, las características de las **olas de calor** (Figura 3):

- Es un fenómeno meteorológico de gran escala, que afecta a una región amplia durante un período determinado.
- Se refiere a un periodo prolongado (varios días o semanas) con temperaturas excepcionalmente altas, por encima de los valores normales para la región.
- Pueden afectar tanto a áreas rurales como urbanas.
- Este fenómeno está relacionado con patrones climáticos, como la alta presión atmosférica que atrapa el aire caliente en una región.
- Una ola de calor es temporal y está más vinculada a cambios estacionales o variaciones del clima global.

La isla de calor es un fenómeno urbano localizado y permanente, mientras que la ola de calor es un evento temporal de alta temperatura que abarca una región más amplia.

Figura 3. Datos de la ola de calor

3. Sección 2: Metodología

3.1 Propuesta metodológica

Esta propuesta metodológica busca describir las características espaciales y temporales del fenómeno de la isla de calor urbana. Además, pretende explicar la relación de las coberturas de la tierra y el comportamiento térmico de la superficie que se extiende de las centralidades urbanas y zonas periféricas, en un período de tiempo determinado para identificar patrones estacionales y cíclicos en la formación de la ICU.

Tabla 1. Características básicas de las islas de calor superficial y atmosférica

Características	Isla de calor superficial	Isla de calor atmosférica
Temporalidad	- Presente durante el día y la noche. - Mayor intensidad durante el día y en el verano.	- Débil o inexistente durante el día. - Mayor intensidad durante la noche o antes del amanecer y en el invierno.
Picos de intensidad	- Gran variación espacial y temporal: ▪ Durante el día de 10 °C a 15 °C. ▪ Durante la noche de 5 °C a 10 °C.	- Menor variación: ▪ Durante el día: 1°C a 3°C. ▪ Durante la noche: 7 °C a 12 °C.
Método de identificación	- Método directo. ▪ Registradores de datos en superficie. - Método indirecto. ▪ Teledetección.	- Método directo ▪ Estaciones meteorológicas fijas. ▪ Transectos móviles. - Método indirecto ▪ Modelado climático
Representación	- Imagen térmica - Gráficos térmicos	- Mapas de isotermas. - Gráficos térmicos

Como se mencionó anteriormente, existen dos tipos de islas de calor: la superficial y la atmosférica. En la Tabla 1 se pueden apreciar sus características, así como las metodologías diferentes de cálculo, identificación y representación.

De acuerdo con los métodos de identificación de la ICU, se proponen tres metodologías que contemplan el análisis de la ICU superficial:

1. **Método indirecto:** cruce de variables (temperatura superficial y categorías de coberturas de la tierra): superpone los datos de temperatura y coberturas de la tierra para establecer la variación de la temperatura en función de los diferentes tipos de cobertura.
2. **Análisis de transectos:** utiliza líneas de transecto a lo largo de la ciudad para elaborar perfiles térmicos, con el fin de determinar la transición de la temperatura entre las zonas periféricas y áreas centrales.
3. **Método directo:** estaciones fijas: determina la ICU superficial empleando dispositivos de recolección de datos ubicados en puntos de muestreo específicos, para generar mapas de isotermas y gráficos térmicos.

Las propuestas metodológicas mencionadas se aplicaron en dos casos de estudio: los cantones de Esparza y Alajuela.

Estos cantones fueron elegidos para comparar las características del fenómeno de la ICU en dos áreas urbanas: una de una ciudad intermedia con alta densificación localizada en la Gran Área Metropolitana (Alajuela), y otra área urbana con características de menor densificación ubicada en una zona rural o semirrural (Esparza).

Es importante señalar que, gracias a la coordinación con la Municipalidad de Esparza, se pudo aplicar los tres métodos para determinar la ICU en este cantón. No obstante, en el caso de Alajuela, se lograron aplicar únicamente dos métodos: análisis de transectos y el método indirecto.

La aplicación de las metodologías en nuestro país hace que la presente guía sea más compresible, ya que a lo largo del desarrollo metodológico se darán ejemplos de los resultados obtenidos en los diferentes procesos para la determinación de la ICU.

En concordancia con lo anterior, el desarrollo metodológico en esta guía se plantea en dos partes:

1. **Procesos para determinar la ICU:** se describen los procesos y la generación de datos básicos para determinar la ICU. Independientemente de los métodos propuestos, estos procesos son esenciales para iniciar con el estudio.
2. **Métodos para analizar la ICU:** en esta sección, considerando la información disponible y accesible en nuestro país, se brindan distintos métodos para determinar la ICU.

Cabe destacar que los resultados obtenidos mediante el método directo en Esparza no son estadísticamente significativos; sin embargo, se plantea la necesidad de realizar las mediciones con una temporalidad más amplia y con mayor número de estaciones fijas.

El propósito final de esta guía técnica consiste en brindar alternativas metodológicas para la determinación de la ICU en las ciudades del país.

Se ofrecen tres metodologías distintas con el objetivo de ofrecer a los gobiernos locales alternativas de estudio del efecto de la ICU que se ajusten a sus recursos técnicos y financieros.

3.1.1 Procesos para determinar la ICU

Para determinar la ICU empleando cualquiera de los tres métodos propuestos en esta guía, es necesario realizar los siguientes procesos básicos:

1. **La delimitación del área de estudio.**
2. **Componente de variabilidad climática.**
3. **Selección y procesamiento de las imágenes satelitales correspondientes al área de estudio.**

3.1.1.1 La delimitación del área de estudio

Para establecer el área de estudio, es necesario delimitar la zona urbana, ya sea desde el marco legal o con la aplicación de ciertos criterios.

Además, es fundamental considerar aspectos históricos, fisco-espaciales, poblacionales y jurídicos de cada ciudad en estudio. Respecto de los aspectos históricos, resulta necesario establecer la centralidad urbana histórica, la cual hace referencia al origen o la fundación de la ciudad: cómo surgió, cómo se desarrolló su núcleo principal y hacia dónde se expandió y creció.

Por lo general, es el lugar donde se establecieron las primeras instituciones, plazas o parques, mercados y edificios a los que se les denomina hitos, por su relevancia cultural y socioeconómica en el espacio urbano.

De esta manera, la configuración urbana se establece como uno de los criterios para la delimitación del área de estudio.

Por ejemplo, en el caso de Esparza, su configuración urbana se caracteriza por mantener un centro urbano bien definido con trama urbana en forma de damero. Su estructura está en función de las actividades terciarias y cuenta con las características que establecen una jerarquía urbana de ciudad terciaria.

Mantiene una baja y moderada densidad de la edificación con alturas predominantemente de un piso. En el distrito central se concentran los servicios y equipamientos que abastecen a los habitantes del cantón.

Considerando lo anterior, se delimitó el área de análisis dentro de las siguientes coordenadas geográficas máximas (decimales) (ver Tabla 2):

Tabla 2. Esparza: coordenadas máximas del cuadrante de análisis

Norte:	10.0311967
Sur:	9.9553048
Oeste:	-84.7009221
Este:	-84.6237945

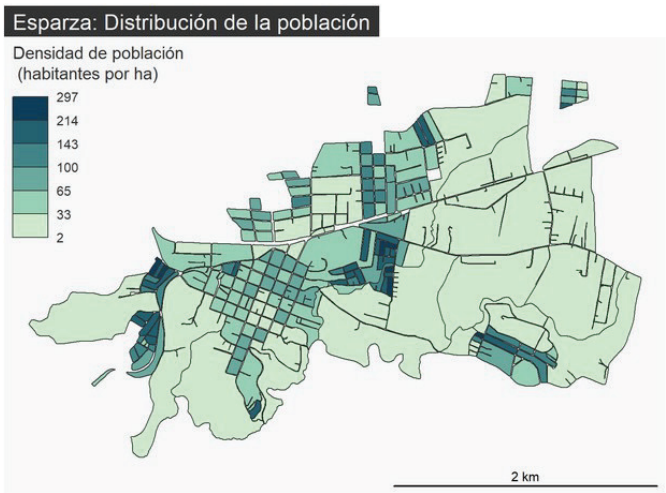
Una vez obtenidas las coordenadas, fue posible delimitar el área de estudio, la cual coincide con los distritos Espíritu Santo, Macacona y San Juan Grande.

Ahora, es posible incluir criterios demográficos. Es importante considerar la densidad poblacional, ya que es un indicador no solo de la población afectada por el fenómeno, sino que ayuda a determinar las zonas de concentración habitacional.

Para determinar la densidad de población en los casos de estudio de Alajuela y Esparza, se utilizó la información disponible por Unidad Geoestadística Mínima (UGM) elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) en el Censo de Población del 2011 (último censo del que se tienen datos a esa escala espacial).

En la Figura 4 se muestra el cálculo de la densidad de población por UGM en los distritos Espíritu Santo, Macacona y San Juan Grande del cantón de Esparza.

Figura 4. Densidad de población (hab/ha) en los distritos Espíritu Santo y Macacona.



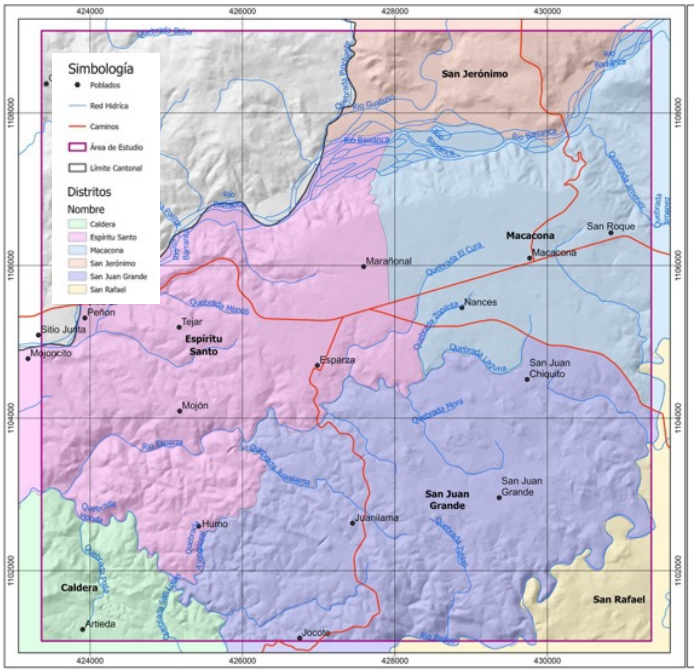
**Nota: Elaborado a partir de datos del Censo de población del 2011, INEC.
Datos por Unidad Geoestadística Mínima (UGM)**

En el caso de Alajuela, por ejemplo, se definieron zonas con una extensión de 16 x 16 kilómetros, mientras que para la ciudad de Esparza se delimitaron áreas de 8 x 8 kilómetros, lo que establece una proporción de 1:2.

Como resultado de la aplicación de la proporción en el caso de estudio de Alajuela, el área considerada para el análisis de acuerdo con las dimensiones del cuadrante propuesto es de 256 km² y en el caso de Esparza, el área considerada para el análisis según las dimensiones del cuadrante propuesto es de 64 km². (Ver Figura 5)

Aplicando estos criterios se demarcó el área de estudio para las ciudades de los casos de estudio en su sentido jurídico, físico y demográfico, lo que facilitó el procesamiento de los datos.

Figura 5. Esparza: área de interés con los distritos Espíritu Santo, Macacona y San Juan Grande



Una vez establecidos los criterios para determinar el área de estudio, es importante proponer la construcción de un área de interés que abarca el área urbana y la periférica.

3.1.1.2 Componente de variabilidad climática

La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones en los patrones climáticos promedios en una región específica durante períodos de tiempo cortos como meses, años o décadas. Su estudio implica el análisis de datos climáticos obtenidos a partir de estaciones meteorológicas y metodologías como la descomposición de series de tiempo.

Chandler (2005) y Zhang (2018) establecen que las tendencias de una serie temporal climática no son lineales y para describir los patrones a lo largo de un período determinado es necesario establecer las variaciones estacionales entre años, durante el año e incluso durante las horas del día.

Esta guía propone la aplicación de modelos aditivos generalizados (MAG) a los datos meteorológicos para la determinación de la variabilidad climática, debido a su capacidad para modelar relaciones complejas y no lineales entre los factores climáticos y sus efectos.

Esto implica establecer los cambios en variables como la temperatura, la precipitación, la humedad, y otros factores atmosféricos, los cuales pueden tener relaciones no lineales con los fenómenos que se pretende analizar, tales como la frecuencia de eventos extremos, los patrones de temperatura a lo largo del tiempo o los impactos en los ecosistemas.

