

487500 -84°6'0" 492500 -84°3'0" 497500 -84°0'0" 502500

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

MAESTRÍA EN DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE

“Impacto de la morfología urbana y la trama verde en la temperatura de la microcuenca del río María Aguilar, Gran Área Metropolitana de Costa Rica”

1107500
10°0'0"
1102500
9°57'0"
1097500
9°54'0"
1092500
9°51'0"
1087500

1107500
10°0'0"
1102500
9°57'0"
1097500
9°54'0"
1092500
9°51'0"
1087500



**Proyecto Final de Graduación para optar por el título de:
Magister Scientiae (M.Sc.) en Diseño y Construcción Sostenible.**

Autor:

Juan Sebastián Vargas Montero

Director:

MDU. Arq. Carlos Ugalde Hernández

Cartago, Costa Rica, junio, 2024



487500 -84°6'0" 492500 -84°3'0" 497500 -84°0'0" 502500



Instituto Tecnológico de Costa Rica

Maestría en Diseño y Construcción Sostenible

Trabajo final de Graduación

Evaluación final

Datos Generales		
Estudiante:	Arq. Sebastián Vargas Montero	
Nombre del proyecto:	Impacto de la morfología urbana y la trama verde en la temperatura de la microcuenca del Río María Aguilar, Gran Área Metropolitana de Costa Rica	
Tutor	Arq. Carlos Ugalde Hernández, MDu.	
Lector 1	Arq. Alejandro Araya Escamilla, MSc.	
Lector 2	Arq. Laura Chaverri Flores, Mag.	
Coordinación / representante	Dra. Arq. Kenia García Baltodano	
Fecha:	18 de junio del 2024	
Instrucciones		
Asigne a cada criterio la puntuación obtenida en el instrumento de evaluación respectivo.		
Evaluación		
Criterios	Nota	%
Informe final		
Evaluación del Tutor	98.13	39.3
Evaluación lector 1	80	12.0
Evaluación Lector 2	89.37	13.4
Defensa pública		
Evaluación de la coordinación/representante	93.75	9.4
Evaluación lector 1	90	9.0
Evaluación Lector 2	92.5	9.3
NOTA		90.0

CARLOS MANUEL UGALDE HERNANDEZ (FIRMA)
 Firmado digitalmente por CARLOS MANUEL UGALDE HERNANDEZ (FIRMA)
 Fecha: 2024.06.19 18:29:57 -0600

Arq. Carlos Ugalde Hernández, MDu.

ALEJANDRO ARAYA ESCAMILLA (FIRMA)
 PERSONA FISICA, CPF-01-1194-0394.
 Fecha declarada: 19/06/2024 09:51:48 AM
 Esta es una representación gráfica únicamente, verifique la validez de la firma.

Arq. Alejandro Araya Escamilla, MSc.

JUAN SEBASTIAN VARGAS MONTERO (FIRMA)
 Firmado digitalmente por JUAN SEBASTIAN VARGAS MONTERO (FIRMA)
 Fecha: 2024.06.20 10:47:12 -0600

Arq. Sebastián Vargas Montero

KENIA GARCIA BALTODANO (FIRMA)
 Firmado digitalmente por KENIA GARCIA BALTODANO (FIRMA)
 Fecha: 2024.06.19 08:57:02 -0600

Dra. Arq. Kenia García Baltodano

LAURA CHAVERRI FLORES (FIRMA)
 PERSONA FISICA, CPF-01-1017-0618.
 Fecha declarada: 20/06/2024 10:10:17 AM
 Lugar: San José Contacto: lauchaverri@itcr.ac.cr

Arq. Laura Chaverri Flores, Mag.

“Impacto de la morfología urbana y la trama verde en la temperatura de la microcuena del río María Aguilar, Gran Área Metropolitana de Costa Rica”

Declaración de derechos de autor

De acuerdo con la ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683 el autor conserva el derecho moral y patrimonial sobre la obra, no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones, reproducciones u obras derivadas de la misma. Para cualquier adaptación, comunicación al público o modificación de la obra, se deberá contar con autorización expresa y por escrito del autor.

Licencia creative commons

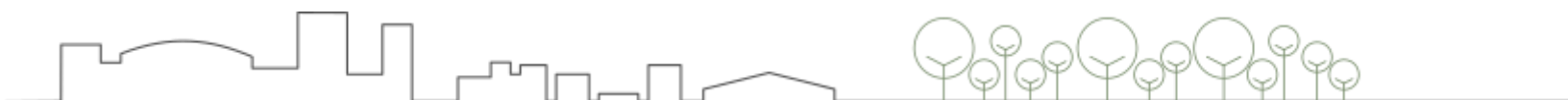
Impacto de la morfología urbana y la trama verde en la temperatura de la microcuena del río María Aguilar, Gran Área Metropolitana de Costa Rica © 2024 by Juan Sebastián Vargas Montero is licensed under Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Declaración de uso de herramientas de inteligencia artificial

Declaro que utilicé herramientas de inteligencia artificial para la elaboración del presente trabajo final de graduación. La herramienta utilizada fue: Chat GPT y se empleó en el desarrollo de las siguientes secciones:

- Abstract: como ayuda para la traducción.
- Resumen, planteamiento del problema, justificación y marco teórico: resumir texto propio.

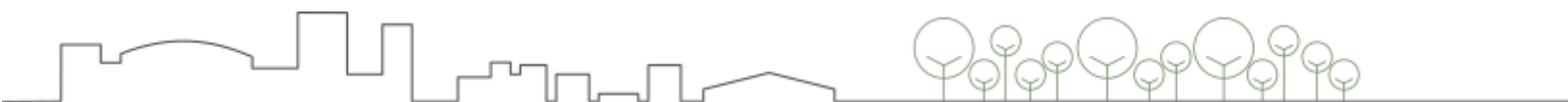


Dedicatoria

A mi esposa, a mi mamá y a toda mi familia,
por su apoyo incondicional.

En memoria de mi padre, Fabio Vargas Méndez, cuya
sabiduría y amor perdurarán siempre en mi corazón.

En memoria de Yu, cuyo espíritu vivirá por
siempre en nuestros recuerdos.



Agradecimientos

Esta tesis es el resultado de un arduo proceso de aprendizaje, dedicación y esfuerzo, en el que numerosas personas contribuyeron de manera invaluable para hacer posible esta investigación.

Agradezco al Tecnológico de Costa Rica y a la Maestría en Diseño y Construcción Sostenible por la formación entregada y el tiempo dedicado para hacernos mejores profesionales.

Al profesor tutor, MDU Arq. Carlos Ugalde Hernández, por su confianza, apoyo y acompañamiento a lo largo del proceso.

A la ingeniera Casia Soto Montoya. MSC, por su guía y orientación en sistemas de información geográfica (SIG) y teledetección, así como por su apoyo, paciencia y disposición para resolver cualquier desafío.

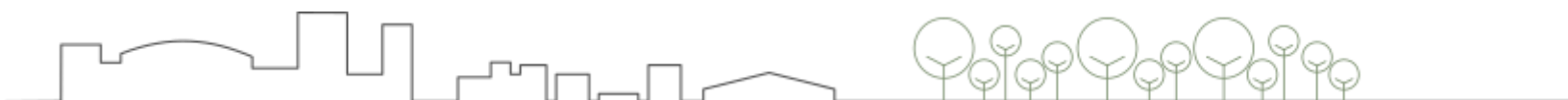
A los lectores, Mag. Laura Chaverri Flores y Arq. Alejandro Araya Escamilla. MSc, por sus valiosos aportes para el mejoramiento de esta investigación.

Al Dr. Arq. David Porras, por su orientación en la formulación de esta investigación.

Al Ing. Pedro Esteban Sandoval por su asesoramiento en estadística.

A todos los profesores de la maestría, por compartir sus conocimientos con nosotros.

Y en especial a mi familia, por estar ahí siempre. Sin ellos, este logro no habría sido posible.



Resumen

El calentamiento urbano y el cambio climático representan desafíos globales para las ciudades. La configuración de las urbes influye en su clima, exacerbando el fenómeno de la isla de calor urbana (ICU), especialmente en áreas densamente urbanizadas con escasa vegetación. Investigaciones previas en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica (GAM) han vinculado la falta de vegetación en entornos urbanos con un aumento en la temperatura de la superficie (LST, por las siglas en inglés para Land Surface Temperature). En esta investigación, se estudió el impacto de la morfología urbana y la trama verde en la temperatura de la microcuenca del Corredor Biológico Interurbano María Aguilar (CBIMA), un importante corredor biológico del GAM, que se caracteriza por su alta densidad de población y extensa urbanización, así como una alta fragmentación de las áreas verdes urbanas. Se emplearon sistemas de información geográfica y teledetección para evaluar el impacto de estos factores en la LST. Se identificaron distintos niveles de calentamiento urbano, destacando diferencias significativas entre áreas con vegetación y aquellas dominadas por infraestructura. Se seleccionaron zonas con diversos patrones de urbanización y se analizó su relación con la intensidad de la ICU mediante métricas del paisaje, revelando una correlación entre las características de las zonas estudiadas y la LST. Asimismo, se examinó el efecto de enfriamiento de diferentes espacios verdes urbanos del CBIMA, observando variaciones en la distancia e intensidad de enfriamiento según sus características. Estos hallazgos ofrecen una comprensión más profunda de cómo la configuración urbana afecta el calentamiento en el CBIMA, con implicaciones directas para la planificación urbana sostenible y resiliente.

Palabras clave: clima urbano, isla de calor urbana, infraestructura verde, ciudades sostenibles, sistemas de información geográfica, teledetección.



Abstract

Urban warming and climate change represent global challenges for cities. The configuration of urban areas influences their climate, exacerbating the urban heat island (UHI) phenomenon, particularly in densely urbanized areas with limited vegetation. Previous research in the Great Metropolitan Area of Costa Rica (GAM) has linked lack of vegetation in urban environments to an increase in land surface temperature (LST). This study examined urban morphology and vegetation cover within the María Aguilar river basin (CBIMA), a significant interurban biological corridor in the GAM characterized by high population density and extensive urbanization. Geographic information systems and remote sensing were employed to assess the impact of these factors on LST. Distinct levels of urban warming were identified, with significant differences noted between vegetated areas and those dominated by infrastructure. Areas with diverse urbanization patterns were selected and their relationship with UHI intensity was analyzed using landscape metrics, revealing a correlation between the characteristics of the study areas and LST. Additionally, the cooling effect of different urban green spaces within the CBIMA was examined, observing variations in cooling distance and intensity based on their attributes. These findings provide a deeper understanding of how urban configuration influences urban warming in the CBIMA, with direct implications for sustainable and resilient urban planning.

Keywords: urban climate, urban heat island, green infrastructure, sustainable cities, geographic information systems, remote sensing.



Tabla de contenido

Dedicatoria	4
Agradecimientos.....	5
Resumen.....	6
Abstract.....	7
Tabla de contenido	8
Abreviaturas	12
1. Introducción.....	13
2. Planteamiento del problema y delimitación del tema	14
3. Justificación.....	19
4. Objetivos.....	22
Objetivo General.....	22
Objetivos específicos	22
5. Alcance y limitaciones.....	22
5.1. Alcance	22
5.2. Limitaciones.....	24
6. Marco teórico.....	25
6.1. Gran Área Metropolitana:.....	25
6.2. Plan de Desarrollo Urbano para la Gran Área Metropolitana (Plan GAM 2013):	27
6.3. Corredor Biológico Interurbano María Aguilar (CBIMA):.....	29
6.4. Ciudad y clima urbano:	31
6.5. Isla de calor urbana:.....	34
6.6. Espacios verdes y planificación urbana resiliente	36
Trama verde.....	36
Infraestructura verde	36
Infraestructura azul.....	38



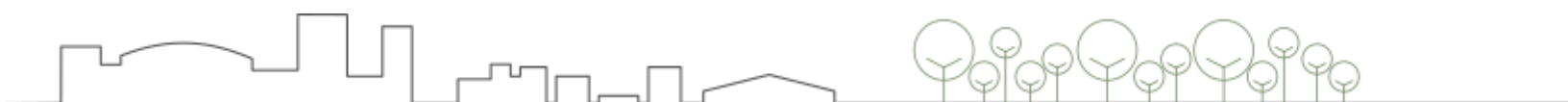
Infraestructura verde-azul.....	38
Espacios verdes urbanos y servicios ecosistémicos:.....	39
Efecto de enfriamiento de los espacios verdes urbanos	40
Extensión e intensidad de enfriamiento de los espacios verdes	41
6.7. Morfología urbana y métricas del paisaje:.....	42
7. Marco metodológico	44
7.1. Área de estudio.....	44
7.1.1. Caracterización biofísica de la microcuenca del río María Aguilar.....	44
7.1.2. Descripción del desarrollo urbano dentro de la microcuenca	45
7.2. Identificación del calentamiento urbano y los patrones de cobertura.....	46
7.2.1. Estimación de la temperatura de la superficie del CBIMA (marzo 2023).....	46
7.2.2. Actualización de capa de cobertura del CBIMA (marzo 2023).....	48
7.2.3 Zonificación de la microcuenca según elevación	50
7.2.4. Selección de la muestra	51
7.2.5. Análisis estadístico	53
7.3. Análisis de la morfología urbana utilizando métricas del paisaje	54
7.3.1. Cálculo de métricas del paisaje	54
7.3.2. Análisis estadístico de las métricas del paisaje.....	57
7.3.3. Selección de zonas con infraestructura a escala local	57
7.3.4. Métricas del paisaje para zonas locales seleccionadas	57
7.3.5. Análisis descriptivo de las zonas locales seleccionadas	58
7.4. Estimación del efecto de enfriamiento de los espacios verdes.....	58