Además, estas permiten visualizar estas asociaciones de forma sencilla. Los MAG analizan y observan el comportamiento estacional, tendencial y aleatorio, mediante la siguiente ecuación:

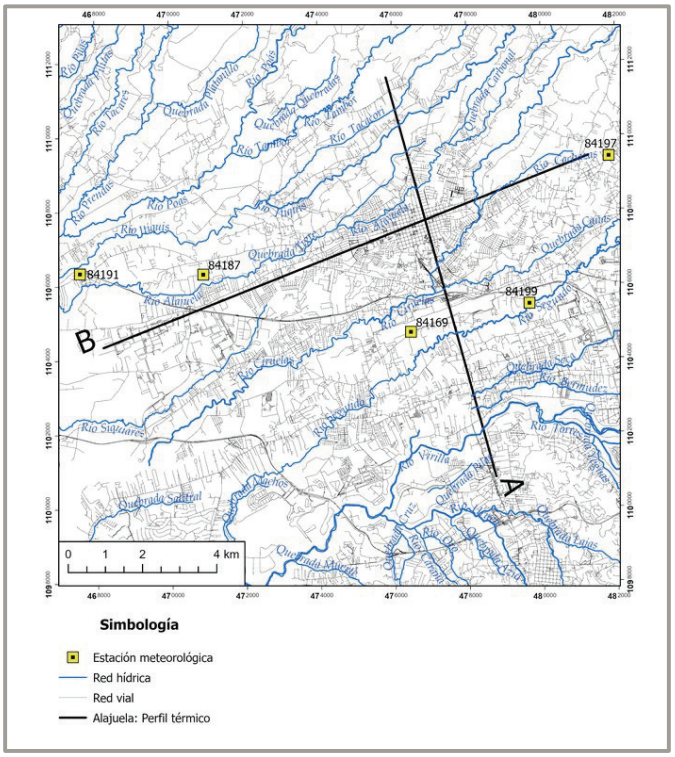
$$y = \beta_0 + f_{estacional}(x_1) + f_{tendencia}(x_2) + \epsilon, \quad \epsilon \sim N(0, \sigma^2 \Lambda)$$

Donde β_0 es la intersección, $f_{estacional}(x_1) + f_{tendencia}(x_2)$ son funciones no paramétricas suavizadas para las características estacionales y de tendencia de las variables que interesan (temperatura, humedad relativa, etc.).

Mientras que x_1 y x_2 son los datos covariables que proporcionan algún tipo de indicadores de periodicidad para los tiempos en el día, dentro del año y entre años. Además, el error tiene una distribución normal multivariante, con media 0 y varianza multiplicada por la matriz de covarianza (Λ).

En la Figura 6 se muestran las estaciones meteorológicas 84169, 84187, 84191, 84197 y 84199, para el área de estudio en el cantón de Alajuela.

Figura 6. Alajuela: localización de estaciones meteorológicas cercanas



Las estaciones 84169, 84187, 84191, 84197 y 84199 son las más relevantes desde un criterio de proximidad espacial.

Con los datos de estas estaciones, es posible generar las estadísticas del análisis de tendencia de las variables en estudio. En la Tabla 3 se muestra un resumen estadístico de las variables analizadas.

La estación 84169 ubicada en el Aeropuerto Juan Santamaría presenta un período de observación de 20 años, 3 meses y 27 días, con 173 074 registros. La serie temporal muestra un patrón cíclico aperiódico. En la tendencia se registra un máximo de temperatura de 23,49 °C y mínimo en 21,57 °C. Se estima que el coeficiente de variación interanual (CVI) es de 1,65 %.

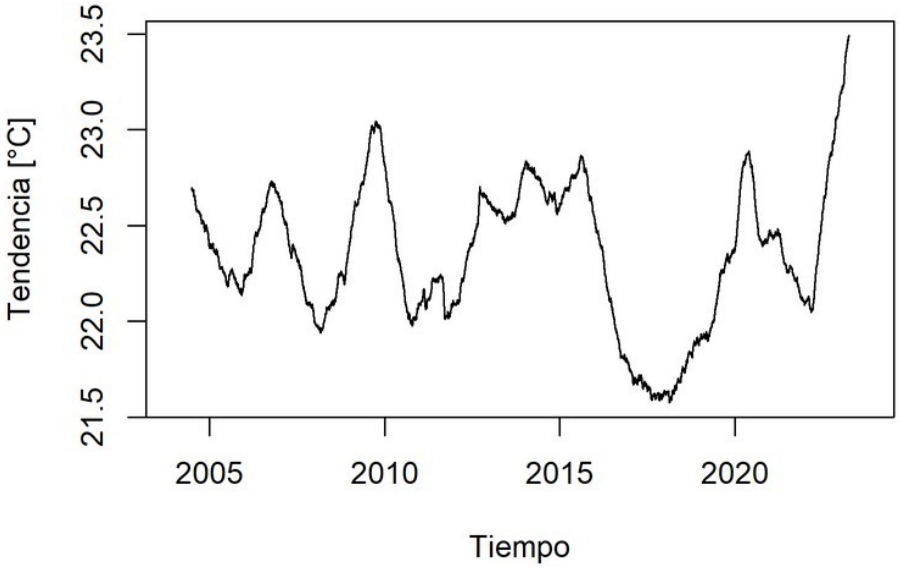
A su vez, la tendencia secular indica que la temperatura es 0,37 °C más cálida que al inicio del registro. En los años 2010, 2017, 2021 y 2023-2024 se observa un incremento más elevado en la variación de la temperatura (Figura 7).

Tabla 3. Estaciones cercanas a la ciudad de Alajuela: estadísticas de las tendencias de temperaturas [°C] derivadas de las series de tiempo

Estación	$\bar{X}$	Sd	Mín.	Máx.	Intervalo	CVI
84169	22,35	0,37	21,57	23,49	1,92	1,65 %
84187	22,79	0,27	22,21	23,76	1,55	1,17 %
84191	23,33	0,47	22,48	24,57	2,08	2,02 %
84197	21,35	0,29	20,70	22,12	1,42	1,36 %
84199	22,51	0,34	21,93	23,49	1,56	1,49 %

Nota: Estadísticas de media, desviación estándar, mínimo, máximo, intervalo y coeficiente de variación interanual CVI (%) de las tendencias de temperatura.

Figura 7. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría, Alajuela. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal

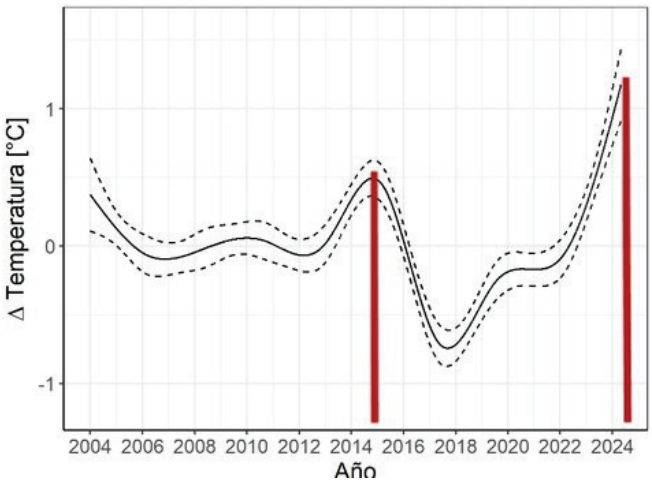


Para entender mejor las variaciones, se aplica un MAG al cuadrado a los datos de las estaciones. En la Figura 8 se observa la variación térmica a lo largo de los años 2004-2024 para la estación 84169 en el Aeropuerto Juan Santamaría.

En términos de variación significativa, precisamente en los años 2015 y 2024 se produce un aumento positivo de la temperatura (casi medio grado Celsius).

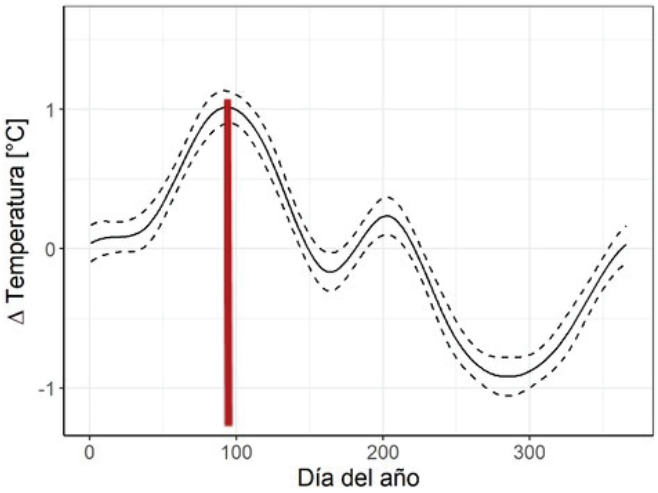
Mientras que en el año 2017 se observa la mayor variación negativa (aproximadamente -0,6 a -0,7°C) con respecto al patrón de la tendencia de la serie temporal.

Figura 8. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría.
Comportamiento de la variación de la temperatura por año, durante el período 2004 al 2024.



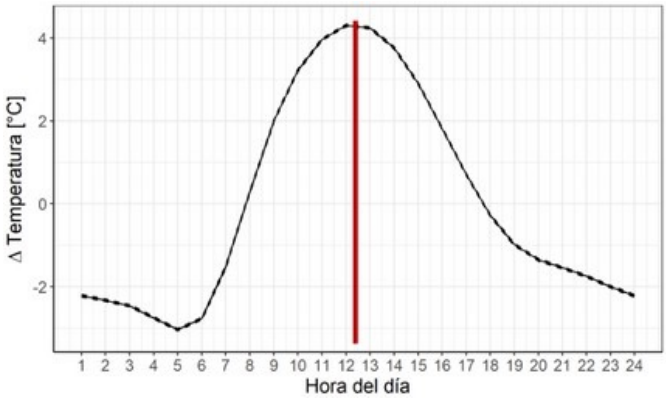
En la Figura 9 se visualiza la variación térmica a lo largo de los días del año. Durante los días 90 y 100 del año (entre los meses de marzo y abril) se experimentan las más elevadas ganancias térmicas positivas.

Figura 9. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría.
Comportamiento de la variación de la temperatura según día del año, durante el período 2004 al 2024



En la Figura 10 se representa la variación de la temperatura durante las horas del día, y por las circunstancias geográficas del país se observa que las temperaturas más elevadas se alcanzan entre las 12 y 13 horas del día, mientras que las temperaturas más altas durante de la noche se alcanzan justo a la media noche.

Figura 10. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría.
Comportamiento de la variación de la temperatura según hora del día, durante el período 2004 al 2024

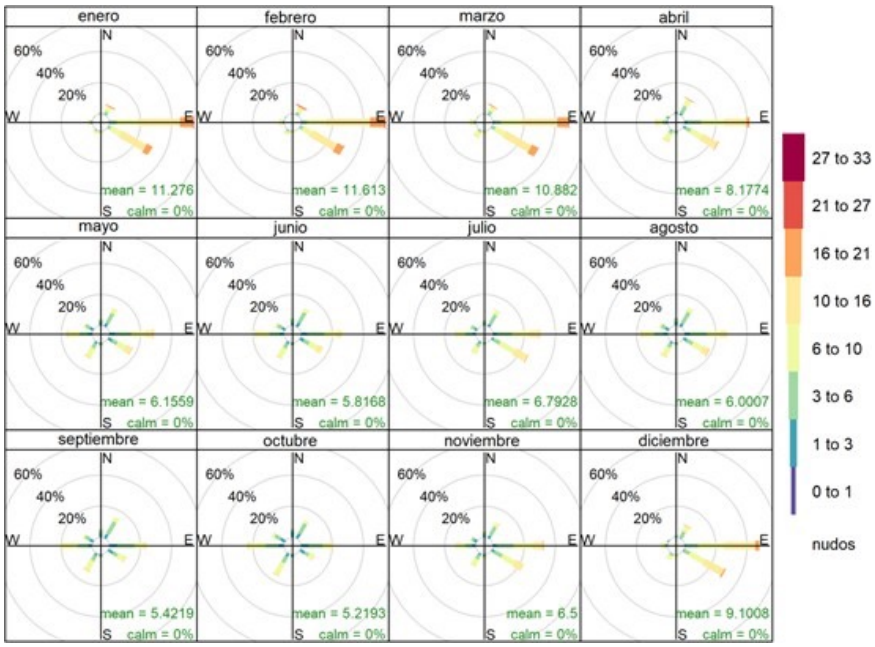


Para el análisis de la ICU, se debe tener en cuenta que el fenómeno presenta sus mayores intensidades en días calmos y con baja nubosidad. En Alajuela corresponde a los meses de marzo y abril, en los cuales el cielo está despejado en un 62 % y la velocidad del viento varía en aproximadamente 5 a 10 km/h (Figura 10).

Entonces, una vez calculadas las variaciones térmicas anuales, por días del año y por horas del día, es necesario determinar la dirección y magnitud del viento. Este cálculo se realiza con la misma metodología con la que se realizó la variación térmica.

A continuación, se muestra los resultados obtenidos de la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto Juan Santamaría por meses del año (Figura 11).

Figura 11. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría. Comportamiento de la variación de la dirección y magnitud del viento por mes.
Agrupados por categorías de magnitud de vientos en escala de Beaufort



Gracias a la estimación del componente de variabilidad climática, es posible identificar los meses y días en los que ocurren las principales variaciones. Esta información permite determinar el periodo de tiempo adecuado para realizar el el análisis de los datos, así como la selección de imágenes satelitales posibles de trabajar (dependiendo de la disponibilidad y el sensor). En este caso se trabajaron los meses de enero a mayo (5 meses).

3.1.1.3 Selección y procesamiento de imágenes satelitales

Para identificar la isla de calor urbana (ICU) es común el uso de sensores remotos para monitorear la temperatura del aire alrededor de las zonas de estudio (Gartland, 2008). Los sensores remotos se utilizan para determinar la temperatura de la superficie terrestre, así como para identificar los tipos de coberturas, emisividad y reflectividad de los materiales dispuestos en la ciudad (Kala et al., 2014; Oke, 2006).

Actualmente existe un gran número de sensores remotos útiles para el estudio de la ICU, tales como Landsat TM y ETM+4, NOOA AVHRR, Terra ASTER y Terra MODIS. (Sarricolea & Martín-Vide, 2014).

Curran (1985), citado por Sarricolea (2012b), señala que existen cuatro propiedades térmicas importantes de la superficie que pueden ser detectadas por sensores remotos: la capacidad térmica como una medida potencial de un cuerpo para almacenar calor; la conductividad térmica que mide el ritmo de transmisión de calor en un material; la difusividad térmica que es la velocidad de variación térmica en el volumen de un material y la inercia térmica que es el grado de respuesta a los cambios de temperatura (Aguilar-García, 2021).

En este estudio realizado en Esparza y Alajuela, se utilizaron las imágenes obtenidas por el sensor infrarrojo térmico (TIRS) de los satélites Landsat 8 y 9. El sensor TIRS dispone de una amplia documentación y literatura científica en la determinación de la temperatura de la superficie terrestre.

El sensor TIRS (Banda 10 y 11) presenta una resolución espacial de 90 a 100 metros. Los datos de este sensor fueron reescalados a 30 metros para ser analizados en conjunto con el sensor Operational Land Imager (OLI).

Aunque existen otros sensores como MODIS y Sentinel 3 que pueden utilizarse para la estimación de la temperatura superficial, en el caso de las ciudades con la extensión superficial como las de Alajuela y Esparza, la resolución espacial de sus bandas térmicas es de 1 kilómetro, escala que no permite extraer la información necesaria.

Se debe realizar una serie de procesos a las imágenes satelitales para poder ser utilizadas. El primero es la calibración por factor de escala para convertir los valores digitales de los píxeles a valores de reflectancia. Para ello se utiliza las siguientes ecuaciones:

Radiancia:

$$\mathrm{L}_\lambda = \mathrm{Ganancia} \times \mathrm{ValorPixel} + \mathrm{Valor\ \ de\ \ compensaci}\,ón$$

$$L_\lambda = \frac{Q_{cal}}{100}$$

Reflectancia:

$$\rho_\lambda = \frac{\pi \times L_\lambda \times d^2}{ESUN_\lambda \times sin\theta}$$

Donde:

L_λ : Radiancia en unidades de $W/(m^2 * sr * \mu m)$
d : Distancia Sol-Tierra, en unidades astronómicas.
$ESUN_\lambda$: Irradiancia solar en unidades de $W/(m^2 * \mu m)$
θ : Elevación del Sol en grados decimales.

Los datos anteriores se obtienen de los metadatos de las imágenes. A su vez, las imágenes del sensor OLI de los satélites Landsat 8 y 9, en su producto nivel dos son imágenes preprocesadas por la USGS y la NASA, por lo que solo es necesario realizar la siguiente operación para obtener los valores de reflectancia:

$$\text{factor de escala} = (lsat.aoi \times 0.0000275 \pm 0.2)$$

Con el sensor TIRS, el producto de temperatura de superficial de Landsat se genera a partir de las bandas infrarrojas térmicas de nivel 1 de la Colección 2 de Landsat, la reflectancia de la parte superior de la atmósfera (TOA), la temperatura de brillo TOA, los datos de la base de datos de emisividad global (GED) del radiómetro térmico avanzado en el espacio (ASTER).

Con los datos de reanálisis de Earth Resources Observation and Science (EROS) Center (2020), se obtienen los datos del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de ASTER y los perfiles atmosféricos de altura geopotencial, humedad específica y temperatura del aire.

Los valores de temperatura superficial se pueden generar mediante la siguiente conversión de escala:

Lo anterior es una gran ventaja, ya que los datos son de fácil adquisición y es posible realizar la homologación de los datos.

A continuación, se presenta el listado de las imágenes satelitales (Landsat 8 y 9, y Sentinel 2) utilizadas para el estudio de caso realizado en Esparza y Alajuela. (Ver Tablas 4 y 5)

Tabla 4. Listado de imágenes sensor Sentinel 2

Nombre	Fecha
S2B_MSIL1C_20190322T160509_N0207_R054_T16PGS_20190322T205739.SAFE	2019-03-22
S2B_MSIL1C_20190322T160509_N0500_R054_T16PGS_20221121T185447.SAFE	2019-03-22
S2B_MSIL1C_20190322T160509_N0500_R054_T16PHS_20221121T185447.SAFE	2019-03-22
S2A_MSIL2A_20210326T160511_N0500_R054_T16PHR_20230511T060504.SAFE	2021-03-26
S2A_MSIL1C_20210326T160511_N0500_R054_T16PHS_20230511T021437.SAFE	2021-03-26
S2A_MSIL2A_20240330T160511_N0510_R054_T16PGS_20240330T223951.SAFE	2024-03-30
S2A_MSIL2A_20240330T160511_N0510_R054_T16PHS_20240330T223951.SAFE	2024-03-30

Tabla 5. Listado de imágenes sensor Landsat

Nombre	Fecha
LC08_L2SP_015053_20191202_20200825_02_T1	2019-12-02
LC08_L2SP_015053_20200408_20200822_02_T1	2020-04-08
LC08_L2SP_015053_20200915_20200919_02_T1	2020-09-15
LC08_L2SP_015053_20210326_20210402_02_T1	2021-03-26
LC08_L2SP_015053_20210411_20210416_02_T1	2021-04-11
LC08_L2SP_015053_20210427_20210507_02_T1	2021-04-27
LC08_L2SP_015053_20210817_20210827_02_T1	2021-08-17
LC08_L2SP_015053_20210902_20210910_02_T1	2021-09-10
LC09_L2SP_015053_20211231_20230503_02_T1	2021-12-31
LC09_L2SP_015053_20220116_20230501_02_T1	2022-01-16
LC09_L2SP_015053_20220201_20230429_02_T1	2022-02-01
LC08_L2SP_015053_20220329_20220406_02_T1	2022-03-29
LC09_L2SP_015053_20220508_20230417_02_T1	2022-04-06
LC09_L2SP_015053_20220406_20230421_02_T1	2022-04-21
LC08_L2SP_015053_20220601_20220609_02_T1	2022-06-09
LC09_L2SP_015053_20220929_20230327_02_T1	2022-09-29
LC09_L2SP_015053_20230103_20230315_02_T1	2023-01-03
LC09_L2SP_015053_20230220_20230309_02_T1	2023-02-20
LC08_L2SP_015053_20230228_20230315_02_T1	2023-02-28
LC08_L2SP_015053_20230316_20230324_02_T1	2023-03-16
LC09_L2SP_015053_20230425_20230427_02_T1	2023-04-25
LC09_L2SP_015053_20230511_20230516_02_T1	2023-05-11
LC08_L2SP_015053_20230604_20230613_02_T1	2023-06-04
LC09_L2SP_015053_20230628_20230701_02_T1	2023-06-28
LC09_L2SP_015053_20231205_20231206_02_T1	2023-12-05
LC09_L2SP_015053_20231221_20231223_02_T1	2023-12-21
LC09_L2SP_015053_20231221_20231223_02_T1	2024-01-14
LC08_L2SP_015053_20240318_20240402_02_T1	2024-03-18

3.1.1.3.1 Análisis zonal

Los datos anteriores sirven de insumo para consolidar el patrón de distribución espacial de la temperatura de la superficie terrestre (TST). Para esto, primero se elabora un ráster compuesto con todas las imágenes disponibles, aplicando un filtro que extrae los datos de los primeros cinco meses de cada año (2020-2024). Para cada caso de estudio se trabajó con un total de 27 imágenes.

A este filtro se le calculan las estadísticas básicas, como la media, el máximo o el mínimo, mostradas en la Tabla 6. Para los estudios de caso, se decide trabajar con los valores de la media.

Tabla 6. Alajuela: resumen estadístico de la estimación de la temperatura de la superficie en las imágenes de satélite

Año	Media	Máxima	Mínimo	Desv Estándar
2019	35,52	51,09	15,01	--[6]
2020	40,04	63,53	15,00	7,17
2021	36,45	70,96	15,00	5,74
2022	34,11	55,73	15,00	4,92
2023	38,58	65,58	15,01	4,28
2024	39,98	63,09	23,53	7,48

Esto permite identificar las zonas donde el fenómeno es más acentuado, así como su variabilidad temporal, según las características del entorno urbano o de la cobertura superficial de la tierra.

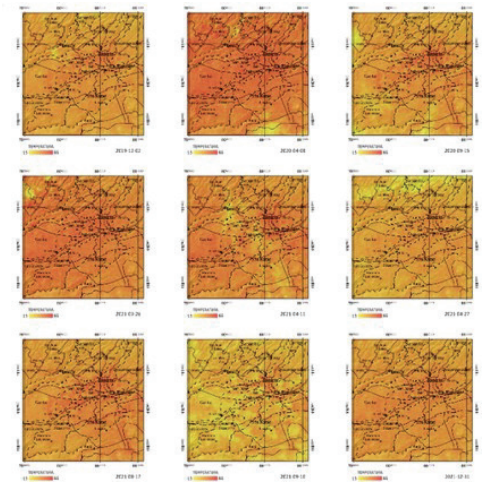
En estos procesos, las herramientas de los SIG y de análisis espacial son fundamentales para la visualización y observaciones de patrones de este fenómeno.

A partir del listado de imágenes satelitales presentado en apartados anteriores, se estimaron las temperaturas de la superficie terrestre (TST) en Esparza y Alajuela. (Ver Figura 12 para el caso de Alajuela)

Luego, se debe mostrar el comportamiento espacial de las temperaturas superficiales por imagen procesada en el área de estudio.

Este análisis se genera combinando todas las imágenes, se elabora un solo ráster mediante el cálculo del estadístico de la media muestral. Este procedimiento permite establecer la variabilidad espacial de la TST en diferentes zonas de la ciudad, lo que facilita una identificación inicial de las áreas donde el efecto es más pronunciado.

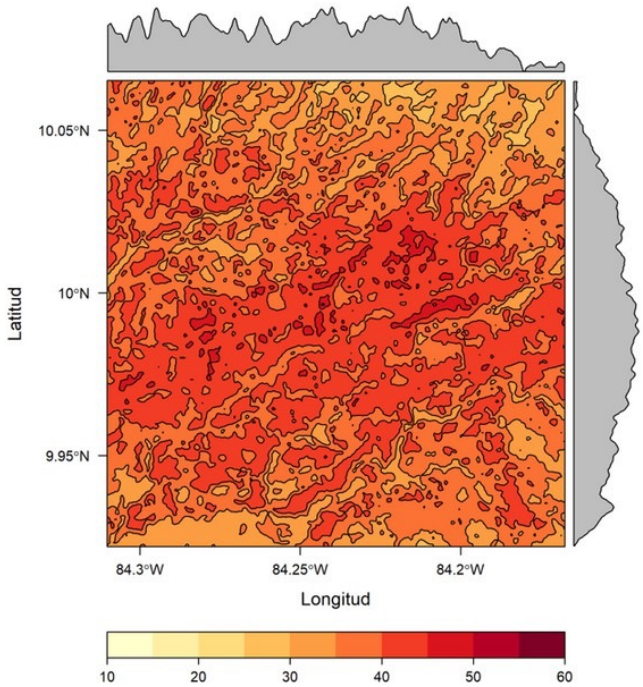
Figura 12. Alajuela: temperaturas de la superficie terrestre entre 2022-01-16 y 2023-02-20. Sensor TIRS del satélite Landsat



Mediante un análisis de intensidad zonal (análisis de vecinos próximos en relación con la media) es posible consolidar la TST en un ráster.

El resultado del análisis zonal de Alajuela se muestra en la Figura 13. Las temperaturas en esta área urbana oscilan entre los 40 °C y los 55 °C.

Figura 13. Alajuela: análisis zonal de la TST [°C] por media de las celdas vecinas entre los meses de enero a mayo del periodo 2020 al 2024. En la sección marginal se grafican los perfiles de temperatura



La Figura 13 muestra la distribución de la TST en direcciones norte-sur y este-oeste, tomando como referencia las coordenadas geográficas del área de estudio, que en este caso corresponde a Alajuela.

Las variaciones en color gris representan los incrementos o las disminuciones de temperatura superficial a lo largo de las coordenadas geográficas.