7.4.1. Selección de los espacios verdes urbanos	58
7.4.2. Cálculo de temperatura promedio de la zona circundante	58
7.4.3. Generación de anillos cada 30 metros.....	59
7.4.4. Cálculo de intensidad de enfriamiento por anillo	59
7.4.5. Estimación de intensidad y extensión máxima de enfriamiento	60
7.4.6. Análisis del efecto de enfriamiento de los espacios verdes.....	60
7.5. Estrategia de socialización y divulgación de los resultados de la investigación ...	60
8. Resultados.....	61
8.1. Calentamiento urbano y patrones de cobertura.....	61
8.1.1. Temperatura de la superficie.....	61
8.1.2. Cobertura y uso del suelo	64
8.1.3. Zonas según elevación (m.s.n.m.).....	65
8.1.4. Análisis estadístico de LST y coberturas por bloques de elevación	66
8.2. Islas de calor, morfología urbana y métricas del paisaje	71
8.2.1. Métricas e indicadores influyentes en la temperatura de la microcuena	71
8.2.2. Impacto de la proporción de infraestructura en el calentamiento urbano	72
8.2.3. Zonas locales y calentamiento urbano.....	74
8.3. Efecto de enfriamiento de los espacios verdes	80
8.3.1. Espacios verdes con mayor intensidad de enfriamiento	82
8.3.2. Espacios verdes con mayor extensión de enfriamiento	88
8.3.3. Espacios verdes con menor intensidad y extensión de enfriamiento	92
8.3.4. Relación de la intensidad de enfriamiento y el tamaño del espacio verde.....	98



8.3.5. Relación de intensidad de enfriamiento y cobertura del espacio verde.....	98
8.4. Recomendaciones de diseño resiliente.....	102
8.4.1. Promoción y conservación de bosques y áreas naturales.....	102
8.4.2. Integración de áreas verdes urbanas.....	104
8.4.4. Visión integral de territorio.	108
9. Conclusiones y recomendaciones	109
Referencias	112
Índice de Cuadros	120
Índice de Figuras.....	120
Apéndice A. Modelo cartográfico Objetivo 1 (Selección de muestra).....	123
Apéndice B. Modelo cartográfico Efecto de enfriamiento Espacios Verdes	124
Apéndice C. Ubicación y características de zonas locales estudiadas	125
Apéndice D. Curvas de enfriamiento	128
Apéndice E. Estrategia de socialización y divulgación de los resultados	131



Abreviaturas

ANOVA: Análisis de la varianza.

CBI: Corredor Biológico Interurbano.

CBIMA: Corredor Biológico Interurbano María Aguilar.

CFIA: Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos.

DEM: Modelo de elevación digital (Digital Elevation Model).

DIV_SI: Índice de diversidad de Simpson.

GAM: Gran Área Metropolitana de Costa Rica.

GEE: Google Earth Engine.

ICU: Isla de calor urbana.

IGN: Instituto Geográfico Nacional.

INVU: Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo.

LD_B: Fragmentación de bosques y áreas naturales.

LD_G: Fragmentación de infraestructura.

LP_B: Proporción de bosques y áreas naturales.

LP_G: Proporción de infraestructura.

LST: Temperatura de la superficie (Land Surface Temperature).

MINAE: Ministerio de Ambiente y Energía.

MIVAH: Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos.

NDBI: Índice de Diferencia Normalizada Edificada (Normalized Difference Built-up Index).

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index).

OMS: Organización Mundial de la Salud.

SIG: Sistemas de información geográfica.

SINAC: Sistema Nacional de Áreas de Conservación.

SNIT: Sistema Nacional de Información Territorial.

TEC: Tecnológico de Costa Rica.

TEVU: Proyecto Transición hacia una Economía Verde Urbana.

▲ ICU: Intensidad de isla de calor urbana.

▲ T: Intensidad de enfriamiento.



1. Introducción

La forma en que se diseñan y construyen las ciudades juega un papel crucial en la configuración del clima urbano, donde la densidad poblacional, la impermeabilidad de las superficies y la falta de vegetación son solo algunos factores que pueden intensificar el fenómeno conocido como isla de calor urbana (ICU), afectando el confort y la calidad de vida de las personas.

En Costa Rica, particularmente en el Gran Área Metropolitana (GAM), el crecimiento urbano ha sido marcado por un desarrollo desordenado y una planificación insuficiente, donde la expansión urbana ha sido impulsada principalmente por el mercado inmobiliario, debido a la debilidad en la implementación de políticas locales y regionales (Estado de la Nación, 2015). Estudios realizados en el GAM han revelado una relación importante entre la escasez de áreas verdes y el aumento de la temperatura superficial en zonas urbanas (Barrantes Sotela, 2020; MINAE-SINAC-GIZ, 2021a; Municipalidad de Curridabat, 2019). La microcuenca del río María Aguilar presenta una alta densidad poblacional y una predominancia de áreas urbanizadas, especialmente en el sector oeste, donde la vegetación es escasa y fragmentada (MINAE-SINAC-PNUD, 2020).

Es en este contexto que surge la presente investigación, con el objetivo de explorar la relación entre la morfología urbana y la temperatura en la microcuenca del río María Aguilar. Utilizando herramientas como los sistemas de información geográfica y la teledetección, este estudio analiza cómo los patrones urbanos y la presencia de áreas verdes influyen en las temperaturas locales, con miras a promover un diseño urbano más sostenible y resiliente.

Este proyecto se destaca por abordar un problema global, enfocándose en un contexto específico. Además, tiene gran relevancia social, al generar recomendaciones útiles para la creación de ciudades sostenibles, habitables y resilientes, beneficiando a la población del GAM. Técnicamente, aporta una metodología replicable para abordar el estudio de la morfología



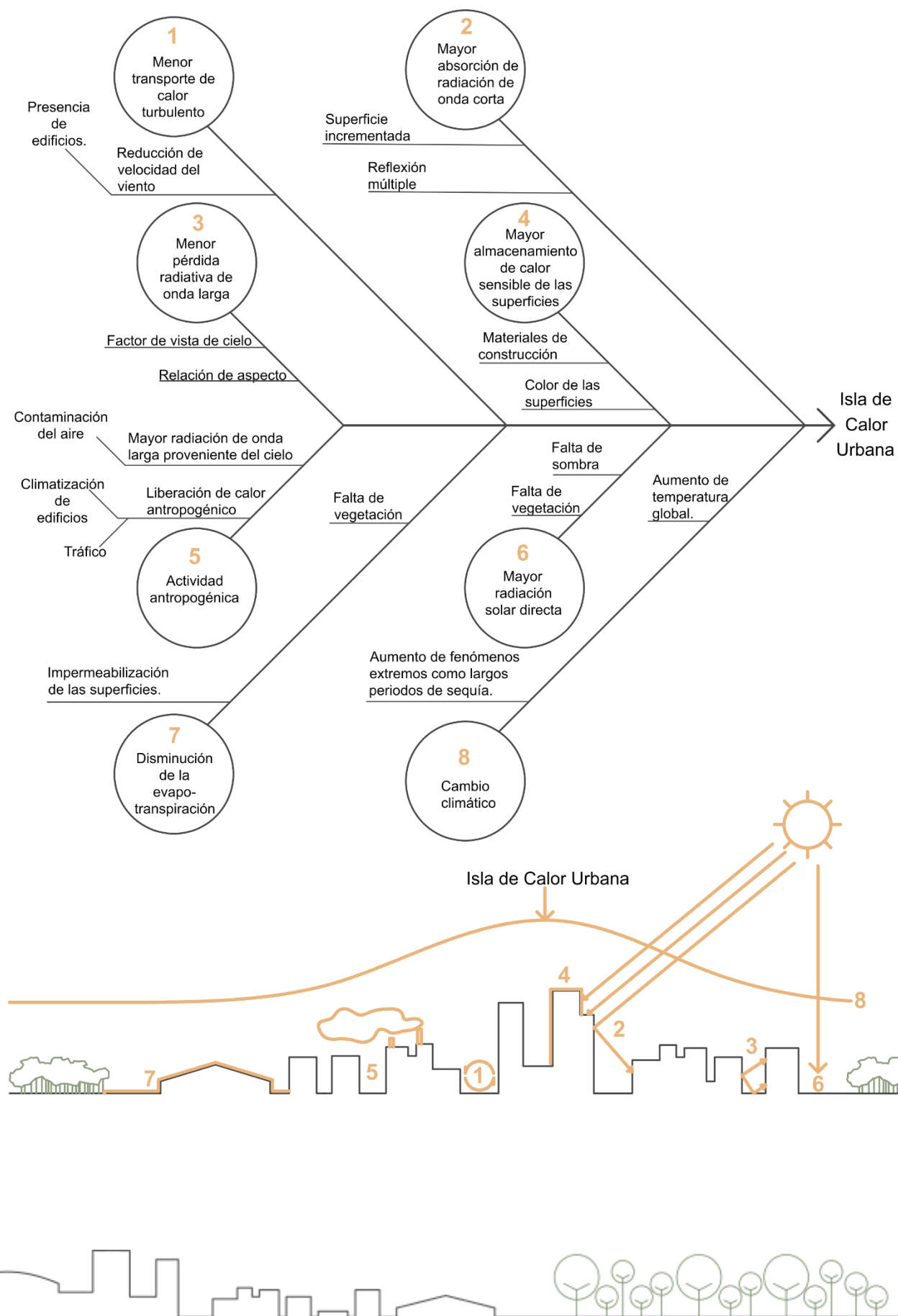
urbana y su influencia en el clima de las ciudades, siendo un valioso recurso para la planificación urbana sostenible, contribuyendo a una mejor adaptación de las ciudades al calentamiento urbano y al cambio climático.

2. Planteamiento del problema y delimitación del tema

La urbanización ha transformado significativamente el entorno de las ciudades, generando cambios importantes en el paisaje debido al aumento en la infraestructura, la consiguiente impermeabilización de las superficies y la reducción de áreas verdes. Esto ha contribuido al fenómeno conocido como la isla de calor urbana (ICU). Sumado a esto, el cambio climático está intensificando la frecuencia e impacto de eventos climáticos extremos, lo que agrava aún más los efectos de la ICU. Este aumento en la temperatura urbana conlleva un mayor consumo de energía y agua, un aumento en las emisiones de dióxido de carbono, un aumento del estrés por calor y una disminución en la calidad del aire; todo esto afectando la sostenibilidad de las áreas urbanas, la salud y el bienestar de sus habitantes (Yu et al., 2020). Considerando lo anterior, se plantea la necesidad urgente de abordar la mitigación del calentamiento urbano y sus consecuencias negativas, especialmente en un contexto de crecimiento urbano continuo y cambio climático antropogénico (Wong et al., 2021). De acuerdo con Wong et al. (2021), el fenómeno de la ICU surge a través de cambios en los flujos de energía asociados con el cambio en el uso del suelo, en donde se experimenta un aumento en la absorción de radiación solar, el calor sensible y la retención de calor, así como una reducción en la evapotranspiración, junto con un aumento en el calor antropogénico proveniente de edificios y vehículos. Estos factores que mencionan los autores, junto con el cambio climático, pueden considerarse causas del incremento en la intensidad de ICU a nivel mundial (Figura 1).



Figura 1. Diagrama de causa y efecto del fenómeno de ICU

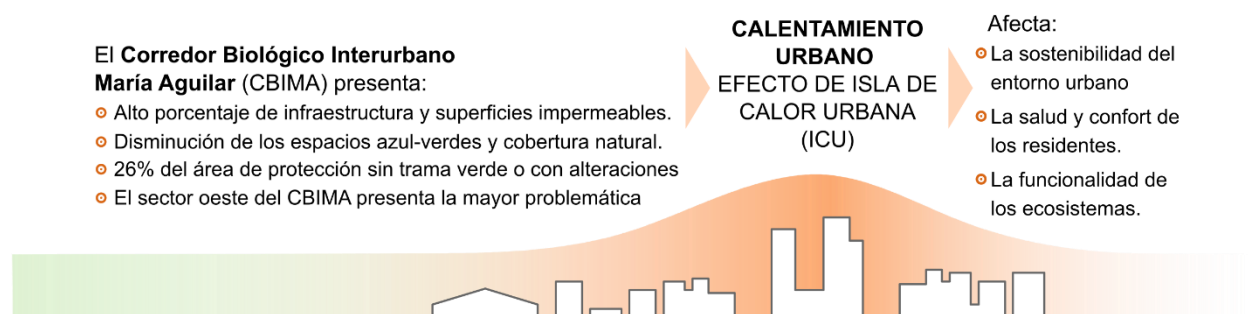


Costa Rica, al igual que otras partes del mundo, también se enfrenta a los efectos del cambio climático. En el GAM, el desarrollo urbano de muchos sectores se ha caracterizado por una falta de planificación, lo que ha llevado a la eliminación de gran parte de la cobertura natural, causando un deterioro ambiental significativo y la pérdida de funcionalidad de los ecosistemas (MINAE-GEF-PNUD, 2021). Este desarrollo también influye en el clima local y la calidad de vida, afectando negativamente a la población y la sostenibilidad del entorno urbano. Estudios realizados en el GAM han revelado una relación entre la falta de áreas verdes urbanas y el aumento de las temperaturas locales (Barrantes Sotela, 2020; Municipalidad de Curridabat, 2019). El Atlas de Servicios Ecosistémicos Urbanos ha examinado la Isla de Calor en el GAM, vinculando el porcentaje de áreas verdes urbanas con las temperaturas promedio por distrito (MINAE-SINAC-GIZ, 2021a).

Dentro del GAM, el Corredor Biológico Interurbano María Aguilar (CBIMA) se enfrenta a desafíos similares (Figura 2). Aunado a la alta densidad de población, se presenta una carencia en la cantidad y calidad de áreas verdes recomendadas para una vida saludable, según las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Datos del Sistema de Monitoreo del Cambio de Uso y Cobertura de la Tierra en Paisajes Productivos (MOCUPP) indican que, para el año 2021, en el cantón de San José, los distritos de San Francisco de Dos Ríos, Hatillo, Pavas y San Sebastián disponían de menos de 9 m² de áreas verdes por habitante, las cuales no estaban distribuidas de manera uniforme, a menudo a más de 300 metros de distancia o a más de 10 minutos a pie. Además, un 20,40% del área de protección del río carecía completamente de áreas verdes, y otro 5,64% mostraba alteraciones en la cobertura verde, contraviniendo lo establecido en la Ley Forestal N°7575 (MINAE-GEF-PNUD, 2021).