En este caso se observa un perfil característico de la ICU tal y como lo describe la teoría: temperaturas más elevadas en el núcleo urbano, donde la alta densidad de edificaciones, la impermeabilización del suelo y la ausencia de vegetación contribuyen a la retención de calor.

Las áreas residenciales densas, aunque menos calientes que el núcleo urbano, presentan temperaturas más altas en comparación con los sectores periféricos o rurales.

Una vez determinada la TST, es posible aplicar las tres metodologías propuestas para el análisis de la ICU.

4. Método indirecto: Cruce de variables

Para identificar las coberturas presentes en el área de estudio, se utiliza el sistema de clasificación de la cobertura y uso de la tierra para Costa Rica (SIMOCUTE). Este sistema establece los estándares para la agrupación de elementos terrestres en las siguientes clases: cobertura de la tierra, uso de la tierra y ecosistemas (Acevedo & Villalobos, 2023).

En los casos de estudio de Esparza y Alajuela, se utiliza el primer nivel jerárquico de la clasificación de cobertura de la tierra.

Tabla 7. Clave de clasificación de cobertura de la tierra

Clasificación	Definición
Vegetación (C1000)	Área de la superficie o del suelo cubierta por un determinado tipo de cobertura vegetal.
Terreno descubierto (C2000)	Área desprovista de vegetación o infraestructuras.
Infraestructura (C3000)	Áreas cubiertas de instalaciones construidas por el ser humano.
Agua (C4000)	Superficie cubierta por un espejo de agua.
Nubes y sombras (C5000)	Áreas en las que no es posible determinar la cobertura por efecto de la presencia de las nubes, sombras de nubes u otras sombras del terreno en la imagen satelital o fotografía aérea.
Sin información (C6000)	Áreas de la superficie terrestre de las cuáles no se posee información disponible.

Fuente: Acevedo & Villalobos, 2023

Para identificar las coberturas de la tierra, se emplean los datos de las imágenes satelitales Sentinel-2 en varios períodos temporales. Las imágenes fueron rectificadas y corregidas siguiendo los siguientes pasos para su tratamiento.

Para identificar las coberturas de la tierra, se emplean los datos de las imágenes satelitales Sentinel-2 en varios períodos temporales. Las imágenes fueron rectificadas y corregidas siguiendo los siguientes pasos para su tratamiento.

- **Composición de bandas en falso color (FCC):** Es una técnica de teledetección resalta las características específicas que no serían fácilmente visibles en imágenes en color natural. En el caso de las imágenes Sentinel-2, la combinación de bandas para la FCC se realiza utilizando la banda 8 (infrarrojo cercano, 835,1 nm) para el canal rojo, la banda 4 (rojo, 664,5 nm) para el canal verde, y la banda 3 (verde, 560 nm) para el canal azul. Con una resolución espacial de 10 metros por píxel, esta combinación de bandas es eficaz para la identificación de diversas características del paisaje, como la vegetación y las áreas urbanas (Purwanto & Asriningrum, 2019).
- **Elaboración de polígonos de entrenamiento:** Se utiliza la composición de bandas en FCC como capa base para identificar y distinguir características heterogéneas en el paisaje. La FCC facilita la visualización de diferentes tipos de cobertura terrestre al resaltar contrastes en la imagen. En este proceso, se seleccionan áreas representativas en la imagen FCC para definir polígonos de entrenamiento que representan las distintas categorías de la cobertura de la tierra. Estos polígonos se asignan a las categorías establecidas en la Tabla 7, lo que permite la clasificación precisa de las imágenes en función de las características espectrales y de texturas observadas.
- **Construcción de colección de sitios de entrenamiento:** Para evaluar la precisión de la clasificación obtenida, se efectuó un análisis de similitud espectral y visual de los sitios de control de validación. Estos sitios sirvieron como base ampliada para la elaboración de una matriz de concordancia.

Esta matriz se construyó utilizando un diseño de muestreo estratificado, lo que asegura una representación adecuada de las categorías de cobertura o uso de la tierra. Este enfoque se considera dirigido, con un tamaño y distancia constante del conjunto de muestra.

- **Uso del clasificador Random Forest (RF):** El clasificador RF utiliza numerosas corridas de procesamiento independiente, denominadas árboles de decisión, para generar los resultados de la clasificación. Cada árbol se cultiva a la máxima profundidad sin poda. La construcción de cada árbol se realiza con muestras de arranque (muestreo fuera de bolsa) y en cada nodo las variables se seleccionan al azar para introducir aleatoriedad, minimizar la correlación entre los "árboles" y reducir el sesgo de entrenamiento producido por "árboles individuales". El clasificador RF se ha utilizado para diversas aplicaciones de mapeo y regresión, incluida la estimación de biomasa, la estimación de la calidad de agua y la clasificación de la cobertura del suelo. Este tipo de clasificador se basa en la siguiente ecuación:

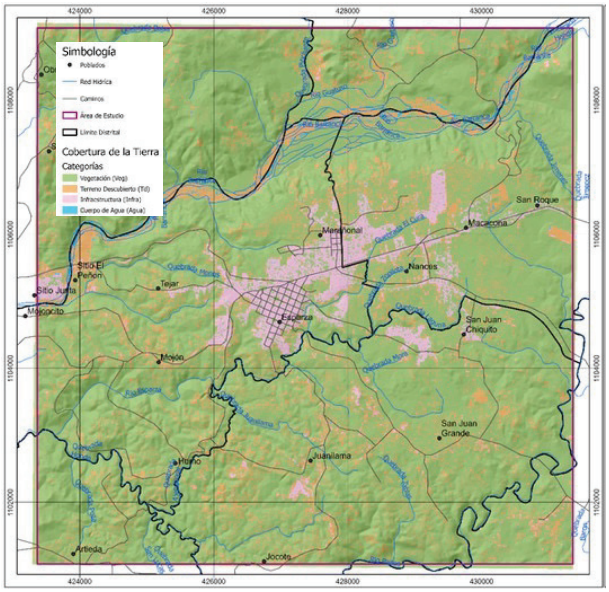
$$p(c|x) = \frac{1}{\sum_{t=1}^{T} \alpha_t I(t \in S)} * \sum_{t=1}^{T} \alpha_t \widehat{p_t}(c|x)$$

La ecuación *Radom Forest* se usa para obtener la probabilidad de que un punto de datos x pertenezca a la clase c. Mientras que S es el conjunto de índices de árboles seleccionados al azar (es decir, bolsa de árboles), α_t es el peso del árbol t, $\hat{p}_t(c|x)$es la salida del árbol t que muestra la probabilidad estimada de que la observación x pertenece a la clase C, e $I(t \in S)$ es la función de indicador que muestra si el árbol t está o no en la bolsa.

Se prefiere **seleccionar las imágenes satelitales capturadas cercanas al período con mayor incremento de la variabilidad térmica** durante el año. Según Barrantes-Sotela, (2020), esto por lo general ocurre alrededor de los días 100 y 120 de año, durante los meses de marzo y abril.

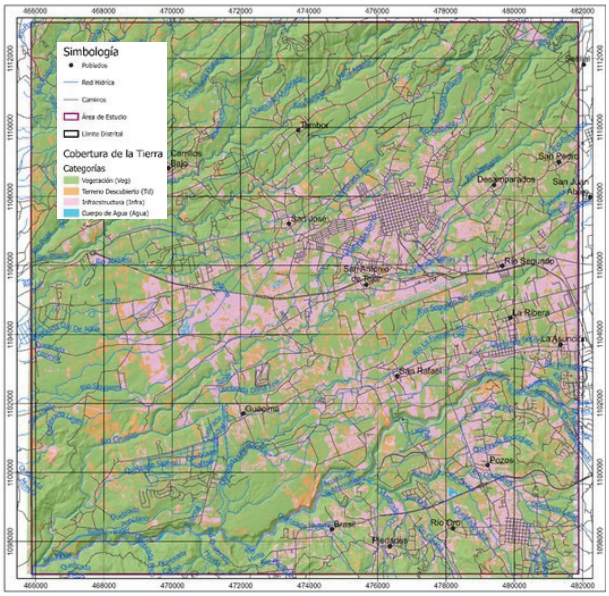
En las Figuras 14 y 15 se ilustran los mapas de Esparza y Alajuela resultantes de la determinación de la cobertura de la tierra utilizando las categorías de clasificación indicadas en el siguiente cuadro.

Figura 14. Esparza: Cobertura de la superficie de la tierra en el año 2024



Nota: Elaborado a partir de imágenes Sentinel-2 y mediante el clasificador Random Forest.

Figura 15. Alajuela: Cobertura de la superficie de la tierra en el año 2024



Nota: Elaborado a partir de imágenes Sentinel-2 y mediante el clasificador Random Forest.

A partir de este análisis cartográfico fue posible establecer que en Esparza la mayor parte del territorio está cubierto por vegetación, con 5321,91 hectáreas, lo que equivale al 81,52 % del área total, como se indica en la Tabla 8.

Por su parte, Alajuela presenta una cobertura de la tierra también dominada por una vegetación que abarca 17.118,82 hectáreas, lo que representa el 66,33 % de la superficie total. (Ver Tabla 9)

A continuación, se presentan los porcentajes de uso de la tierra en las áreas de estudio establecidas para el análisis de la ICU en el año 2024, según cada cantón.

Tabla 8. Esparza: superficies de la cobertura de la tierra en el 2024

Categoría	Hectáreas	Porcentaje
Vegetación	5321,91	81,52
Terreno Descubierto	840,97	12,88
Infraestructura	331,72	5,08
Agua	34,04	0,52
Total	6528,64	100,00

Tabla 9. Alajuela: superficies de la cobertura de la tierra en el 2024

Categoría	Hectáreas	Porcentaje
Vegetación	17118,68	66,33
Terreno Descubierto	3472,39	13,45
Infraestructura	5180,02	20,07
Agua	36,77	0,14
Total	25807,86	100

- Debido a la dinámica de cambio de las coberturas de la tierra en sus diferentes niveles, es necesario buscar que las coberturas de la tierra identificadas sean temporalmente cercanas al período en el que ocurre la mayor intensidad de la ICU. Se determina que la identificación óptima de los elementos en la superficie terrestre puede ocurrir en un intervalo de cada cuatro años.
- **La matriz de confusión:** Se procede a valorar la precisión del clasificador mediante el indicador estadístico de concordancia Kappa, descrito por Cohen (1960). El índice Kappa mide el grado de concordancia entre los resultados de la clasificación supervisada y el uso/cobertura registrada en terreno, ajustando la concordancia observada por el acuerdo esperado al azar.

Tabla 10. Escala de valoración de Índice Kappa

Valor de Índice Kappa	Fuerza de la concordancia
0	Sin concordancia
< 0,20	Insignificante
0,21 – 0,40	Discreto
0,41 – 0,60	Moderado
0,61 – 0,80	Sustancial
0,81 – 1,00	Casi perfecto

El índice Kappa varía de 0, lo cual indica ausencia de correlación, y 1, lo que refleja una correlación perfecta. Según Landis y Koch (1977), un coeficiente Kappa mayor a 0,8 sugiere que la clasificación realizada es poco probable que haya sido obtenida por azar. En la Tabla 10 se indica el nivel de concordancia del clasificador según el valor del índice Kappa.

4.1 Análisis de precisión y concordancia de la clasificación de las coberturas de la tierra

Este análisis proporciona una medida cuantitativa del desempeño del clasificador y ayuda a identificar áreas de mejora en el proceso de clasificación de las coberturas de la tierra realizada a partir del sensor remoto.

Esto quiere decir que, además de obtener la clasificación de las coberturas de la tierra de una imagen satelital, es necesario comprobar que la clasificación fue realizada de manera correcta o qué tanto se acerca o se aleja de la realidad.

4.1.1 Matriz de concordancia

La matriz de concordancia es uno de los primeros pasos que se deben realizar para comprobar los datos obtenidos en la clasificación de las coberturas de la tierra. A continuación, se presentan los resultados de la matriz de concordancia para los sitios de control de validación del año 2024 en el área de estudio en Alajuela. (Ver Tabla 13)

Tabla 11. Alajuela: matriz de concordancia de la clasificación de la cobertura terrestre

	Veg	Td	Infra	Agua
Veg	15751	1162	102	2
Td	479	1173	549	0
Infra	252	1116	5306	0
Agua	11	21	8	121

La tabla se lee de la siguiente manera: siguiendo una diagonal descendente de izquierda a derecha para visualizar los datos validados. Esta línea se llama diagonal de identidad.

	Veg	Td	Infra	Agua
Veg	15751	1162	102	2
Td	479	1173	549	0
Infra	252	1116	5306	0
Agua	11	21	8	121

Así, los resultados de la Tabla 11 se interpretan de la siguiente manera:

En el área de Alajuela, la categoría vegetación en los puntos de entrenamiento muestran 15.751 coincidencias correctas, lo que corresponde a un 91,3% de acierto. Hubo un 6,7% de coincidencias incorrectas con "tierra desnuda" (1 162), un 0.6% con "infraestructura" (102) y un 0,01% con "agua"

(2). Para "tierra desnuda", el acierto fue del 45,7% (1.173 coincidencias correctas), con un 18,7% mal clasificado como "vegetación" (479), el 21,4% como "infraestructura" (549), y 0.0% como "agua".

La categoría "infraestructura" tuvo un acierto del 77,8% (5.306 coincidencias correctas), con un 3,7% de coincidencias incorrectas clasificadas como "vegetación" (252), el 16,3% como "tierra desnuda" (1.116), y 0,0% como "agua". Finalmente, la categoría "agua" mostró un acierto del 80,7% (121 coincidencias correctas), con un 7,3% mal clasificado como "vegetación" (11), un 14,0% como "tierra desnuda" (21), y un 5,8% como "infraestructura" (8).

Ahora, los datos obtenidos de la matriz de concordancia se utilizan para calcular el índice Kappa.

4.1.2 Índice de Kappa

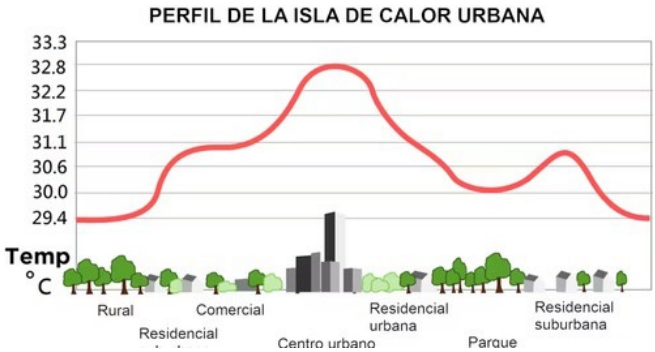
Este índice permite evaluar la exactitud de la clasificación supervisada en comparación con las categorías reales de uso y cobertura del suelo.

En la cobertura en el área de Alajuela se obtiene un índice Kappa con un valor de 0,72 y una precisión de 0,86 y se considera una concordancia con un nivel sustancial (ver Tabla 10). Mientras que para el área de Esparza, el índice Kappa es de 0,79 con una precisión de 0,94 y también presenta una concordancia sustancial. En general, las calificaciones obtenidas se consideran aceptables, es importante desatacar que las asignaciones incorrectas ocurren principalmente en coberturas en las que la respuesta espectral de reflectancia es similar.

5. Método indirecto: Análisis de transectos

La comparación entre zonas de la ICU utilizando el análisis de transectos consiste determinar la diferencia de la TST entre zona urbana y periférica. Supone la elaboración de perfiles del ICU con direcciones en sentido ortogonal o diagonal al centro medio de la ciudad y extendiéndose hacia la zona externa o periférica, como se muestra en la Figura 16.

Figura 16. Variación de temperatura habitual de la ICU



Nota: Tomado de Whenewphobia/Wikimedia commons

En las Figuras 17 y 18 se observan los perfiles para el análisis de la temperatura superficial, los cuales representan hitos o sitios de interés en los cantones Alajuela y Esparza.

El perfil térmico por transectos A y B para el caso de Alajuela que se muestra en la Figura 16 evidencia que las temperaturas en el área urbana han llegado a alcanzar entre los 40 °C y los 55 °C durante el día.

En el perfil B puede observarse que existe un aumento gradual de la temperatura desde las áreas periféricas hasta acercarse al centro urbano.

Figura 17. Perfil térmico de Alajuela

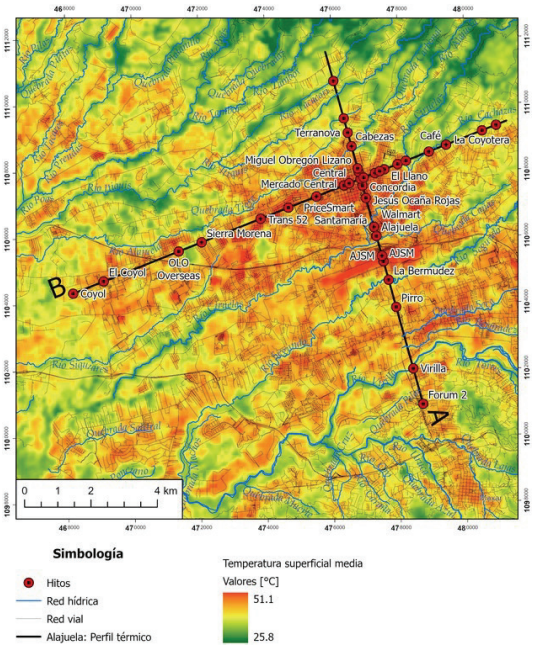
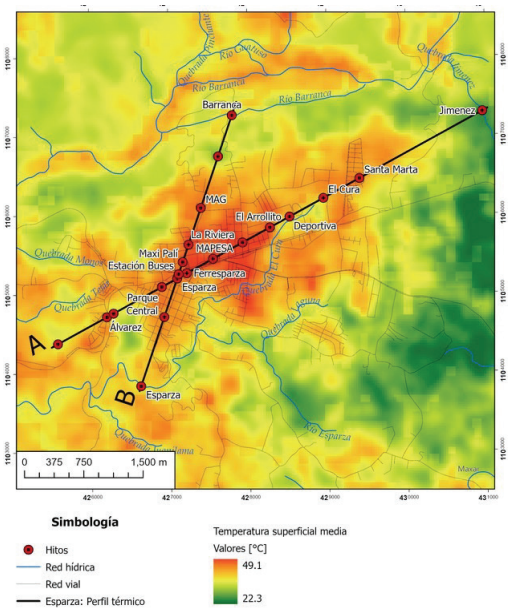


Figura 18. Perfil térmico de Esparza

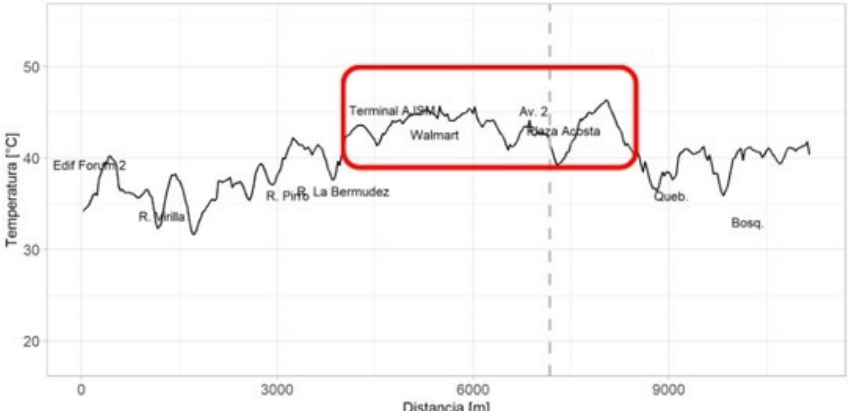


También, se nota que los espacios verdes asociados a los cauces de agua y vegetación urbana, como los parques con floresta, presentan una menor temperatura superficial. Esta se estimó entre 8 °C y 10 °C menos que las superficies con características antrópicas.

Se destaca mayor presencia de irregularidades térmicas en el perfil B. Estas irregularidades se acentúan aún más al este del punto de intercepción de los perfiles, lo que sugiere la presencia de superficies compuestas de materiales con albedos diversos.

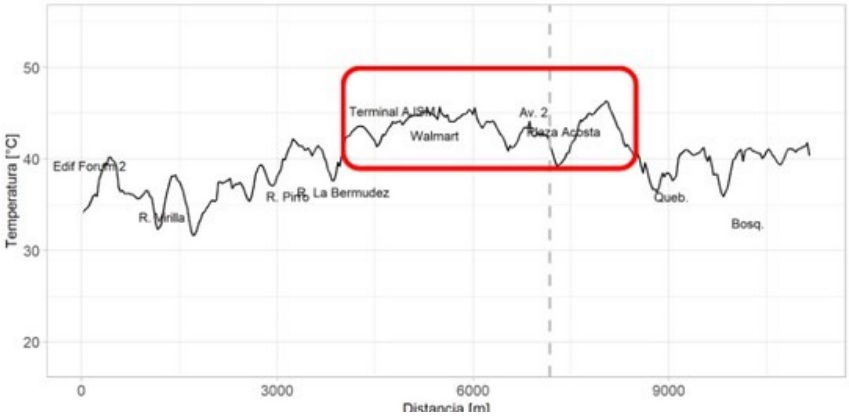
El perfil térmico puede generarse en distintas perspectivas con el fin de ampliar el análisis. La Figura 19 muestra el perfil del transecto A en Alajuela y la Figura 20 el perfil B en Alajuela.

Figura 19. Alajuela: perfil térmico A



Nota: Atraviesa la ciudad en sentido sureste – noroeste. El sector marcado en rojo identifica la centralidad urbana. La línea punteada muestra el punto de intersección de los perfiles.

Figura 20. Alajuela: perfil térmico B



Nota: Atraviesa la ciudad en sentido suroeste - noreste. El sector marcado en rojo identifica la centralidad urbana. La línea punteada muestra el punto de intersección de los perfiles.

6. Método directo: Estaciones fijas

Para reducir el impacto de la baja resolución temporal que presenta el uso de imágenes satelitales, es posible complementar la información con un método de registro de temperatura por medio de estaciones fijas o móviles alrededor de las áreas de interés.

Esto permite contar con datos de serie de tiempo a un período horario, diario, mensual y anual, según el caso. Al usar este método, es necesario escoger de manera estratégica la ubicación de los colectores de datos. Lo anterior no solo ayuda a reducir la escala

de análisis a un mayor detalle, sino que también permite establecer el comportamiento térmico a nivel del hábitat humano con datos de fuente primaria (recolectados entre 1,5 – 2 m de altura sobre el nivel del suelo) (Oke, 2006b; Voogt, 2007).

Este método de recolección de datos se realizó en la ciudad de Esparza. Para este proceso se utilizaron nueve equipos HOBO MX2301 para recopilar datos de temperatura y humedad relativa, con el propósito de determinar las temperaturas superficiales durante el día y la noche.

Estos equipos son resistentes a la intemperie con sensores integrados de temperatura y humedad relativa. La descarga de los datos se realiza por medio de tecnología Bluetooth y ofrece mediciones de alta precisión con una incertidumbre de medición determinada por el fabricante en +/- 0,2 °C en temperatura y +/- 2,5% HR en humedad relativa.

En este estudio, se configuró la captura de datos en intervalos de cinco minutos, entre mayor sea la cantidad de días de recolección de los datos es mejor. Sin embargo, se debe estar pendiente de la recarga y cambio de la batería del equipo.

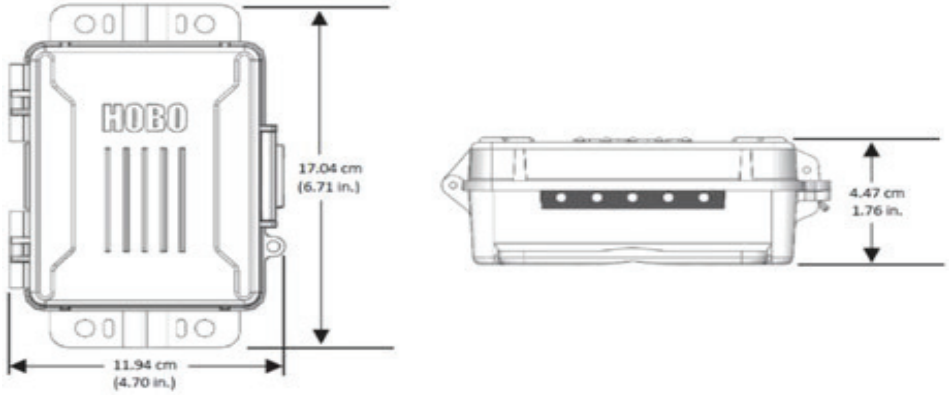
Los criterios para la colocación de los equipos fueron:

- Distribución en tipos de cobertura y superficies variadas.
- Altura sobre el nivel del suelo entre 1,4 a 3,4 metros.
- Los sitios deben estar alrededor del área urbana principal (que en el caso práctico fue la ciudad de Esparza).

Para la comprobación de la adecuada recolección de los datos, se coordinó con la Municipalidad de Esparza la colocación de los equipos. En conjunto se seleccionaron los sitios o edificios que pudieran garantizar el resguardo y la información de los dispositivos. En la Figura 21 se muestra el dispositivo recolector de datos HOBO MX2301.