Figura 2. Factores que influyen en el calentamiento urbano de CBIMA



Elaborado con datos de MINAE-GEF-PNUD (2021) y MINAE-SINAC-GIZ (2021a)

Dado el contexto descrito, se planteó la siguiente pregunta de investigación:

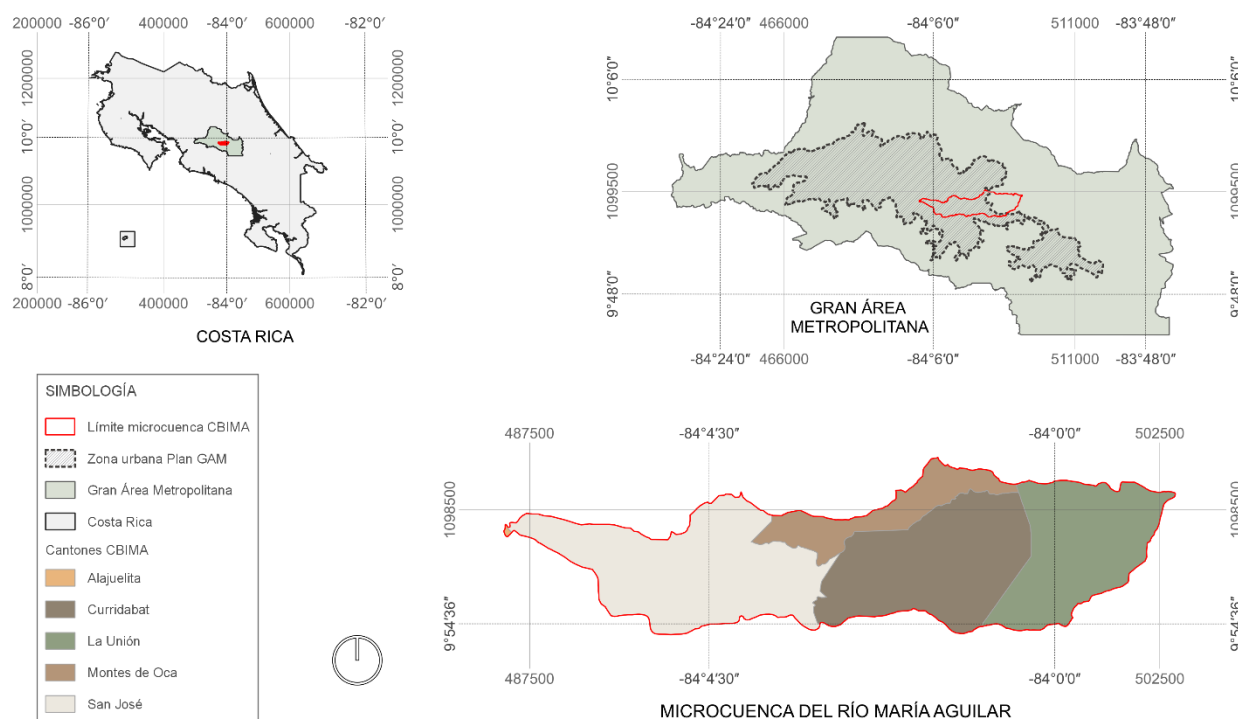
¿Cuál es el impacto de la morfología urbana y la cobertura verde en la temperatura de la microcuenca del río María Aguilar?

Además, se plantearon otras interrogantes derivadas como:

¿Cuáles zonas dentro de la microcuenca experimentan mayores niveles de calentamiento debido al fenómeno de ICU y cuáles presentan menores temperaturas? ¿Existe una relación significativa entre las características urbanas y su temperatura? ¿Cómo podrían mejorarse las condiciones urbanas en la microcuenca para mitigar el calentamiento y adaptarse al cambio climático?

Partiendo de estas interrogantes, en el presente estudio se investigó cómo la morfología urbana y los diferentes tipos de cobertura verde inciden en la temperatura de la microcuenca del río María Aguilar. Esta microcuenca, según MINAE-GEF-PNUD (2020), presenta una extensión de 3876,63 ha, equivalente al 2% del GAM e incluye 5 cantones (Figura 3 y Figura 4). El sector oeste del CBIMA, que comprende la parte baja de la microcuenca, se considera crítico debido a su alta concentración de infraestructura y a la escasez de áreas verdes (MINAE-GEF-PNUD, 2021).

Figura 3. Mapa de ubicación de la microcuenca del Río María Aguilar

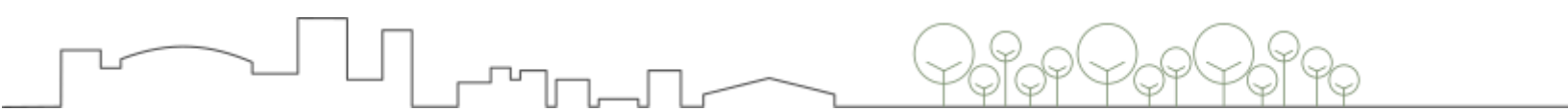


Elaborado con datos obtenidos de SNIT y MOCUPP.

Figura 4. Microcuenca del Corredor Biológico Interurbano María Aguilar



Elaborado con datos obtenidos de SNIT, OSM y MOCUPP.



3. Justificación

En la actualidad, los esfuerzos de planificación urbana a nivel global están centrados en la creación de ciudades sostenibles, resilientes y saludables. Esto se debe principalmente al aumento de la población en áreas urbanas y al incremento de eventos climáticos extremos, que hacen que estos objetivos adquieran importancia en todo el mundo (Kirschner et al., 2023).

Un factor crucial que influye en el clima local de las ciudades es su morfología urbana, abarcando aspectos como la densidad de los edificios, la impermeabilidad de las superficies y la alteración de la vegetación original, los cuales pueden contribuir al fenómeno conocido como isla de calor urbana (ICU). De acuerdo con Das et al. (2024), comprender el impacto de la configuración y composición del paisaje en la temperatura de la superficie (LST) es esencial para las estrategias de planificación sensible al clima en las ciudades. Además, según Parvar, et al. (2024), estudiar la relación de la LST con la composición y configuración del paisaje urbano puede proporcionar una comprensión más completa de los patrones térmicos urbanos.

A partir de los avances en los estudios de clima urbano, utilizando teledetección y sensores remotos, se ha podido identificar el potencial que tienen los espacios verdes urbanos para mitigar el efecto de la ICU y generar un efecto refrescante en las ciudades. Según Wong et al. (2021), la infraestructura verde no solo es una estrategia efectiva para combatir el calor urbano, sino que también proporciona servicios ecosistémicos y otros beneficios, como la captura de carbono, la mejora de la calidad del aire y el fomento de la biodiversidad.

Sin embargo, en Costa Rica, hay pocas investigaciones que abordan el estudio de la ICU en las áreas urbanas, sin profundizar en la influencia que tienen los factores de diseño urbano y los patrones de distribución de los espacios verdes en el clima local.

La relevancia de abordar este tema se destaca en el contexto de la Nueva Agenda Urbana y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, 2020; Onu-Habitat, 2016), pudiéndose señalar el aporte que esta investigación brinda en cuanto al ODS 11, que se enfoca en



ciudades y comunidades sostenibles; el ODS 13, que trata sobre acción climática; el ODS 15, que se centra en la vida en ecosistemas terrestres y también el ODS 3, al influir en el confort, bienestar y salud de los ciudadanos, a través de la mitigación del efecto de isla de calor urbano.

Además, esta investigación se alinea con los esfuerzos de diferentes grupos y organizaciones en el país, que procuran, por medio de iniciativas como el Proyecto Paisajes Productivos, el Proyecto INTERLACE y el Proyecto TEVU, promover ciudades más sostenibles y resilientes al cambio climático. El Proyecto Paisajes Productivos, en conjunto con el CENIGA y el Comité Local del CBIMA, desarrolló la herramienta MOCUPP Urbano, la cual mide la extensión de la trama verde de manera bianual y evalúa los cambios de cobertura, por medio de imágenes satelitales y técnicas de teledetección (MINAE-SINAC-PNUD, 2020), generando capas de cobertura de trama verde y otros usos para el CBIMA, las cuales servirán de insumos y base para el desarrollo de la presente investigación. También es importante hacer referencia al proyecto Transición hacia una Economía Verde Urbana (TEVU), el cual se enfoca en 20 cantones del Gran Área Metropolitana, incluyendo al CBIMA, procurando transformar las ciudades en lugares habitables y seguros para la ciudadanía (TEVU, s.f.). Por último, se destaca el Proyecto INTERLACE, un proyecto internacional que inició en setiembre del 2020 y se desarrollará hasta agosto del 2024; el cual “plantea una ejecución multisectorial, multinivel e intermunicipal para la creación y restauración de zonas verdes en el CBIMA” (PNUD, 2021).

Por otro lado, el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) y el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) respaldan la implementación de Corredores Biológicos Interurbanos (CBI), los cuales fomentan la conectividad entre paisajes, ecosistemas, hábitats, microcuencas y áreas verdes urbanas, beneficiando a los habitantes y contribuyendo a la conservación de la biodiversidad (MINAE-SINAC-PNUD, 2020). Adicionalmente, esta investigación busca enviar un mensaje y promover, por medio de la reflexión, cambios en el ordenamiento territorial y la planificación urbana, procurando un cambio de modelo y futuras modificaciones en la normativa, en donde el involucramiento e integración de instituciones



como el INVU, el MIVAH, el CFIA y las municipalidades es fundamental en el proceso de transformación urbana, hacia ciudades más sostenibles y resilientes al cambio climático.

Considerando estos antecedentes, en el contexto actual de planificación urbana global orientada hacia la sostenibilidad y resiliencia, se evidencia la importancia de estudiar el calentamiento urbano y mitigar sus efectos mediante la implementación de infraestructura verde. En Costa Rica, la investigación en este campo es limitada, lo que subraya la relevancia de este estudio para mejorar la sostenibilidad y resiliencia de los entornos urbanos y contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con ciudades sostenibles, acción climática, vida de ecosistemas terrestres y bienestar ciudadano. Esta investigación también complementa iniciativas nacionales e internacionales que promueven la sostenibilidad urbana, como los proyectos Paisajes Productivos, INTERLACE y TEVU, pudiendo aprovechar los insumos generados por estos proyectos. Esto refuerza la importancia y aplicabilidad práctica de la presente investigación en el GAM y otros CBI, siendo su metodología replicable en diversos contextos.

Esta investigación permite comprender mejor cómo la morfología urbana y la presencia de espacios verdes influyen en la temperatura de la microcuenca del río María Aguilar. A partir de esta comprensión, es posible ofrecer recomendaciones de diseño resiliente y sostenible que pueden ayudar a mitigar el efecto de la isla de calor urbano (ICU) dentro de la zona de estudio, lo cual es de gran importancia en el contexto del cambio climático y puede tener un impacto positivo en la población del GAM. Los resultados obtenidos, así como los generados a partir de estudios similares basados en esta metodología, pueden ser utilizados tanto por instituciones como por gobiernos locales para desarrollar políticas y lineamientos orientados hacia una planificación urbana y un ordenamiento territorial sostenibles y resilientes. Además, la implementación y repetición de este tipo de estudios puede ayudar a monitorear cómo el calentamiento urbano evoluciona con el tiempo, así como a validar la efectividad de las políticas y lineamientos implementados por las instituciones o gobiernos locales.



4. Objetivos

Objetivo General

Evaluar el impacto de la morfología urbana y la trama verde en la temperatura de la superficie, mediante el uso de sistemas de información geográfica y teledetección, como factor determinante para el diseño sostenible y resiliente en la microcuenca del río María Aguilar.

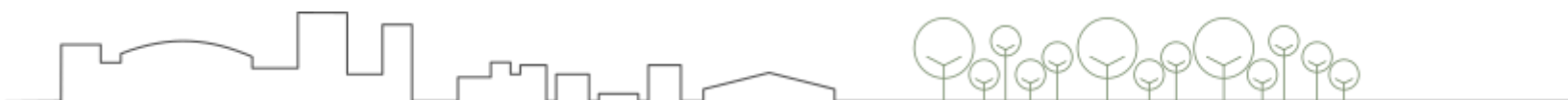
Objetivos específicos

1. Identificar los diferentes niveles de calentamiento urbano y su relación con los tipos de cobertura verde e infraestructura dentro de la microcuenca del Río María Aguilar.
2. Analizar la relación de la morfología urbana y la temperatura de la superficie, mediante el estudio de las métricas del paisaje dentro de la microcuenca.
3. Estimar el efecto de enfriamiento de espacios verdes, como herramienta para la mitigación del calentamiento urbano dentro de la microcuenca.
4. Establecer recomendaciones de diseño resiliente para la mitigación del calentamiento urbano dentro de la microcuenca.

5. Alcance y limitaciones

5.1. Alcance

El propósito de esta investigación fue evaluar la influencia de la morfología urbana y la trama verde en la temperatura local, como factor clave para el diseño sostenible y resiliente en la microcuenca del río María Aguilar. Para lograrlo, se planteó un enfoque metodológico mixto, que implicó el análisis de variables cuantitativas, como la temperatura, en función de variables cualitativas que describen las características de la trama verde, morfología y el paisaje urbano.

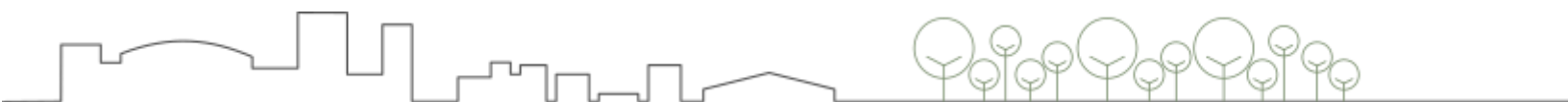


Esta investigación tiene un alcance correlacional, donde se buscó establecer una relación entre las variables estudiadas. Se siguió un enfoque hipotético-deductivo, donde a partir de conocimiento teórico previo, se plantearon las siguientes hipótesis:

1. *La LST de la infraestructura y la LST de los diferentes tipos de trama verde difieren significativamente.* En este caso, para el análisis estadístico, se utilizó la LST como variable cuantitativa y como variables cualitativas se establecieron las macroclases relacionadas con la infraestructura y la trama verde.
2. *Existe una relación entre los patrones del paisaje urbano y la intensidad de isla de calor superficial.* En este caso, para el análisis de regresión, se estableció la LST como variable dependiente y se seleccionaron las métricas del paisaje más influyentes para determinar la variable predictora del modelo.
3. *Existe relación entre el tamaño y el tipo de cobertura de las áreas verdes y su capacidad de enfriamiento.* En este caso, las variables predictoras fueron el tamaño del espacio verde y el área de cobertura arbórea dentro del espacio verde. Como variable dependiente se consideró la intensidad de enfriamiento de los espacios verdes estudiados.

Por medio de la recopilación y el análisis de datos concretos, que incluyó la estimación de la temperatura superficial para marzo del 2023, así como el análisis de métricas de paisaje de la morfología urbana y la trama verde existente, se validaron las hipótesis planteadas para las muestras estudiadas. Para esto, se utilizó como referencia la clasificación de la cobertura del CBIMA actualizada a marzo del 2023.

Se realizó un análisis a diferentes escalas, por medio de SIG, teledetección, estadística descriptiva e inferencial; incluyendo el estudio de toda la microcuenca, así como el estudio de zonas a escala local ubicadas dentro de los sectores más densamente urbanizados. Dentro del conjunto de técnicas e instrumentos utilizados para alcanzar los objetivos de esta investigación, se destacan varias metodologías; por ejemplo, se emplearon técnicas de observación, análisis e interpretación de imágenes de satélite, así como el procesamiento de capas ráster y



vectoriales con información pertinente al tema de estudio. Para el análisis de datos, se aplicaron diversas técnicas estadísticas, tales como el muestreo estratificado por bloques de elevación, el muestreo aleatorio, el análisis de la varianza (ANOVA), las comparaciones múltiples de Tukey y la visualización mediante diagramas y gráficos. Además, se utilizaron diferentes métodos, incluyendo la inferencia estadística y los modelos de regresión lineal simple. También, se realizó un análisis documental y revisión de literatura, para comprender las tendencias, teorías y enfoques previos relacionados con el calentamiento urbano y el diseño resiliente, en diferentes contextos urbanos y así poder establecer recomendaciones.

5.2. Limitaciones

Uno de los propósitos de esta investigación fue utilizar información disponible de acceso abierto y gratuito, al igual que el uso de software libre y código abierto, con la intención de facilitar la replicabilidad por parte de otros investigadores, instituciones o gobiernos locales, sin incurrir en costos significativos. No obstante, este enfoque conllevó ciertas limitaciones, particularmente en lo concerniente a la resolución de las imágenes satelitales y la disponibilidad de datos de sensores remotos. Por ejemplo, las imágenes provenientes de los satélites Landsat y Sentinel ofrecen una resolución adecuada para el análisis a nivel macro y medio, pero presentan restricciones notables a nivel local. Además, no se logró acceder a información adecuada para la generación de modelos de superficie que incorporaran datos tridimensionales de edificaciones y elementos urbanos. Tampoco fue viable la generación de un interferograma utilizando datos del radar de apertura sintética Sentinel-1, que cumplieran con los requisitos de resolución temporal y distancia de línea base perpendicular adecuadas para la interferometría, ya que los resultados obtenidos fueron poco satisfactorios, debido a la complejidad del área de estudio, así como a las condiciones climáticas y de humedad, que influyeron en la decorrelación de los pares de imágenes seleccionados.



6. Marco teórico

6.1. Gran Área Metropolitana:

La morfología urbana del Gran Área Metropolitana de Costa Rica (GAM) se encuentra en constante evolución, donde se destaca un marcado crecimiento demográfico y económico experimentado durante varias décadas. El GAM abarca un territorio que no se limita a fronteras naturales o administrativas, sino que se define a partir de criterios técnicos de ordenamiento urbano territorial. Este territorio se extiende sobre 1.967 km², representando el 3.8% del territorio nacional y compuesto por 31 cantones y 164 distritos (Estado de la Nación, 2015).

La historia de este territorio se remonta a la época de la colonia, donde los primeros centros urbanos surgieron y crecieron, estableciendo la base para la posterior concentración de población durante la época republicana. Con el tiempo, estos centros urbanos se expandieron de manera desordenada, dando lugar a una conurbación que alberga aproximadamente la mitad de la población del país, extendiéndose por gran parte del Valle Central. La urbanización se aceleró en el siglo XX debido a cambios socioeconómicos, migraciones hacia el centro urbano y la expansión de la industria (Von Breymann Miranda, 2017).

Entre 1982 y 2013, el área construida del GAM creció casi al doble, con un aumento significativo en el uso urbano fuera del anillo de contención urbana (Figura 5). Esto refleja la expansión continua de la GAM y la necesidad de abordar los desafíos asociados a este crecimiento (Estado de la Nación, 2015).

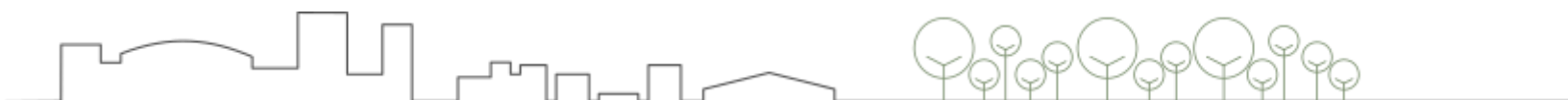
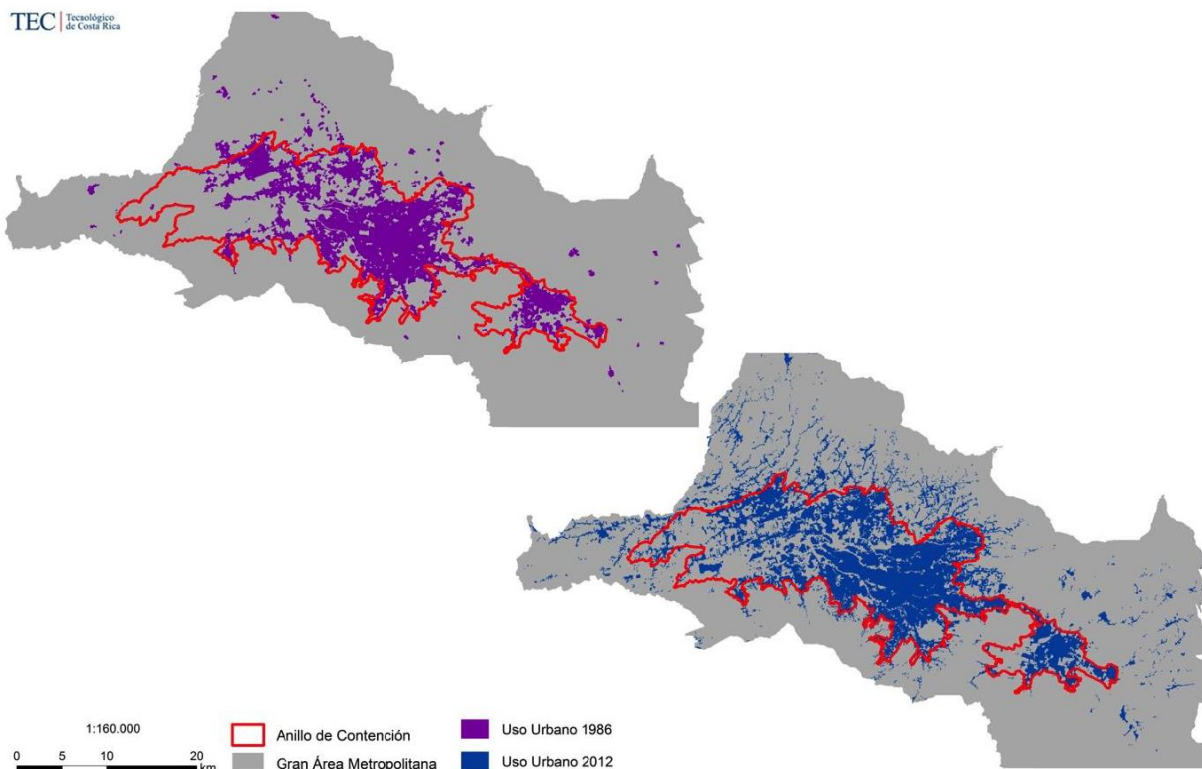


Figura 5. Crecimiento de la mancha urbana del Gran Área Metropolitana



Fuente: Ruiz, 2015 citado por Estado de la Nación (2015).

En el crecimiento urbano del GAM se deben considerar tres elementos principales: la normativa, la política y el mercado. Sin embargo, se ha observado que, debido a la debilidad en la aplicación de las políticas locales y regionales, el mercado inmobiliario se ha convertido en el principal impulsor de la expansión urbana en la GAM (Estado de la Nación, 2015).

La morfología urbana de la GAM se caracteriza por un crecimiento discontinuo, con una agregación de centros poblados anteriormente dispersos. Esta expansión se llevó a cabo en gran medida de manera espontánea y con trazados poco regulados, lo que resultó en la unificación de núcleos urbanos. A pesar de que las principales ciudades de la GAM están a menos de 20 kilómetros de distancia entre sí, el crecimiento se dio de manera fragmentada (Von Breymann Miranda, 2017).



6.2. Plan de Desarrollo Urbano para la Gran Área Metropolitana (Plan GAM 2013):

La constante evolución demográfica y económica del GAM que se describe en la sección anterior, caracterizada por un crecimiento urbano desordenado y fragmentado, impulsó la necesidad de un plan de desarrollo urbano más organizado. En respuesta, el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) en conjunto con otras instituciones, desarrolló el Plan GAM 2013, que busca contrarrestar esta dispersión urbana mediante una zonificación sostenible y la preservación del anillo de contención urbana. En este plan también se enfatizó la importancia de rehabilitar las áreas urbanas consolidadas y la implementación de corredores biológicos, fomentando así un crecimiento más ordenado y eficiente del GAM. Estos aspectos son fundamentales para mejorar la sostenibilidad y resiliencia del GAM, incluyendo al CBIMA. De esta forma, el Plan GAM 2013 proporciona un marco estratégico que sirve como punto de partida hacia una planificación urbana sostenible, estableciendo una serie de lineamientos que pueden ser reforzados y justificados a través de estudios específicos como el aquí desarrollado.

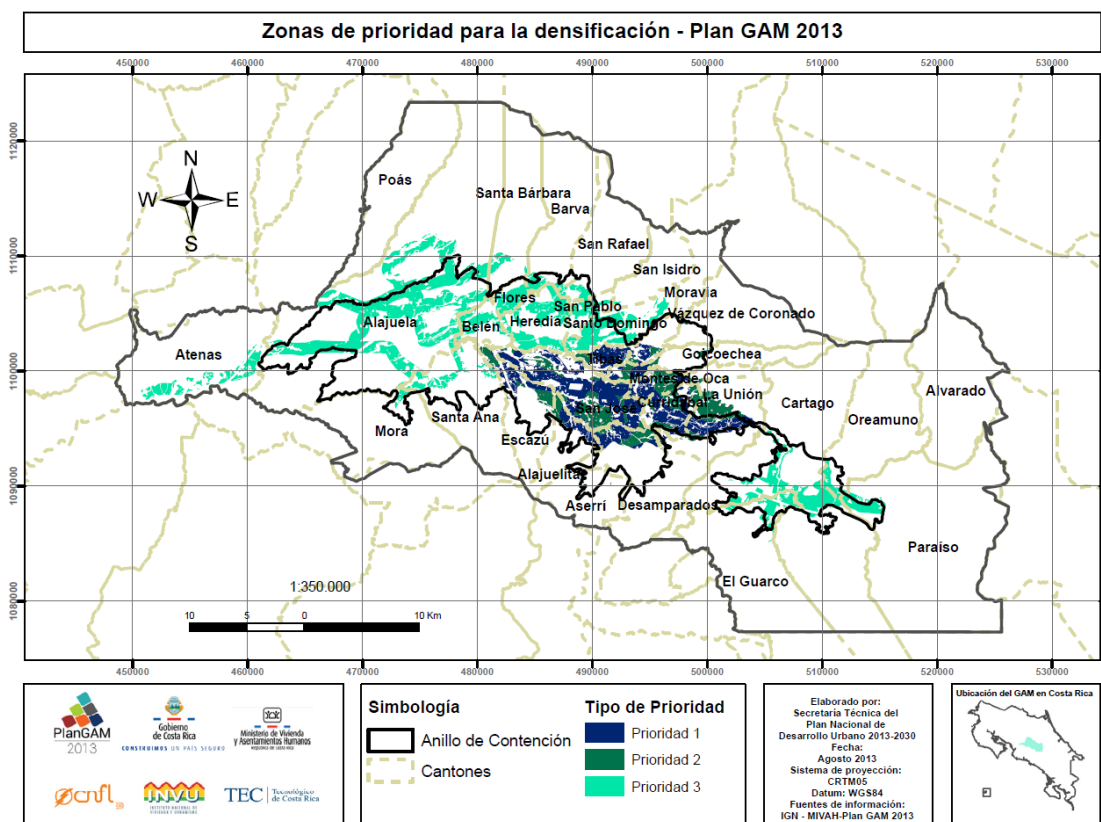
En diciembre de 2012, se decidió que el TEC asumiera la actualización del Plan de Desarrollo Urbano para la Gran Área Metropolitana. Para ello, el TEC conformó un equipo técnico interdisciplinario que involucró a profesionales altamente calificados y estudiantes avanzados provenientes de distintas escuelas (Martínez, T., 2014). Esto resultó en el Plan GAM 2013, que surgió como una herramienta de ordenamiento territorial para la zona central del país; en la cual se plantearon diversas iniciativas para contrarrestar la dispersión urbana periférica y mejorar la eficiencia de las áreas urbanas a través de criterios ordenadores y elementos morfológicos consolidados (Von Breymann Miranda, 2017).