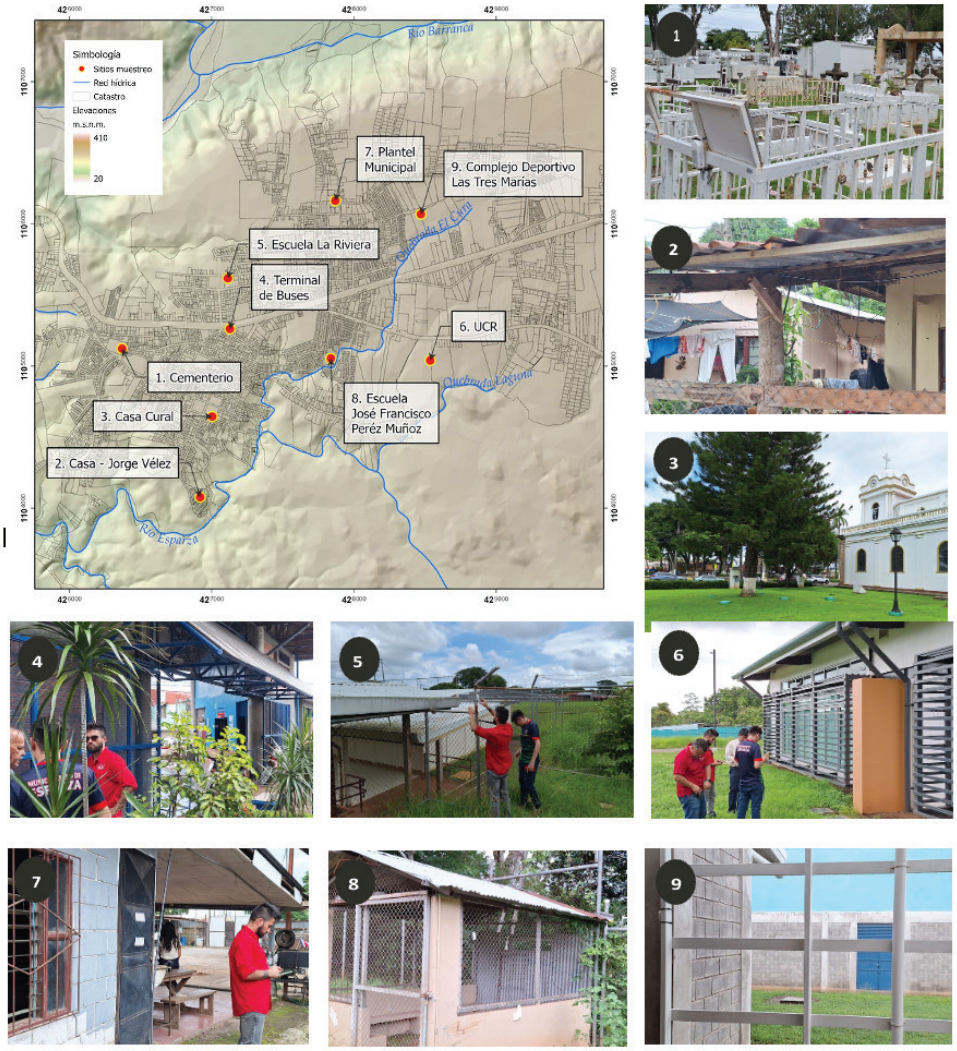
En la Figura 22 se muestra la ubicación de los recolectores en Esparza.

Figura 21. Recolector datos



Dataloger HOBO MX2301.

Figura 22. Esparza: ubicación de los dispositivos HOBO MX2301 para el registro de temperatura y humedad relativa



Una vez elegidos los puntos de muestreo y realizada la instalación de los dispositivos, se obtuvo un registro continuo de datos por 16 días, del 2 al 18 de julio de 2024.

Los dispositivos recolectaron datos en un intervalo definido a cada cinco minutos, por lo que posteriormente se establecieron las temperaturas horarias máximas por hora en las fases diurnas y nocturnas, con el fin de identificar la ICU durante estas franjas horarias.

Este aspecto es clave, ya que la principal limitación del método de estimación de la TST a partir de las imágenes satelitales, no es posible identificar la ICU durante la fase nocturna. Hasta la fecha no se cuenta con estudios que detallen las características nocturnas de la ICU en Costa Rica. Los resultados obtenidos de este método se pueden observar en la Tabla 12.

Tabla 12. Temperaturas diurnas y nocturnas máximas promediadas por dispositivo de registro

Sitio	Detalle	ID Dispositivo	Temperatura diurna media máxima [°C]	Temperatura nocturna media máxima [°C]
1	Cementerio	6749	33.22	24.90
2	Residencial Jorge Vélez	6751	32.49	25.89
3	Casa Cural	6750	30.71	25.24
4	Terminal de Buses	6752	30.83	26.47
5	Escuela La Riviera	6758	34.71	24.62
6	UCR	6755	30.92	25.23
7	Plantel Municipal	6754	32.42	25.49
8	Esc. José Francisco Pérez	6756	30.84	24.91
9	Complejo Deportivo	6757	30.96	25.41

En rojo se muestran los valores más elevados de todos los sitios de observación, con diferencias superiores al error instrumental de los dispositivos (0.2 °C). Estos sitios corresponden a la Estación de Buses de Transportes Unidos [Sitio 4] durante la noche y la Escuela de la Riviera [sitio 5] durante el día.

Si bien el periodo de muestreo fue corto y ocurrió en una época que no es la ideal para analizar las características de la mayor intensidad de la ICU, los resultados obtenidos son interesantes, especialmente porque corresponden a observaciones obtenidas durante la época lluviosa.

En esta temporada también se desconoce el comportamiento o patrón de la ICU, ya que la disponibilidad de imágenes es limitada por la nubosidad característica de la época.

En cada uno de los sitios de muestreo fue posible determinar la humedad relativa y la temperatura promedio tanto para la franja diurna como la nocturna. (Ver Figuras 23 y 24)

Figura 23. Ciudad de Esparza: serie de tiempo de temperatura y humedad relativa. Datalogger núm. 6749

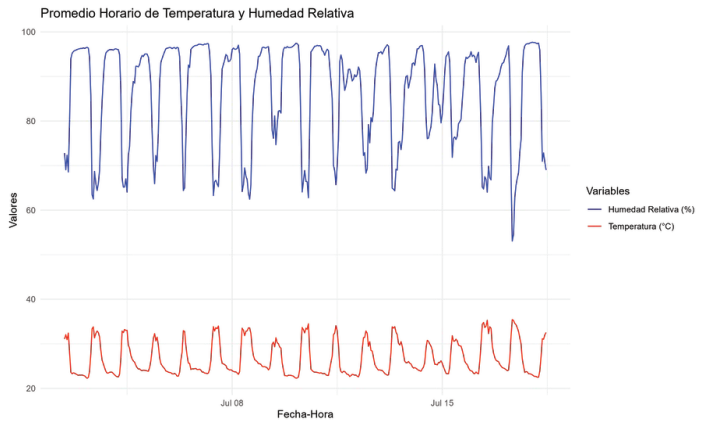
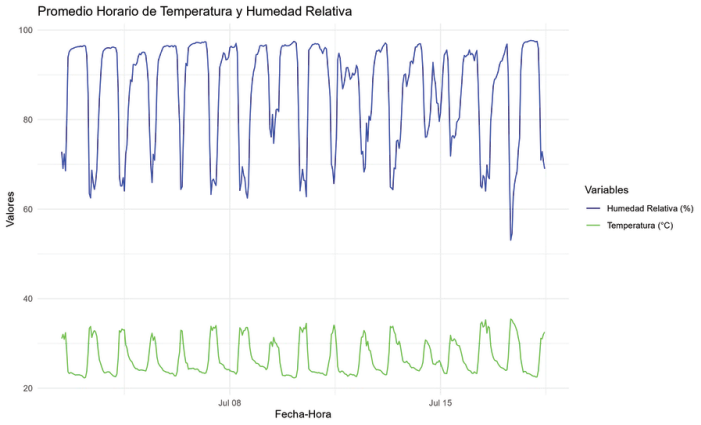


Figura 24. Ciudad de Esparza: serie de tiempo de temperatura y humedad relativa. Datalogger núm.6758



Se realiza una calibración de la altura de las estaciones fijas a 1,5 metros y de humedad relativa (%). A partir de estos datos se elabora por medio de una interpolación de ponderación por distancia inversa (IDW) para obtener los mapas de las Figuras 25 y 26.

La selección de este interpolador se debe principalmente a la cantidad limitada de sitios de muestreo –en este caso 9 sitios–, por lo que no es posible utilizar un interpolador geoestadístico más potente como el Kriging, el cual necesita entre 12 a 20 sitios de observación para obtener resultados robustos. En cuanto a las ventajas de un IDW, este es fácil de implementar e interpretar, aunque no es el más recomendado debido a su tendencia a suavizar los resultados. Los datos fueron procesados en el programa estadístico R.

Figura 25. Ciudad de Esparza: distribución térmica durante el día (15 días de observación)

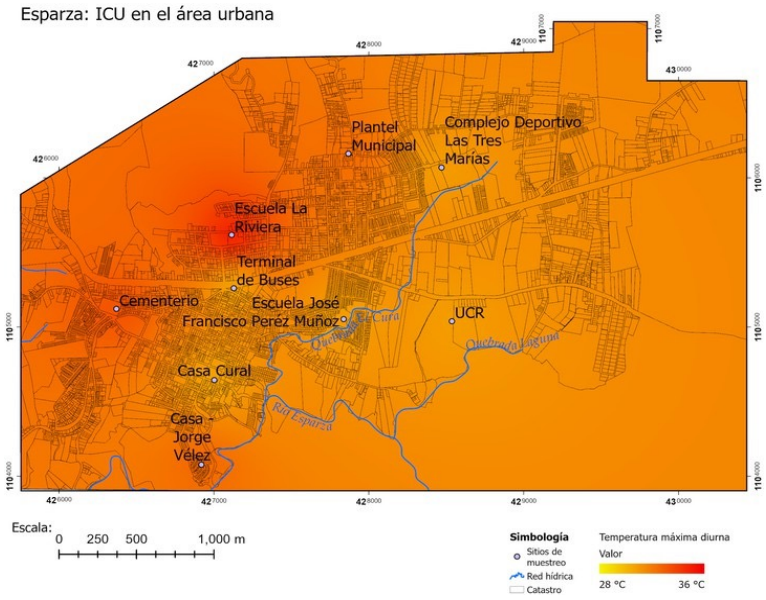
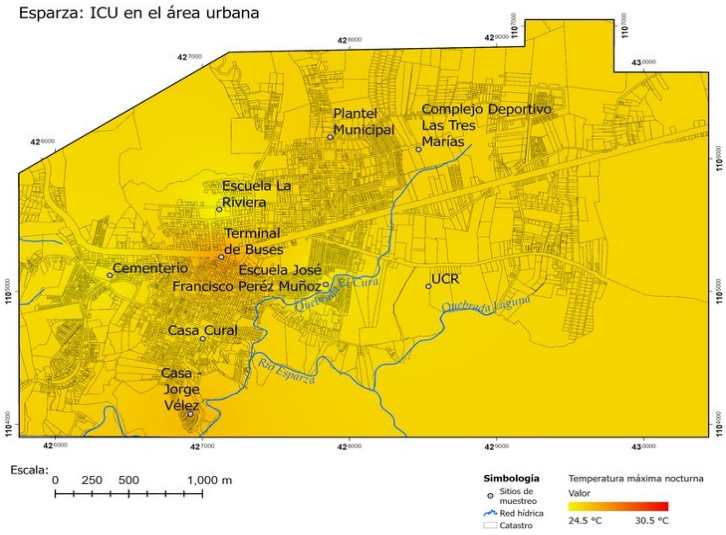


Figura 26. Ciudad de Esparza: distribución térmica durante la noche (15 días de observación)



7. Problemáticas y amenazas de las islas de calor urbano

Como ya se ha indicado, el fenómeno de la isla de calor urbana se caracteriza por un aumento significativo de la temperatura en las ciudades en comparación con sus alrededores rurales. Este incremento de temperatura no solo afecta el confort térmico de los habitantes urbanos, sino que también tiene implicaciones profundas en diversos aspectos de la vida urbana. Desde el aumento del consumo energético hasta la degradación de la calidad del aire, las ICU presentan una serie de problemáticas y amenazas que deben ser abordadas para mejorar la habitabilidad y sostenibilidad de nuestras ciudades.

Sobre las principales problemáticas y amenazas de las ICU, se pueden mencionar:

Aumento de la temperatura

- Las islas de calor urbanas pueden elevar las temperaturas locales entre 1 °C y 3 °C en comparación con las áreas rurales circundantes.

Consumo energético

- El incremento de la temperatura lleva a un mayor uso de aire acondicionado y sistemas de refrigeración, lo que aumenta el consumo energético y los costos asociados. Esto también puede sobrecargar las redes eléctricas, especialmente durante olas de calor.

Calidad del aire

- Las altas temperaturas pueden intensificar la formación de ozono a nivel del suelo y otros contaminantes atmosféricos, lo que deteriora la calidad del aire. Esto puede agravar problemas respiratorios y cardiovasculares en la población.

Salud pública

- Las islas de calor urbanas están asociadas con un aumento en la incidencia de enfermedades relacionadas con el calor, como golpes de calor y deshidratación. Las poblaciones vulnerables, como los ancianos y los niños, son especialmente susceptibles a estos efectos.

Cambio climático

- Las islas de calor urbano pueden exacerbar los efectos del cambio climático al aumentar las temperaturas locales y contribuir a un ciclo de retroalimentación positiva. Esto puede dificultar los esfuerzos para mitigar el cambio climático a nivel global.