El Plan GAM 2013 propuso una zonificación basada en la fragilidad ambiental y un crecimiento urbano sostenible; reconociendo la importancia de mantener el anillo de contención urbana como instrumento para controlar la expansión de la cobertura urbana horizontal y



fomentar la densificación vertical (Figura 6). La rehabilitación de la ciudad consolidada es un aspecto central del Plan GAM, para lo cual se propuso mejorar el sistema de zonas verdes, ya que ayudan a oxigenar la ciudad, reducir la contaminación y regular la temperatura. Para esto, también se propuso la creación de espacios verdes con especies locales, de bajo mantenimiento, que fomenten la vida silvestre y ofrezcan beneficios estéticos, ambientales y recreativos.

Figura 6. Zonas de prioridad para densificación Plan GAM 2013



Fuente: Dimensión Urbano regional -Plan GAM (2013).

De acuerdo con lo establecido en la dimensión ambiental del Plan GAM 2013, la incorporación y gestión de corredores biológicos es fundamental, por lo que se recomienda la colaboración interinstitucional para proteger y regenerar áreas boscosas privadas, con alta

fragilidad ambiental; así como restaurar zonas degradadas, fortaleciendo la conectividad del paisaje natural y la conservación de la biodiversidad. En esa misma línea, la restauración de las zonas de protección de los ríos se plantea como una propuesta adicional, para la creación de corredores biológicos dentro del GAM, sugiriendo la implementación de proyectos que involucren estudios de las condiciones actuales, limpieza y reforestación de las zonas protegidas de los ríos del GAM, entre ellos el río María Aguilar, así como sus afluentes principales; procurando para esto la colaboración público-privada (INVU, 2013).

De esta manera, el Plan GAM destaca la importancia de los corredores biológicos, la protección de áreas boscosas y la restauración de zonas de protección de ríos, promoviendo la colaboración interinstitucional y público-privada. En este contexto, los Corredores Biológicos Interurbanos (CBI), como el CBIMA, juegan un papel crucial al conectar áreas verdes y silvestres, manteniendo la biodiversidad y facilitando la migración de especies.

6.3. Corredor Biológico Interurbano María Aguilar (CBIMA):

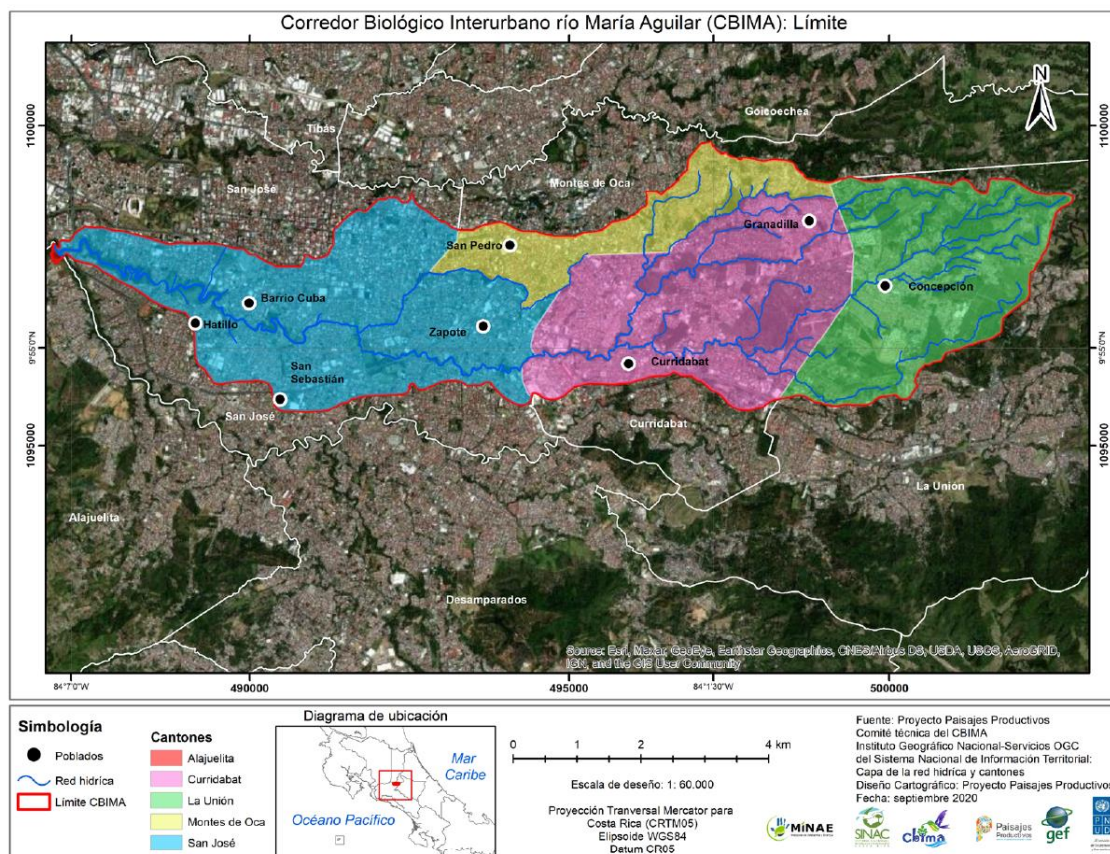
El CBIMA representa el 2% del GAM y el 0,07% del territorio nacional. Cuenta con características particulares que influyeron en su selección para el presente estudio. Por ejemplo, según datos del MINAE-SINAC-PNUD (2020), se trata de la microcuenca más densamente poblada del país, el 62% del territorio es de uso urbano, fue el primer corredor biológico interurbano oficializado en el país, cuenta con un modelo de gobernanza consolidado y abarca 19 distritos de 5 cantones: La Unión Curridabat, Montes de Oca, San José y Alajuelita (Figura 7). Como parte del Proyecto Paisajes Productivos, el MOCUPP monitorea la extensión de trama verde, los usos de la tierra y los cambios que se dan en estas coberturas naturales mediante el estudio de pérdida, ganancia o no cambio de estas áreas (MINAE-SINAC-PNUD, 2022).



En Costa Rica, los CBI son una innovadora estrategia de conservación que busca promover la conectividad entre paisajes, ecosistemas y hábitats en áreas urbanas. Estos corredores, formalmente establecidos en 2017 mediante el Decreto Ejecutivo N° 40043-MINAE, se definen como extensiones territoriales urbanas que enlazan microcuencas, áreas verdes urbanas, calles arborizadas, parques, líneas férreas y bosques en las riberas de ríos, con áreas silvestres protegidas. Su propósito es mantener la biodiversidad, facilitar la migración de especies y abordar dimensiones culturales, socioeconómicas y políticas (Gutiérrez Miranda, 2021). El Decreto Ejecutivo N° 40043-MINAE (2017) tiene como fin la regulación del Programa Nacional de Corredores Biológicos, cuyo objetivo general, según el artículo 3 del decreto, es promover la conservación y el manejo sostenible de la biodiversidad en Costa Rica, con una perspectiva de conectividad ecosistémica funcional y estructural. Estos corredores representan una modalidad reconocida por la legislación costarricense, contribuyendo a la conservación en paisajes donde la tenencia de la tierra es principalmente privada. La presión sobre la naturaleza es alta en estos entornos, y los conflictos entre actividades humanas y biodiversidad se han acentuado en áreas urbanas. Desde los CBI se busca promover un modelo de "Ciudad Verde", que procura reducir la contaminación, fomentar la conservación a través de espacios naturales y parques urbanos, y garantizar la sostenibilidad de los servicios ecosistémicos. Estos corredores buscan la participación de los ciudadanos en el desarrollo de sus ciudades y en la búsqueda de soluciones a los desafíos urbanos (Sancho Rodríguez, 2021).



Figura 7. Corredor Biológico Interurbano María Aguilar



Fuente: MINAE-SINAC-PNUD (2020)

El CBIMA se ubica en un entorno urbano denso, donde en muchos casos las características urbanas ocasionan un aumento significativo en las temperaturas y un clima urbano diferenciado, especialmente en las zonas con mayor presencia de infraestructura. Comprender esta relación entre las características de la ciudad y el clima urbano es fundamental para una planificación sostenible del CBIMA y el GAM.

6.4. Ciudad y clima urbano:

La urbanización, según señala Barrantes Sotela (2020), es un proceso cultural fundamental en la evolución de las sociedades humanas, así como un elemento crucial para el desarrollo sostenible. Sin embargo, el autor indica que el modelo de ciudad actual se puede



considerar insostenible desde el punto de vista ecológico y social, en donde la ciudad es un centro logísticamente esencial pero biológicamente poco productivo. Este proceso de urbanización no solo transforma la morfología del terreno, sino que también tiene un impacto significativo en las condiciones climáticas y ambientales, generando un clima urbano con características distintivas, tal como lo indica Martínez González (2021), quien además destaca que uno de los aspectos más notables es el aumento de temperatura en comparación con las áreas rurales circundantes.

La expansión urbana, especialmente en el siglo XX, basada en el uso extensivo de automóviles y combustibles fósiles, ha tenido un impacto global significativo, incluyendo al GAM (MINAE-SINAC-GIZ, 2022). A medida que la urbanización continúa y las ciudades crecen, los paisajes naturales se transforman en superficies impermeables, alterando los balances energéticos de las áreas urbanas. Esto, como se indica en un estudio realizado por Chen et al. (2021), conduce a condiciones climáticas alteradas en los entornos urbanos.

El clima de una ciudad se ve influenciado por múltiples factores como la ubicación geográfica, cobertura vegetal y cuerpos de agua. Además, Barrantes Sotela (2020) agrega que las actividades humanas, como la generación de calor y la contaminación del aire, también modifican el clima urbano. De acuerdo con Martínez González (2021), la magnitud de las modificaciones climáticas depende del tamaño y la extensión de la ciudad. Además, agrega que, a nivel intraurbano, se observan microclimas diferenciados debido a factores relacionados a la morfología de la ciudad, como el trazado de las carreteras, los usos de suelo, los materiales de construcción y las características de los edificios.

Al respecto, Masson et al. (2020) explican que los climas urbanos presentan una variabilidad de temperatura a diferentes escalas. Por ejemplo, a escala local, las infraestructuras influyen en el flujo del viento, proyectan sombras y pueden liberar calor a la atmósfera. Esto se relaciona con escalas y procesos más pequeños y no atmosféricos, asociados con actividad antropogénica. Al pasar a una escala de vecindario, el clima urbano es



más sensible a la morfología urbana, la cobertura del suelo y la presencia de vegetación. Además, estas escalas están vinculadas al clima urbano y a la evolución y el patrón de las ICU de toda la aglomeración. Finalmente, existen otros factores a mayor escala que influyen en el clima urbano, como la geografía, el clima de la región o incluso el cambio climático global. De acuerdo con Masson et al. (2020), el cambio climático actual induce un cambio de paradigma en la planificación urbana, donde las ciudades requieren ser diseñadas y planificadas para soportar los peligros en evolución asociados con el cambio climático.

De esta manera, el calentamiento de las ciudades se ha convertido en un factor importante a ser considerado en la planificación urbana a nivel mundial. San José, por ejemplo, ha experimentado un aumento de temperaturas, en gran parte debido a la "isla de calor" generada por la gran cantidad de superficies pavimentadas. Este efecto, que aumenta las temperaturas en las zonas urbanas, puede agravarse con el cambio climático, pudiendo llegar a tener un impacto importante en la calidad de vida de los habitantes urbanos, planteando desafíos de adaptación significativos (MINAE-SINAC-GIZ, 2022). También se anticipa que el aumento en la temperatura de las ciudades, debido al crecimiento urbano y poblacional, podría tener implicaciones negativas, como el mayor consumo de energía, el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos (Muhammad et al., 2022).

De esta forma, se puede relacionar el concepto de clima urbano con las condiciones climáticas específicas que se experimentan dentro de las áreas urbanas, influenciadas por una serie de factores como la morfología urbana, la cobertura del suelo y las actividades humanas, donde es posible experimentar un incremento en el fenómeno de isla de calor urbana en algunos sectores de la ciudad.