Impacto en la biodiversidad

- Las altas temperaturas y la alteración del microclima urbano pueden afectar la flora y fauna local, lo cual reduce la biodiversidad en las áreas urbanas. Las especies que no pueden adaptarse a las nuevas condiciones pueden ser desplazadas o extinguidas.

Desigualdad social

- Las áreas más afectadas por las islas de calor urbanas suelen ser las comunidades de bajos ingresos, que tienen menos acceso a espacios verdes y recursos para mitigar el calor.

Infraestructura urbana

Las altas temperaturas pueden acelerar el deterioro de la infraestructura urbana. Esto también puede afectar la durabilidad de los materiales de construcción y la eficiencia energética de los edificios.

8. Estrategias de mitigación y adaptación en la planificación urbana

Los cambios de uso de la tierra tienen un impacto en el comportamiento térmico de la ciudad y sus inmediaciones.

Al cruzar los resultados de la TST con respecto a las coberturas de la tierra entre los años 2019 - 2024, se determinó que existen diferencias térmicas entre las diferentes categorías tanto en el estudio de caso en Esparza, como en el de Alajuela. Esta diferencia es aún más marcada si se toma de referencia la categoría urbana.

De este modo, los límites de confianza de las estimaciones estadísticas indicaron que las áreas urbanas son más cálidas que las otras coberturas para ambos casos. En consecuencia, es prudente proponer estrategias de mitigación y adaptación ante el efecto de la ICU, para que los gobiernos locales las consideren en sus políticas, reglamentos de Plan Regulador y acciones relacionadas con la planificación urbana.

En consecuencia, con los resultados obtenidos se propone las siguientes líneas de acción.

1. **Configuración y diseño urbano:** consiste en la disposición de la infraestructura y el patrón del diseño urbano que afecta la temperatura y el microclima entre las edificaciones. También tiene relación con el desarrollo vertical/horizontal, pues los edificios altos y estructuras continuas pueden bloquear el flujo del aire y el movimiento del viento, lo que contribuye en una área urbana más cálida. Es importante considerar la orientación de los edificios. A continuación, se propone las siguientes acciones.

- Incentivar la reconfiguración de las cuadras con aperturas diagonales arborizadas.
- Promover el uso de patios o jardines internos de las edificaciones y centros de cuadra.
- Estimular los diseños de los edificios en orientaciones y alturas que incentiven la ventilación y el enfriamiento natural mediante su diseño.
- Promover la conectividad de espacios públicos, a partir de una trama verde urbana.
- Aumentar la relación entre altura edificada y ancho de la vía, con el fin de propiciar la ventilación natural entre cuadras.
- Implementar bulevares y ciclovías arborizadas. Promover la construcción y remodelaciones de la infraestructura con diseños que consideren el confort bioclimático de sus usuarios.
- Recuperar los derechos de vía o ampliar el existente con el fin de promover la creación de antejardines en las aceras.
- Generar infraestructura en las vías cantonales para la movilidad sostenible y la intermodalidad, dentro de los cantones y entre cantones.

2. **Superficie urbana:** se ha demostrado que los materiales de la superficie urbana tienen una capacidad de absorción térmica relativamente alta durante el día y una capacidad muy lenta de disipar la energía durante la noche. Para ello, se propone. las siguientes acciones.

a) Infraestructura

- Promover el uso de materiales diversos y de baja reflectancia en los edificios.
- Utilizar cubiertas o pinturas de color claro o térmicas en el techado.
- Estimular la implementación de paredes verdes.
- Propiciar la implementación de techos de teja, techos verdes o recubiertos.

- Implementar y regular el uso de elementos y mobiliario urbano con materiales que no absorban ni generen incrementos térmicos.
- Establecer regulaciones para que las viviendas y edificios cuenten con aleros que generen sombra.
- Regular el tipo de portones que protegen las viviendas y edificios, pues deben permitir una ventilación natural de la infraestructura y el flujo de aire entre cuadras (ver Figura 27).

b) Red vial (Ver Figura 28)

- Sustituir el uso de asfalto en las vías por otro tipo de pavimentación que sea menos reflectante y más permeable, tales como el cemento que brilla en la oscuridad: elaborado con material ecológico y duradero que puede ser utilizado para construir carreteras más seguras. Carreteras solares: son vías con paneles de células fotovoltaicas en la parte superior que generan electricidad o energía alternativa. Hormigón reinventado: es una alternativa para reducir el calor urbano y la factura de la luz.
- Diseñar aceras con superficies permeables, como el adoquín permeable.
- Promover la arborización de una sección del derecho de vía. Esta iniciativa ya la está implementando la Municipalidad de Alajuela.

Figura 27. Ventilación dentro y entre edificios

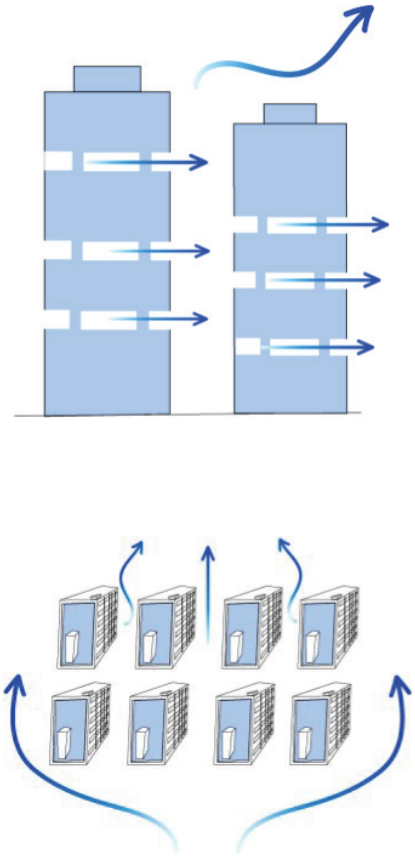
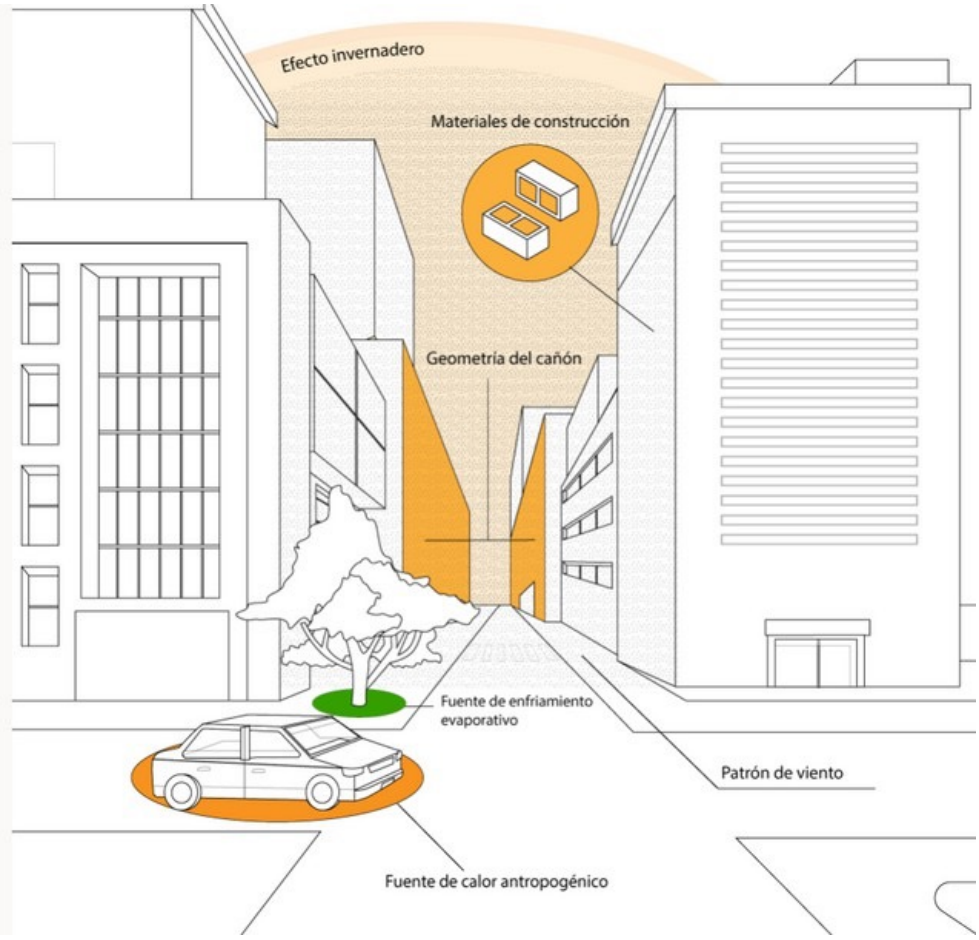


Figura 28. Intervenciones integrales para disminuir el efecto de la ICU



3. **Áreas verdes:** la cantidad, la calidad y la disposición espacial de las áreas verdes y la vegetación son factores que afectan la temperatura en la ciudad. Se ha determinado que la presencia de parques o áreas verdes de gran tamaño hace que los espacios sean 2 °C más fríos que las áreas urbanizadas. Incluso esta diferencia de temperatura puede alcanzar hasta 5 °C. La ausencia de vegetación en el área urbana disminuye procesos como la evapotranspiración, la sombra y los efectos de enfriamiento natural de las plantas, lo que contribuye al calentamiento de la ciudad y favorecen la formación de ICU. Para mitigar los efectos de las ICU, se propone las siguientes medidas:

- Aumentar la cantidad y calidad de zonas verdes en la ciudad.
- Incentivar en empresas y ciudadanos procesos de arborización controlados y gestionados con criterios científicos.
- Recuperación de áreas de protección de cauces de los ríos.
- Incentivar proyectos de recuperación y rehabilitación de espacios con potencial para la conectividad biológica.
- Garantizar el aprovisionamiento de áreas verdes con funcionalidad ecosistémica mediante la creación de corredores biológicos interurbanos.
- Incentivar el uso de superficies verdes en los diseños de construcción de los espacios públicos y recreativos.
- Implementar mecanismos de protección y mantenimiento de árboles en espacios públicos.

4. **Actividad humana:** acciones como la climatización artificial de vivienda y los edificios, el tráfico y los diferentes procesos productivos inciden en el aumento de la temperatura. El calor producido por estas acciones entra en el medioambiente de manera directa e indirecta y favorece la formación de islas de calor urbanas. Además, estas actividades también liberan calor y humedad que contaminan el aire y afectan la radiación entrante y saliente. Pare reducir la temperatura por la actividad huaman, se proponen las siguientes acciones:

- Evitar el uso de climatización artificial en viviendas, edificios y vehículos. Disminuir el consumo energético en actividades domésticas y productivas.
- Propiciar el uso de tecnologías limpias en los diferentes procesos de producción de bienes y servicios.
- Incentivar las certificaciones bioclimáticas en los desarrollos inmobiliarios.
- Fomentar el uso de medios de transporte alternativos (caminatas, bicicletas, patinetas, otros). Incentivar el uso de transporte público y la intermodalidad dentro del cantón como entre cantones. Fomentar los programas o talleres de sensibilización y educación climática.

9. Estrategias para el seguimiento, mantenimiento y monitoreo

El seguimiento, mantenimiento y monitoreo de las ICU son esenciales para mitigar sus efectos negativos y planificar ciudades más sostenibles. A continuación, se presenta algunas estrategias que pueden implementarse en estos procesos:

Monitoreo continuo con tecnología

- **Sensores fijos:** Instalar redes de sensores que registren datos en tiempo real sobre temperatura, humedad, calidad del aire y radiación solar. Estos sensores pueden estar ubicados en áreas urbanas críticas para detectar las ICU.
- **Imágenes satelitales:** Utilizar imágenes satelitales de alta resolución para analizar los cambios en la temperatura de la superficie. Algunas herramientas como Landsat y MODIS permiten observar tendencias a lo largo del tiempo.
- **Vehículos aéreos no tripulados (drones):** Pueden volar sobre áreas específicas para medir temperaturas y capturar imágenes térmicas, facilitando la identificación de las áreas más afectadas.

Uso de modelos climáticos urbanos

- **Simulación:** Implementar modelos de simulación para predecir cómo diferentes factores (como el aumento de vegetación, el uso de materiales reflectantes o cambios en la infraestructura) podrían reducir las ICU en zonas específicas.
- **Análisis predictivo:** Usar inteligencia artificial y aprendizaje automatizado para predecir el comportamiento futuro de las ICU en función de datos históricos y climáticos.

Integración de infraestructura verde (ver Figuras 29 y 30)

- **Mapeo de espacios verdes:** Crear un seguimiento detallado del crecimiento de árboles, parques y áreas verdes urbanas. Implementar programas de reforestación en áreas críticas para mejorar la absorción de calor.
- **Techos y fachadas verdes:** Promover la instalación de techos y fachadas verdes en edificios, haciendo un seguimiento de su impacto en la reducción de la temperatura en las zonas circundantes.