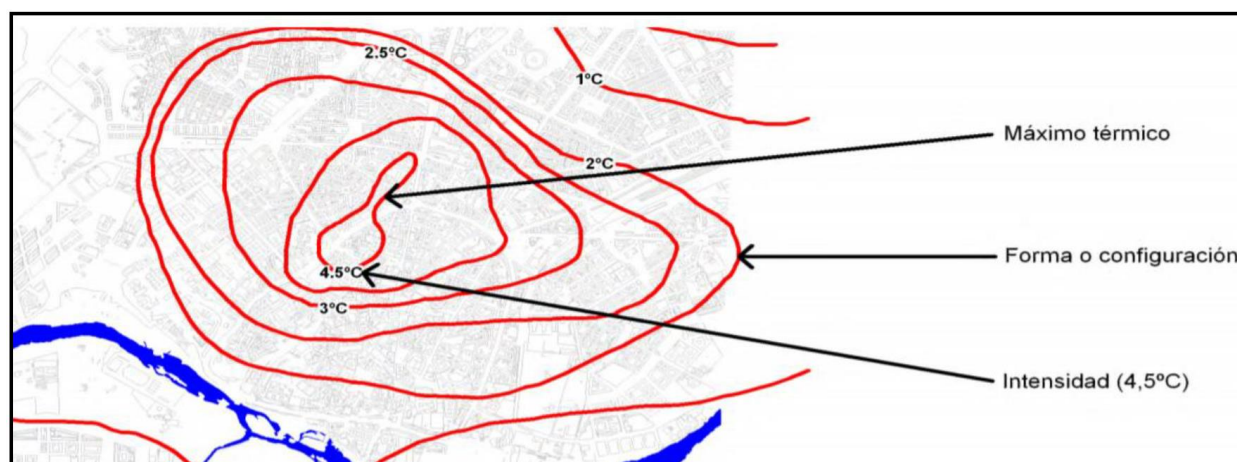


6.5. Isla de calor urbana:

La Isla de Calor Urbana (ICU) es un fenómeno bien definido que se manifiesta cuando la temperatura del aire o de la superficie en áreas urbanas es, en promedio, más alta que en las zonas circundantes no urbanizadas. Sin embargo, es importante resaltar que según Garau & Garau (2018), las zonas a comparar deben presentar condiciones similares de distancia al mar y altitud. Además, de acuerdo con Voogt & Oke (2003), es posible definir islas de calor para diferentes capas del ambiente urbano, y para diversas superficies e incluso subsuperficies, por lo cual es importante distinguir entre los diferentes tipos de ICU.

Las ICU pueden describirse en función de tres parámetros fundamentales: intensidad, forma o configuración, y máximo térmico (Figura 8). La intensidad se refiere a la máxima diferencia de temperatura, entre la capa de dosel urbano y el entorno no urbanizado más cercano. La forma o configuración se relaciona con la distribución espacial de las isothermas, que a menudo siguen un patrón similar al de una isla, que se ajusta a la forma de la ciudad. El máximo térmico representa la ubicación espacial donde se alcanza la mayor intensidad de la Isla de Calor. Entre los factores estudiados de las Islas de Calor Urbano, se destacan su intensidad, configuración y ubicación de los núcleos (Martínez González, 2021).

Figura 8. *Intensidad, máximo térmico y forma o configuración de la isla de calor*



Fuente: Gálvez. 2013 citado por Martínez González, N. (2021).



La evaluación de los efectos de la ICU se puede realizar a través de modelos climáticos, observaciones meteorológicas y la temperatura de la superficie terrestre (LST) detectada por satélite, cada uno con sus propias ventajas y limitaciones (Zhou et al., 2022).

De acuerdo con García & Martilli (2012), el fenómeno de la ICU se puede dividir en dos tipos: la isla de calor atmosférica, que se refiere a las diferencias de temperatura del aire entre áreas urbanas y rurales, y la isla de calor superficial, que indica las diferencias térmicas entre las superficies artificiales (pavimento, aceras, cubiertas de edificios, etc.) y las áreas naturales (vegetación, cultivos, terrenos rocosos). Por otra parte, Voogt & Oke (2003) establecen 3 tipos de ICU: la isla de calor de la capa de dosel, la isla de calor de la capa de perímetro urbano y la isla de calor de la superficie; de las cuales, las 2 primeras responden al aumento de temperatura de la atmósfera y la última se encuentra relacionada a la temperatura de las superficies urbanas. La expansión de las islas de calor superficial está directamente relacionada con una mayor absorción de radiación solar, lo que a su vez depende del uso del suelo, tipo de suelo, cobertura y otros factores, como las propiedades térmicas de los materiales de construcción y la presencia de vegetación (Martínez González, 2021). Para efectos de la presente investigación se prestará especial atención a la isla de calor superficial; de manera que cuando se presenten valores o datos relacionados a la ICU, salvo que se indique lo contrario, se estará considerando la isla de calor superficial obtenida a partir de la LST.

El estudio de la LST observada por satélites desempeña un papel crucial en las investigaciones de la isla de calor superficial; ya que, tal como lo indican Chen et al. (2021), estos sensores remotos proporcionan datos espaciales continuos y sincronizados en el tiempo, lo que resulta especialmente útil para el estudio del clima urbano. Además, agregan que las imágenes térmicas de satélite de resolución media son una alternativa valiosa para el análisis térmico de la superficie terrestre urbana. MODIS y Landsat son dos de los sensores satelitales más significativos para observar la temperatura de la superficie, con resoluciones espaciales de



1000 m y 30 m, respectivamente. Sin embargo, para comprender la heterogeneidad espacial de la LST y los tipos de cobertura terrestre urbana dentro de la ciudad, se puede requerir una mayor resolución espacial; por lo que la aplicación de métodos como la reducción de escala de la LST puede resultar una alternativa eficiente, utilizando valores de píxeles de baja resolución espacial como variables explicativas para fusionar datos de alta resolución y obtener información más específica sobre objetos terrestres (Zhang, X. et al., 2023).

6.6. Espacios verdes y planificación urbana resiliente

Los espacios verdes contribuyen significativamente a mitigar los efectos del calor urbano, al proporcionar sombra, reducir la temperatura y mejorar la calidad del aire, lo que a su vez influye en la calidad de vida de la población urbana. Por tanto, la gestión y expansión de la trama e infraestructura verde se presentan como una estrategia esencial en la planificación urbana resiliente y la adaptación al cambio climático.

Trama verde

La trama verde, que abarca tanto áreas naturales como intervenidas, públicas y privadas, es un componente clave de la infraestructura verde de la ciudad (MINAE-SINAC-PNUD, 2022). Esta noción se incorporó al marco legal nacional a través del Decreto Ejecutivo N° 40043-MINAE en enero de 2017, definiéndola como la vegetación presente en parques urbanos, áreas verdes, calles arboladas, bosques en las riberas de ríos u otras áreas silvestres protegidas; destacando su relevancia en la conservación de la biodiversidad, así como su contribución a dimensiones culturales, socioeconómicas y políticas (Miranda Quirós et al., 2022).

Infraestructura verde

La infraestructura verde se puede definir como una red planificada de zonas naturales y seminaturales que, junto con otros elementos medioambientales, ha sido diseñada para proporcionar servicios ecosistémicos y proteger la biodiversidad tanto de los asentamientos



rurales como urbanos (Comisión Europea, 2014 citado por MINAE-SINAC-GIZ, 2021b). De manera similar, Gearey et al (2019) describen la infraestructura verde como aquellas soluciones naturales que han sido planificadas o preservadas dentro de la configuración urbana, como por ejemplo las plazas urbanas con vegetación, arborización en las vías, setos, paredes verdes o corredores verdes. Sin embargo, para Sinnett et al.(2019) la importancia de la infraestructura verde depende menos de la presencia de estos componentes individuales y más de su papel dentro de una red; la cual debe proporcionar conectividad para las personas y la vida silvestre dentro de los entornos construidos, así como entre los entornos urbanos y rurales. Partiendo de este enfoque, estos autores señalan que la infraestructura verde debe planificarse estratégicamente, tanto a nivel urbano como a nivel de desarrollos individuales o locales para asegurar su contribución al desarrollo más amplio de la red.

Desde otro enfoque, Tietzmann e Silva et al. (2019), enfatizan la necesidad de promover la resiliencia urbana y reducir el riesgo de desastres, para lo cual se requiere un cambio urgente de paradigma en la planificación y el diseño urbano. Por lo tanto, el diseño y la implementación de infraestructura verde se presenta como una solución necesaria, con la cual se pueden impulsar mejoras ambientales y sociales. En este contexto, los autores justifican la aplicación de los principios de quien contamina paga y de quien protege recibe como una posible solución a los problemas urbanos. De este modo, invertir en mecanismos de compensación que sean capaces de estimular la protección ambiental y la prestación de servicios ambientales surge como una herramienta para la planificación urbana resiliente, donde los propietarios urbanos reciben beneficios al invertir en proyectos sostenibles que involucren infraestructura verde.

A nivel nacional, en el Decreto Ejecutivo N° 42465-MOPT-MINAE-MIVAH (2020), se define la infraestructura verde como una red interconectada de cobertura verde o espacios azules que conservan las funciones y valores de los ecosistemas naturales y provee beneficios asociados a la población humana. Dentro de estos se destacan los servicios esenciales para



actividades productivas, regulación de la temperatura, conservación del recurso hídrico, rehabilitación de suelos y recuperación de paisajes (MOPT-MINAE-MIVAH, 2020).

Infraestructura azul

La infraestructura azul se puede definir como los recursos hídricos, naturales o artificiales, ya sean permanentes o temporales, que se superponen con áreas urbanas, como por ejemplo cuerpos de agua, ríos, lagos, humedales, aguas costeras, estuarios, acuarios públicos o estanques (Gearey et al., 2019; Iojă et al., 2021). La infraestructura azul aporta beneficios como la ralentización de la escorrentía, al proporcionar almacenamiento temporal. Además, ayuda al enfriamiento de las superficies, al emitir radiación de onda larga y absorber la radiación de onda corta, liberándola a través de la evaporación (Almaaitah et al., 2021). En muchos casos, la infraestructura azul se encuentra intrínsecamente relacionada con la infraestructura verde.

Infraestructura verde-azul

La infraestructura verde-azul es un término colectivo que se usa cuando se integran aplicaciones verdes y azules para mitigar los efectos de la urbanización y adaptarse al cambio climático, proporcionando múltiples beneficios para las áreas urbanas afectadas por el agua de lluvia no gestionada y el calor elevado (Versini et al. 2018 citado por Almaaitah et al., 2021).

Ghofrani et al. (2017) definen la infraestructura verde-azul como una red interconectada de componentes paisajísticos naturales o diseñados, que incluyen tanto cuerpos de agua como espacios verdes, los cuales pueden proporcionar diversas funciones como: almacenamiento de agua, control de inundaciones, hábitat de vida silvestre o purificación del agua. Además, la infraestructura verde-azul puede ayudar a la regulación del clima y la mitigación del calentamiento urbano mediante el enfriamiento por evapotranspiración (Almaaitah et al., 2021).



Espacios verdes urbanos y servicios ecosistémicos:

De acuerdo con el Decreto Ejecutivo N° 42465-MOPT-MINAE-MIVAH (2020), los servicios ecosistémicos son los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas; incluyendo servicios de provisión tales como alimentos y agua, así como servicios de protección ante eventos peligrosos y mitigación de impactos, como el control natural de la erosión, las inundaciones, los vientos, plagas, pestes, enfermedades. También se incluyen servicios de apoyo, tales como los ciclos de nutrientes que mantienen las condiciones para la vida en la Tierra (MOPT-MINAE-MIVAH, 2020). Por otro lado, en la Guía de Soluciones Basadas en Naturaleza (MINAE-SINAC-GIZ, 2021b), se definen los servicios ecosistémicos urbanos (SEU) como los beneficios directos e indirectos que los ecosistemas urbanos proporcionan para el bienestar humano en las ciudades. Estos servicios se dividen en cuatro categorías clave: apoyo, abastecimiento, regulación y servicios culturales y de esparcimiento, los cuales son de gran importancia para mejorar la resiliencia y la calidad de vida en entornos urbanos. De acuerdo con MINAE-SINAC-GIZ (2021b), los servicios de apoyo son los servicios necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos, como proporcionar hábitat para las especies. Los servicios de abastecimiento son los beneficios materiales que las personas obtienen de los ecosistemas, como alimentos, agua, madera, medicinas o materias primas; mientras que los servicios de regulación se refieren a los beneficios obtenidos de la regulación de los procesos ecosistémicos, por ejemplo, la regulación del clima, el control de las inundaciones y enfermedades, o la polinización de los cultivos. Finalmente, los servicios culturales y de esparcimiento incluyen beneficios inmateriales como bienestar espiritual o el fortalecimiento de la identidad cultural.

Los espacios verdes desempeñan un papel significativo en diversos aspectos de las áreas urbanas, donde se pueden destacar una serie de beneficios, como: la conservación de la biodiversidad mediante la preservación, mejora de los hábitats urbanos y moderación del clima urbano (Barrantes Sotela, 2020). Diferentes estudios reconocen el aporte de los espacios



verdes urbanos para la regulación de la temperatura. Las investigaciones realizadas por Rakoto et al. (2021) y Kirschner et al. (2023) hacen énfasis a la importancia de la promoción de políticas urbanas verdes y la presencia de espacios verdes en entornos urbanos como estrategias efectivas para mitigar el efecto de la ICU, donde la presencia de vegetación aumenta la evaporación y proporciona sombra, regulando así las temperaturas.

Efecto de enfriamiento de los espacios verdes urbanos

Según Yu et al. (2020), a nivel mundial, la mitigación del efecto de la ICU ha sido un tema de estudio destacado, con diferentes enfoques que incluyen el enfriamiento mediante techos verdes, la elección de materiales y colores de construcción, entre otros. Para Phelan et al. (2015), aumentar el albedo de los tejados puede ser una solución eficaz para reducir la ICU, siendo, de acuerdo con los autores, una alternativa de menor costo en comparación con techos verdes u otras soluciones que consideren infraestructura verde. Sin embargo, según Yu et al. (2020), los espacios verdes urbanos pueden ser una solución más eficiente y sostenible, donde la ecología urbana desempeña un papel primordial para la sostenibilidad global, reconociéndose el efecto refrescante de los espacios verdes como una estrategia prometedora para mitigar la ICU. Al respecto, Marando et al. (2022) agregan que la capacidad de enfriamiento de los espacios verdes urbanos puede variar en gran medida según los tipos de vegetación y cobertura, como pastos, arbustos o árboles, alcanzando la máxima efectividad con los bosques urbanos.

Los métodos utilizados para estudiar este efecto son similares a los de la investigación de la ICU e involucran mediciones de campo, datos de temperatura del aire y de la superficie terrestre, además de simulaciones con modelos. En un enfoque innovador, Rakoto et al. (2021) modelaron la relación entre la vegetación y el calor urbano en Melbourne, Australia, utilizando datos de altura de la vegetación. Kirschner et al. (2023) llevaron a cabo un estudio en Praga, analizando el efecto de enfriamiento de 71 espacios verdes urbanos y clasificándolos según



sus características espaciales, lo que ofrece información valiosa para la planificación de políticas urbanas.

Tanto Rakoto et al. (2021) como Kirschner et al. (2023), resaltan que el grado de enfriamiento proporcionado por la vegetación varía según factores como su estructura, tamaño, densidad, composición y configuración espacial, así como el clima de la región. Sin embargo, según Kirschner et al. (2023), existe una falta de exploración con relación a cómo los diferentes tipos de espacios verdes urbanos interactúan con las estructuras urbanas circundantes, donde es importante considerar el impacto de la morfología de la ciudad.

Extensión e intensidad de enfriamiento de los espacios verdes

De acuerdo con García Haro et al. (2019), reconocer las características físicas que definen el efecto de enfriamiento de los espacios verdes proporciona una oportunidad para establecer parámetros de adaptación climática en las ciudades. Arellano Ramos et al. (2019) indican que el estudio del efecto de enfriamiento se aborda usualmente por medio de dos indicadores: la extensión e intensidad de enfriamiento. La extensión de enfriamiento (L_{max}) describe la distancia entre el perímetro del espacio verde y el punto más alejado donde se percibe el efecto de enfriamiento. La intensidad de enfriamiento (ΔT), describe el comportamiento térmico de los espacios, indicando la diferencia de temperatura entre el contexto urbano y el espacio verde. Diferentes investigaciones han estudiado tanto la extensión como la intensidad de enfriamiento de espacios verdes urbanos, aplicando diferentes enfoques y metodologías. Por ejemplo, Arellano Ramos et al. (2019), Chibuike et al. (2018) y Feyisa et al. (2014) utilizaron anillos concéntricos para cuantificar la extensión e intensidad del efecto de enfriamiento de los espacios verdes, en Barcelona, Nigeria y Etiopía, respectivamente. En el caso de Barcelona, Arellano Ramos et al. (2019) emplearon otras 2 metodologías adicionales a la de los anillos concéntricos. Primero delimitaron las áreas circundantes para un reconocimiento particular de la diferencia de temperaturas entre los parques y su contexto urbano cercano. Finalmente, para un análisis más detallado de las variaciones de ΔT_{max} y



Lmax de un espacio verde dentro de diferentes contextos urbanos utilizaron secciones transversales en diferentes direcciones, logrando describir de mejor manera el efecto no lineal del enfriamiento.

6.7. Morfología urbana y métricas del paisaje:

Los estudios sobre las Islas de Calor Urbana (ICU) han suscitado la necesidad de abordar de manera más eficiente la distinción entre las áreas urbanas y rurales desde una perspectiva climática, centrándose en cómo la morfología urbana y el uso del suelo influyen en el clima local de las ciudades (Martínez González, 2021).

La morfología y las características de los paisajes urbanos se reconocen como factores que afectan la ICU, por lo que existen numerosos estudios sobre el impacto de los paisajes urbanos en la LST (An et al., 2022; Das et al., 2024; Parvar et al., 2024; Zeng et al., 2022; Zhang, Y. et al., 2022). De acuerdo con Parvar, et al. (2024), los índices o métricas del paisaje proveen una herramienta cuantitativa para analizar los patrones del paisaje, incluyendo su composición, la estructura y la configuración de un paisaje.

Al respecto, An, et al. (2022) indican que las superficies impermeables pueden aumentar el flujo de calor sensible en la superficie, lo que conduce a un aumento en la LST. Por el contrario, los cuerpos de agua y la vegetación pueden disminuir la LST, debido principalmente al enfriamiento evaporativo de los primeros y el aumento del flujo de calor latente de los últimos. Por lo tanto, según los autores, la distribución balanceada y planificada del paisaje urbano puede considerarse como una medida efectiva para mitigar los efectos de la ICU (An et al., 2022).

De acuerdo con Zhang, Y. et al. (2022), la configuración espacial de las superficies impermeables, que incluye tamaño, forma y distribución, juega un papel crucial en la magnitud y extensión de la ICU, donde en un estudio realizado, los autores encontraron que reducir la proporción de área, la conectividad y la complejidad de forma de las superficies impermeables



de alta densidad puede mitigar la ICU. Estos hallazgos proporcionan una valiosa referencia para la planificación urbana futura y la gestión del clima (Zhang, Y. et al., 2022).

Para el análisis de métricas del paisaje existe un complemento para QGIS llamado LecoS (Landscape ecology analysis), el cual utiliza bibliotecas de Python SciPy y Numpy para calcular métricas de paisaje básicas y avanzadas, proporcionando varias funciones para llevar a cabo análisis de paisaje dentro de modelos SIG (Jung, 2013).

El crecimiento acelerado del GAM ha generado un desequilibrio ambiental, comprometiendo la sostenibilidad urbana y afectando áreas como el CBIMA. El Plan GAM 2013 y los CBI, incluyendo el CBIMA, se orientan hacia la rehabilitación de la trama verde urbana para contrarrestar estos efectos y promover la sostenibilidad, crucial para áreas densamente pobladas como la microcuenca del río María Aguilar. La urbanización intensiva ha creado microclimas urbanos diferenciados, incrementando el calentamiento urbano y el fenómeno ICU dentro del CBIMA. Los espacios verdes y azules son vitales para mitigar este efecto, proporcionando sombra, reduciendo la temperatura y mejorando la calidad del aire. La infraestructura verde azul, clave en la planificación urbana sostenible, ofrece servicios ecosistémicos importantes, incluida la regulación del clima, siendo esencial para la adaptación al cambio climático y la reducción de riesgos de desastres. La configuración espacial de la infraestructura urbana influye en la magnitud de las ICU, destacando la importancia de una planificación equilibrada para mitigar estos efectos y mejorar la resiliencia urbana. En el contexto de la presente investigación, los conceptos desarrollados a lo largo de las diferentes secciones del marco teórico permiten tener una visión más clara sobre la problemática y las características del área de estudio y su entorno, así como diferentes teorías, métodos y estrategias para el abordaje del tema.



7. Marco metodológico

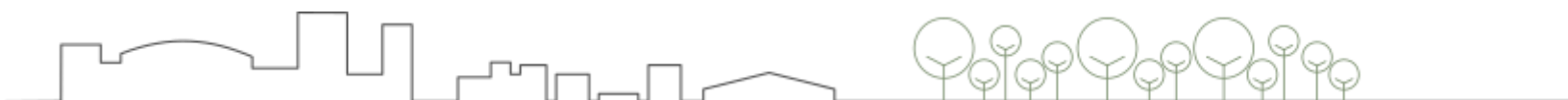
7.1. Área de estudio

7.1.1. Caracterización biofísica de la microcuenca del río María Aguilar

El área de estudio se puede clasificar como una microcuenca, basado en el sistema de drenaje y su conducción final. Según Faustino & Jiménez Otárola (2000), la cuenca hidrográfica es el terreno limitado por las partes más altas, en las que se desarrolla un sistema de drenaje superficial que fluye hacia un río principal, el cual se integra al mar o a otro río más grande. Si la cuenca se divide en partes que fluyen hacia el flujo principal de la cuenca, a cada parte se le llama subcuenca. Si la subcuenca se divide en partes que fluyen hacia el flujo principal de la subcuenca, a cada parte se le llama microcuenca. Varias microcuencas pueden conformar una subcuenca y varias subcuencas una cuenca. Existen otros criterios de clasificación de las cuencas, por ejemplo, según el área, se establece que las microcuencas tienen entre 10 y 500 km² (Faustino & Jiménez Otárola, 2000).

La microcuenca del río María Aguilar presenta una extensión de 3876,63 ha. Inicia en las partes altas del cantón de La Unión, a una altitud aproximada de 1630 m.s.n.m. y fluye hacia el oeste a través de los cantones de Curridabat, Montes de Oca y San José, finalizando en el distrito de San Felipe de Alajuelita, donde desemboca en el río Tiribí a 1030 m.s.n.m. Este último es tributario del río Virilla, que descarga en el río Grande de Tárcoles, desembocando finalmente en el Pacífico Central (MINAE-GEF-PNUD, 2019).

La microcuenca del río María Aguilar tiene 104.23 km lineales. En el extremo este de la microcuenca nacen numerosos afluentes, lo que genera un alto potencial de drenaje y recarga acuífera. La quebrada María Aguilar, que da nombre a la microcuenca, nace en el cantón de La Unión. En la microcuenca media, dentro de un sector altamente urbanizado, donde las áreas

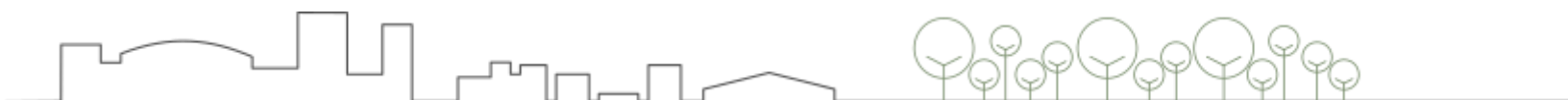


protegidas del río presentan alteraciones, se forma el río Ocloro, que se integra al cauce principal del María Aguilar (MINAE-GEF-PNUD, 2019).

La zona de estudio tiene una topografía irregular, presentando cañones de altas pendientes en la cuenca baja. Los terrenos de menor pendiente se ubican en la cuenca media, aunque en las riberas de los cuerpos de agua se identifican pendientes pronunciadas. En la cuenca alta, en los distritos de San Ramón, Concepción y Dulce Nombre, la topografía es irregular con pendientes altas (MINAE-GEF-PNUD, 2019).

7.1.2. Descripción del desarrollo urbano dentro de la microcuenca

Como ya se ha mencionado, la inadecuada planificación territorial y la urbanización desordenada ha resultado en una urbanización densa y masiva del área de estudio, con un alto porcentaje del territorio dedicado a usos urbanos y un bajo porcentaje clasificado como trama verde, con espacios verdes fraccionados y dispersos; así como construcciones dentro de las áreas de protección de los ríos. Esto ha provocado un deterioro de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, limitando el acceso de la población a áreas verdes para recreación y descanso. Como parte de un análisis de los espacios verdes disponibles para la población del CBIMA, se indica que para el 2019 cada habitante disponía de solo 0,95 m² de espacio verde, por debajo de lo recomendado por la OMS. Además, se identificó que existe un gran déficit de servicios ecosistémicos culturales debido a la escasa disponibilidad de espacios públicos como parques y áreas recreativas (MINAE-GEF-PNUD, 2019).

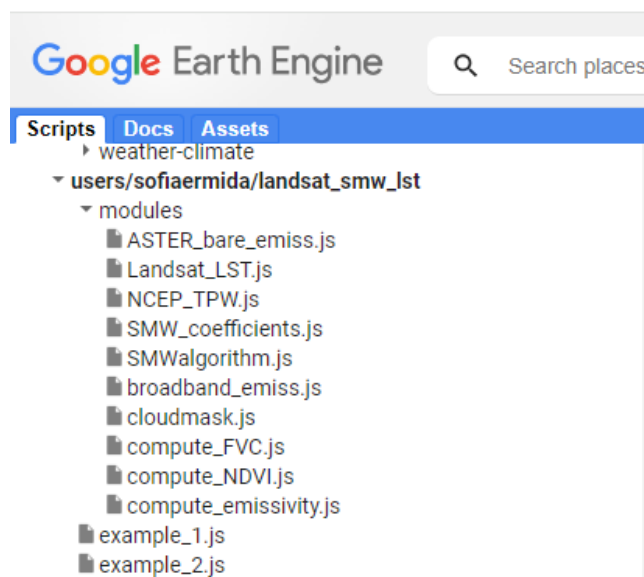


7.2. Identificación del calentamiento urbano y los patrones de cobertura

7.2.1. Estimación de la temperatura de la superficie del CBIMA (marzo 2023)

Para calcular la temperatura de la superficie (LST), se utilizó un repositorio de código publicado por Ermida et al. (2020) (Figura 9), que permite calcular la LST con las imágenes satelitales Landsat 4, 5, 7 y 8, con Google Earth Engine (GEE). Se utilizó el código de los autores con las siguientes modificaciones: 1. Se importó el límite del CBIMA, con una ampliación de 60m, en formato shape como una tabla en GEE, en el sistema de coordenadas WGS 84 (4326), para centrar el mapa y cortar las capas de LST resultantes y exportarlas a Google Drive. 2. Se seleccionó el rango de fechas para las imágenes Landsat 8 para marzo del 2023 (Figura 10). Con el algoritmo programado en Java Script se obtuvo la LST y se descargó en formato ráster (TIFF), por medio de Google Drive (Figura 11).

Figura 9. Repositorio de código de Ermida et al. (2020).



Fuente: Ermida et al. (2020).



Figura 10. Código de Ermida et al. (2020), modificado.