Políticas de planificación y control

- **Normativas de materiales:** Implementar políticas que incentiven el uso de materiales de construcción reflectantes y de alto albedo (como techos fríos) que disminuyan la absorción de calor en zonas urbanas.
- **Zonas de alta densidad:** Crear zonas urbanas de densidad controlada para evitar que la concentración de edificios incremente el efecto ICU. Establecer lineamientos para un diseño urbano más abierto y ventilado.
- **Gestión del tráfico vehicular:** Monitorear el flujo de vehículos en áreas urbanas para reducir la congestión y disminuir el calor generado por automóviles, incentivando el uso del transporte público.

Plataformas de participación ciudadana

- **Aplicaciones móviles:** Desarrollar plataformas donde los ciudadanos puedan reportar puntos críticos de calor, compartir información sobre los efectos de las ICU en sus comunidades y sugerir acciones correctivas.
- **Redes comunitarias:** Crear redes de voluntarios que monitoreen y reporten las condiciones ambientales de forma constante, colaborando con las autoridades locales.

Figura 29. Illustarción de efectos y mitigación del efecto de la ICU

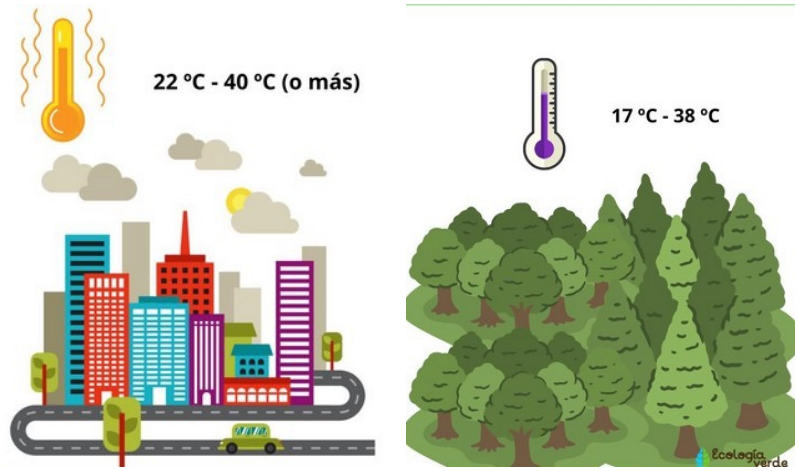


Figura 30. Beneficios de la infraestructura verde

Indicadores de desempeño y revisión

- **KPIs (Key Performance Indicators):** Definir indicadores clave de rendimiento para medir la efectividad de las estrategias de mitigación, como la reducción de la temperatura promedio o el aumento de áreas verdes.
- **Revisión periódica:** Establecer revisiones trimestrales o anuales para ajustar las políticas y acciones según los datos recolectados, optimizando los esfuerzos en áreas que muestren mayor vulnerabilidad.

Divulgación y concienciación

- **Educación comunitaria:** Impulsar campañas educativas que informen a los ciudadanos sobre las causas y efectos de las ICU y cómo pueden contribuir a su mitigación, como plantando árboles o usando energía eficiente.
- **Reportes públicos:** Publicar reportes de seguimiento y análisis de las ICU para mantener a la comunidad informada sobre los avances y desafíos en la lucha contra este fenómeno.

10. Retos y desafíos

El estudio de las ICU desde los gobiernos locales enfrenta diversos retos que pueden influir en la precisión y representatividad de los resultados. Entre estos, las limitantes metodológicas, tecnológicas y ambientales juegan un papel importante en la recolección y análisis de los datos. A continuación, se menciona las principales dificultades durante este estudio:

- Faltante de información actualizada del censo de población.
- Disponibilidad diaria de imágenes satelitales.
- Imágenes satelitales con nubosidad. Carencia de datos de flujo vehicular.
- Acceso a equipo de cómputo de alta gama.
- Acceso a recursos financieros para iniciar con los estudios técnicos.
- Carencia de profesionales especializados para la determinación de la ICU.
- Falta de sensibilización en el tema para la toma de decisiones políticas.
- Desconocimiento de los alcances de las problemáticas que generan los efectos de la ICU. No realizar una adecuada captura de datos.
- No capturar los datos durante el tiempo necesario para que sean representativos. No contar con estudios de la estructura urbana de la ciudad.
- No disponer de un plan de seguimiento y monitoreo.
- No aplicar acciones de adaptación y mitigación desde los reglamentos del plan regulador, visado de usos de suelo y permisos de construcción.

11. Glosario

Área urbana: Espacio geográfico caracterizado por una alta densidad de población y un elevado nivel de desarrollo de infraestructura, servicios y actividades económicas, en comparación con las áreas rurales. Las áreas urbanas incluyen ciudades, metrópolis y suburbios; son centros clave de actividad humana, comercio, cultura y tecnología.

Albedo: Cociente entre la radiación luminosa reflejada por una superficie y la que incide sobre la misma. Suele expresarse en porcentaje (%) y permite conocer la capacidad de una superficie para reflejar la radiación solar. Las superficies urbanas, como el asfalto, tienen un albedo bajo, lo que significa que absorben más calor, mientras que las superficies más claras o naturales tienden a reflejar la radiación solar.

Calma: Coloquialmente, ausencia de viento. En la escala anemométrica de Beaufort, recibe este nombre el viento cuya velocidad es inferior a un nudo. El origen etimológico de la palabra es del griego karma, que significa "calor sofocante".

Capa límite planetaria (CLP): Capa de aire en contacto con la superficie terrestre, sometida a su influencia y situada por debajo de la atmósfera libre. Su espesor es variable; en Costa Rica, Garbanzo- Salas & Hocking (2019) determinaron una altitud promedio de la CLP en un intervalo entre 2.34 km durante el mes de enero y 3.93 km durante el mes de agosto.

Capa límite urbana (urban boundary layer): Es la porción de la capa límite que se extiende desde los techos de los edificios hasta un nivel por debajo del cual las características meteorológicas están modificadas por la presencia de la ciudad en superficie.

Clima urbano: Características climáticas propias de las ciudades, particularmente en las grandes urbes, debido a la influencia que la urbanización y las actividades humanas ejercen sobre el medio atmosférico urbano, véase isla de calor.

Ciudad: En Costa Rica es el área urbana, donde se asentarán las autoridades políticas y administrativas más relevantes cuando se ha aprobado por ley la creación de un cantón. El título de ciudad se otorga únicamente a los centros administrativos de los cantones, entiéndase dónde se ubica el municipio.

Cubo de datos ráster (en inglés, raster data cube): Es una representación tridimensional (o de mayor dimensión) de datos ráster donde dos dimensiones corresponden a las coordenadas espaciales (X, Y) y la tercera dimensión representa el tiempo (T). Un cubo de datos puede tener múltiples capas ráster, cada una correspondiente a un instante temporal.

Datos geoespaciales: Información sobre la ubicación y las características de los elementos físicos en la tierra. En los estudios de ICU, los datos geoespaciales son esenciales para mapear las temperaturas y relacionarlas con las estructuras urbanas o actividades humanas.

ENOS (sigla en español El Niño – Oscilación del Sur): Es la oscilación bimodal a gran escala, cuya fase negativa o cálida es El Niño y la fase positiva o fría es "La Niña". También presenta una fase neutral. Los episodios de ENOS involucran variaciones de la temperatura del océano Pacífico central y oriental, junto con cambios en la presión atmosférica. El ENOS afecta el clima global, que incluye los patrones de precipitación, temperatura y ocurrencia de eventos extremos.

Evapotranspiración: Transferencia de vapor de agua a la atmósfera desde un suelo con vegetación, debida a la evaporación directa del agua presente en esa superficie, como la transpiración de las plantas. En áreas verdes, este proceso ayuda a enfriar el ambiente y mitigar el efecto de la ICU.

Geoprocesamiento: Conjunto de técnicas y herramientas para analizar y manipular datos geoespaciales. Es fundamental en el estudio de las ICU para evaluar la distribución espacial de las temperaturas y su relación con las características del entorno urbano.

Hito urbano: Elementos o estructura significativa dentro de la ciudad que sirven como punto de referencia o símbolo de alta tradición cultural. Los hitos juegan un papel fundamental en la identidad del espacio urbano, así como en la orientación y navegación de las personas. También son determinantes para la definición de barrios o zonas de patrimonio histórico. Un ejemplo de hito urbano en Costa Rica es el Teatro Nacional.

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés): Indicador que mide la presencia y estado de la vegetación en un área, basado en la cantidad de luz visible e infrarroja reflejada por las plantas. Es utilizado en el análisis de ICU para evaluar la relación entre la vegetación y las temperaturas superficiales.

Infraestructura verde: Elementos naturales o construidos que proporcionan servicios ecosistémicos en entornos urbanos, como parques, techos verdes, jardines y árboles, que ayudan a mitigar el efecto de la ICU al proporcionar sombra y aumentar la evapotranspiración.

Isla de calor urbana (ICU) (en inglés UHI): Efecto estudiado en la climatología urbana que describe el calentamiento al que se ve sometido el aire y la superficie de la ciudad.

Isla de calor urbano atmosférica: Efecto que describe el calentamiento al que se ve sometido el aire que cubre una ciudad. Los materiales refractarios de los que están constituidos las estructuras irradian una cantidad importante de energía infrarroja al ambiente urbano, calentando el aire. Por tanto, se enfoca en la medición de la temperatura del aire.

Isla de calor urbano superficial: Es el calentamiento en el que una zona urbana presenta temperaturas superficiales significativamente más altas que en sus alrededores suburbanos y rurales debido a las características de la superficie y a las actividades humanas. Su medición es a través de la radiación térmica emitida por las superficies.

Ola de calor: Evento climático caracterizado por un período prolongado de temperaturas anormalmente altas, que superan los valores climatológicos típicos de una región durante ese tiempo del año. Las olas de calor suelen durar varios días o semanas y pueden tener efectos significativos en la salud humana, los ecosistemas y las infraestructuras urbanas.

Percepción remota (Remote Sensing): Técnica que utiliza sensores colocados en satélites o aeronaves para recolectar información sobre la Tierra, incluyendo datos de temperatura superficial, lo cual es esencial para el mapeo y análisis de las islas de calor urbanas.

Planificación territorial: Proceso de organización y regulación del uso de la tierra urbano y los recursos naturales en un territorio, considerando su desarrollo económico, social y ambiental. En el contexto de la ICU, la planificación territorial debe integrar estrategias para reducir el efecto de las altas temperaturas urbanas.

Mitigación de la ICU: Estrategias y medidas implementadas para reducir el impacto de la isla de calor urbana. Estas pueden incluir la incorporación de infraestructura verde, la mejora del albedo de las superficies urbanas y la planificación urbana sostenible.

Radiación solar: Energía emitida por el Sol que llega a la Tierra.

Ráster: Es una representación matricial de datos espaciales, que organiza la información en una cuadrícula regular de celdas o píxeles. Cada celda de un ráster contiene un valor numérico que representa una característica o variable de interés, como la elevación, temperatura, precipitación, entre otros. Los rásteres se utilizan ampliamente en sistemas de información geográfica (SIG) para modelar fenómenos espaciales y efectuar análisis geoespaciales.

Sensor remoto: Dispositivo que se utiliza para detectar, medir y registrar información sobre un objeto o área sin necesidad de contacto físico directo. Los sensores remotos capturan datos mediante la emisión o detección de ondas electromagnéticas, como la luz visible, el infrarrojo o las microondas. Son comúnmente montados en satélites, aviones o drones para observar y analizar la superficie terrestre y la atmósfera.

Sistema de información geográfica (SIG): Conjunto de herramientas para la captura, almacenamiento, análisis y visualización de datos georreferenciados. Los SIG son fundamentales para el estudio y la representación espacial de las ICU, lo que facilita la planificación territorial.

Temperatura superficial terrestre (TST): Es la temperatura medida de forma directa o indirecta en la superficie terrestre o en estructuras como edificaciones y carreteras.

Unidad geoestadística mínima (UGM): Cobertura geográfica elaborada por el Instituto de Estadística y Censo de Costa Rica, que representa el territorio con la mayor desagregación del espacio geográfico para cada distrito del país, a la cual puede vincularse la información del censo de población. Están conformadas por el polígono que rodea una manzana o un área irregular que se delimita por los bordes laterales de la calzada (cordón de caño) de la red vial, o bien, de red fluvial como ríos y quebradas u otros elementos de infraestructura cultural. Por lo tanto, estas unidades responden a características espaciales identificables en el terreno, por lo cual no coinciden con los límites imaginarios existentes en la distribución territorial administrativa del país.

Urbanización: Proceso de expansión de las áreas urbanas y desarrollo de infraestructuras, que afecta el medioambiente local, el clima y las dinámicas de energía superficial, lo que contribuye al fenómeno de las islas de calor.

Variabilidad climática: Son las variaciones naturales que ocurren en el clima de una región durante períodos de tiempo que van desde meses hasta décadas, y que se manifiestan como desviaciones de las condiciones climáticas promedio. A diferencia del cambio climático, que implica tendencias a largo plazo, la variabilidad climática se concentra en los cambios a corto o mediano plazo debido a causas naturales.