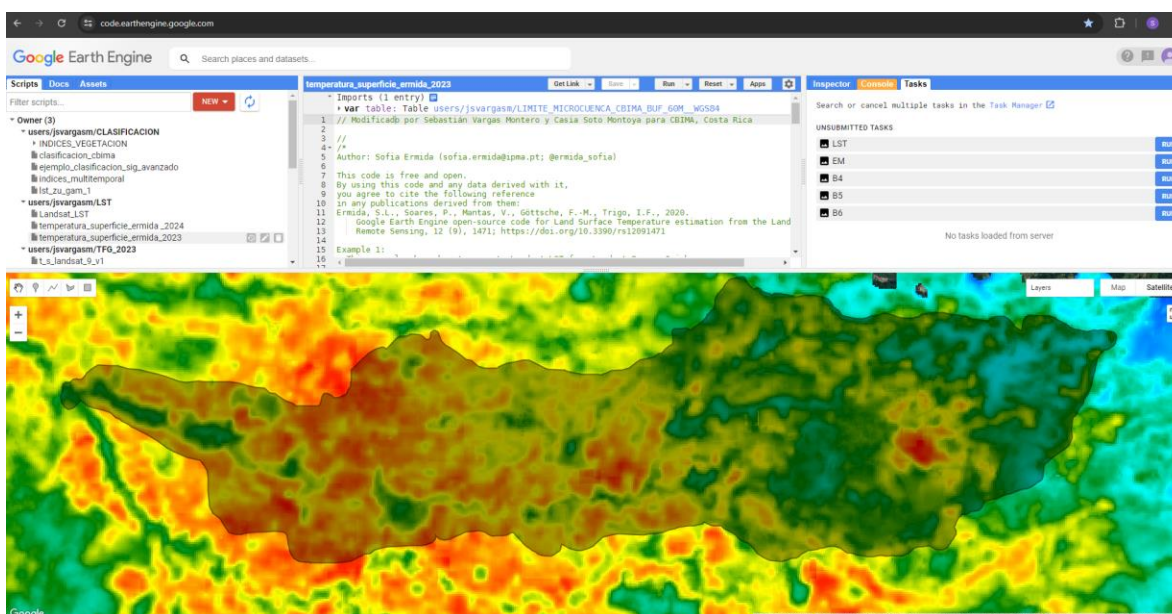
```

LST_MDCS_CBIMA_ermida_2023
Get Link Save Run Reset Apps
Imports (1 entry)
var table: Table users/jsvargasm/LIMITE_MICROCUENCA_CBIMA_BUF_60M_WGS84
1 // Modificado por Sebastián Vargas Montero y Casia Soto Montoya para CBIMA, Costa Rica
2
3 //
4 /*
5 Author: Sofia Ermida (sofia.ermida@ipma.pt; @ermida_sofia)
6
7 This code is free and open.
8 By using this code and any data derived with it,
9 you agree to cite the following reference
10 in any publications derived from them:
11 Ermida, S.L., Soares, P., Mantas, V., Göttsche, F.-M., Trigo, I.F., 2020.
12 Google Earth Engine open-source code for Land Surface Temperature estimation from the Land
13 Remote Sensing, 12 (9), 1471; https://doi.org/10.3390/rs12091471
14
15 Example 1:
16 This example shows how to compute Landsat LST from Landsat-8 over Coimbra
17 This corresponds to the example images shown in Ermida et al. (2020)
18
19 */
20
21 //Aquí se pueden ver los detalles de la programación de ermida:
22 //https://github.com/sofiaermida/Landsat_SMW_LST/tree/master/modules
23
24
25 // link to the code that computes the Landsat LST
26 var LandsatLST = require('users/sofiaermida/landsat_smw_lst/modules/Landsat_LST.js')
27 //var LandsatLST = require('users/Owner/jsvargasm/LST/Landsat_LST')
28
29 // select region of interest, date range, and landsat satellite
30 var geometry = table;
31 var satellite = 'L8';
32 var date_start = '2023-03-01';
33 var date_end = '2023-03-31';
34 var use_ndvi = true;
35

```

Fuente: Ermida et al. (2020), modificado.

Figura 11. LST generada con el código de Ermida et al. (2020), modificado.

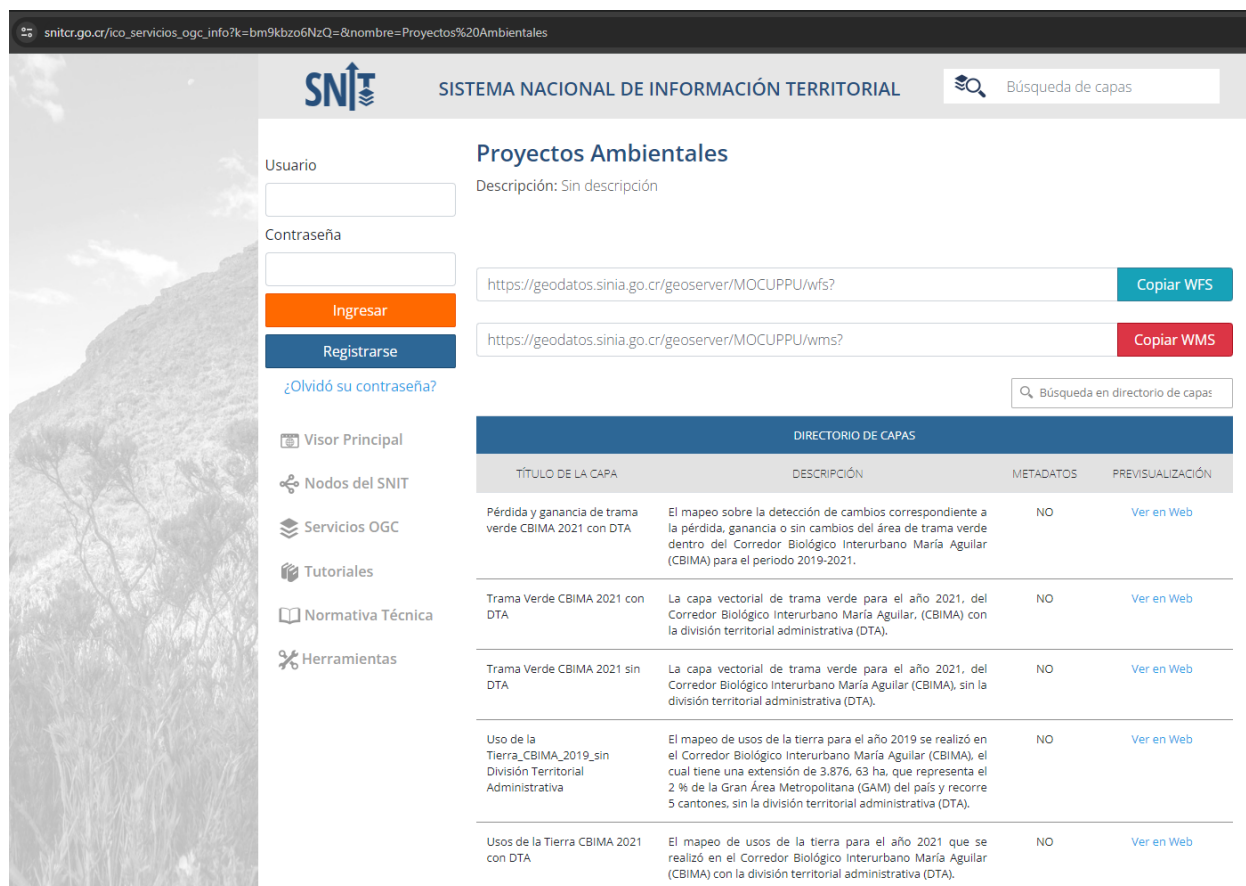


Fuente: Ermida et al. (2020), modificado para el CBIMA Costa Rica.

7.2.2. Actualización de capa de cobertura del CBIMA (marzo 2023)

Se utilizaron, como base, las clasificaciones supervisadas de Trama Verde y Usos de la Tierra del CBIMA para el año 2021, realizadas por el Proyecto Paisajes Productivos en conjunto con MINAE (MINAE-SINAC-PNUD, 2022), las cuales se descargaron del SNIT (Figura 12), desde el sitio: <https://www.snitcr.go.cr/>

Figura 12. Descarga de capas de Trama Verde y Usos de la Tierra CBIMA 2021



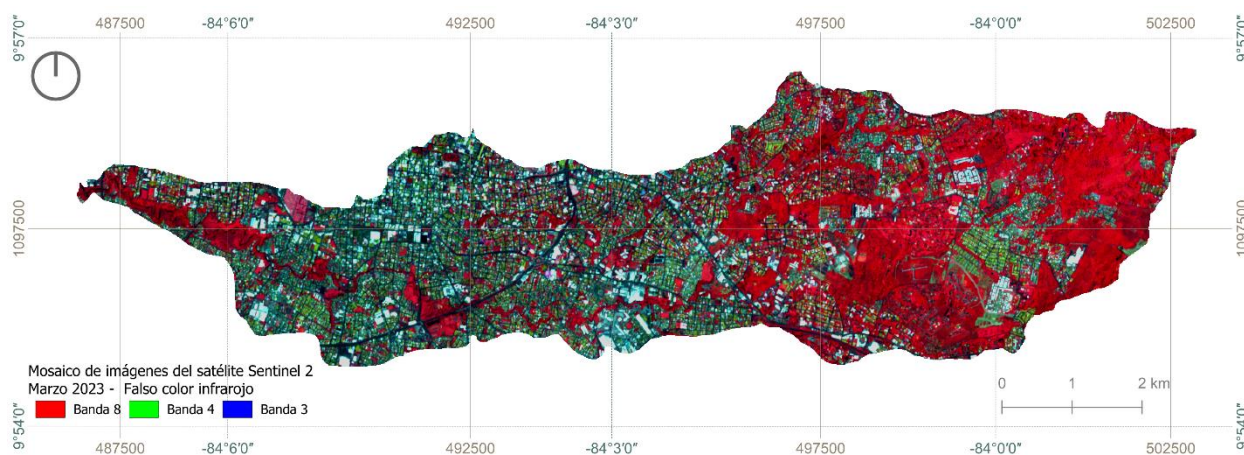
The screenshot shows the SNIT website interface. The main content area is titled 'Proyectos Ambientales' and contains a table of layers. The table has four columns: 'TÍTULO DE LA CAPA', 'DESCRIPCIÓN', 'METADATOS', and 'PREVISUALIZACIÓN'. The layers listed are:

TÍTULO DE LA CAPA	DESCRIPCIÓN	METADATOS	PREVISUALIZACIÓN
Pérdida y ganancia de trama verde CBIMA 2021 con DTA	El mapeo sobre la detección de cambios correspondiente a la pérdida, ganancia o sin cambios del área de trama verde dentro del Corredor Biológico Interurbano María Aguilar (CBIMA) para el periodo 2019-2021.	NO	Ver en Web
Trama Verde CBIMA 2021 con DTA	La capa vectorial de trama verde para el año 2021, del Corredor Biológico Interurbano María Aguilar, (CBIMA) con la división territorial administrativa (DTA).	NO	Ver en Web
Trama Verde CBIMA 2021 sin DTA	La capa vectorial de trama verde para el año 2021, del Corredor Biológico Interurbano María Aguilar (CBIMA), sin la división territorial administrativa (DTA).	NO	Ver en Web
Uso de la Tierra_CBIMA_2019_sin División Territorial Administrativa	El mapeo de usos de la tierra para el año 2019 se realizó en el Corredor Biológico Interurbano María Aguilar (CBIMA), el cual tiene una extensión de 3.876, 63 ha, que representa el 2 % de la Gran Área Metropolitana (GAM) del país y recorre 5 cantones, sin la división territorial administrativa (DTA).	NO	Ver en Web
Usos de la Tierra CBIMA 2021 con DTA	El mapeo de usos de la tierra para el año 2021 que se realizó en el Corredor Biológico Interurbano María Aguilar (CBIMA) con la división territorial administrativa (DTA).	NO	Ver en Web

Fuente: <https://www.snitcr.go.cr/>

Se realizó una actualización y unificación de estas capas para marzo del 2023, usando como referencia un mosaico generado con imágenes Sentinel-2, así como imágenes de Google Earth e imágenes orto rectificadas obtenidas del SNIT. La vegetación fotosintéticamente activa refleja el infrarrojo cercano, por lo que al utilizar la banda infrarroja (banda 8) en el mosaico Sentinel-2, la vegetación se resalta en tonos rojizos, favoreciendo la identificación de la trama verde y la clasificación de la cobertura (Figura 13).

Figura 13. Mosaico Sentinel 2 del CBIMA, para marzo del 2023



Elaborado con imágenes del sensor Sentinel 2 para marzo de 2023.

Para la presente investigación, las clases y categorías de clasificación originales se agruparon en 7 diferentes macroclases. Las clases de Trama Verde pertenecientes a las categorías de Áreas verdes en zona urbana y Vías con vegetación, así como la clase de Regeneración natural, que presentaba muchos casos de regeneración natural temprana, se agruparon en una sola macroclase con el nombre de Áreas verdes en zonas urbanas. Las restantes macroclases corresponden a las otras categorías de la clasificación original, quedando los diferentes tipos de cobertura distribuidos en las siguientes macroclases:

- A. Áreas verdes en zonas urbanas
- B. Bosques y áreas naturales
- C. Cuerpos de agua
- D. Cultivos permanentes
- E. Ganadería y pastos
- F. Sin vegetación
- G. Infraestructura (zonas urbanizadas).



Para el caso del análisis relacionado con el primer objetivo específico, se planteó como hipótesis que existen diferencias significativas entre la LST de la infraestructura (macroclase G) y la LST de los diferentes tipos de trama verde (macroclases A y B). Por esta razón, se seleccionaron únicamente estas tres macroclases para realizar este primer análisis estadístico.

Es importante aclarar que las macroclases descartadas para este análisis no estaban presentes en todas las zonas de elevación y, en algunos casos, presentaban una cantidad insuficiente de datos para obtener una muestra balanceada. En caso de haber realizado un análisis incluyendo estas macroclases y siguiendo la misma metodología, habría resultado en una muestra con bloques incompletos y un desbalance en la proporción de los datos. Esta aclaración es relevante para otros investigadores, ya que, si desean realizar un análisis incluyendo otras macroclases, deberán tener en cuenta este desbalance en la muestra y considerar el uso de modelos mixtos u otras metodologías. Esta situación se debe a las características propias de la zona de estudio, específicamente a la proporción y distribución de los diferentes tipos de cobertura dentro de la microcuenca.

En el caso del análisis utilizando métricas del paisaje, cuya metodología se detalla más adelante, específicamente para el cálculo de los índices de diversidad, como el índice de Simpson o el de Shannon, el desbalance en la distribución de los datos no afecta significativamente. Por lo tanto, pueden considerarse las otras coberturas en el análisis, para así poder estudiar el efecto que tiene la presencia de una mayor o menor variedad de coberturas en la temperatura.

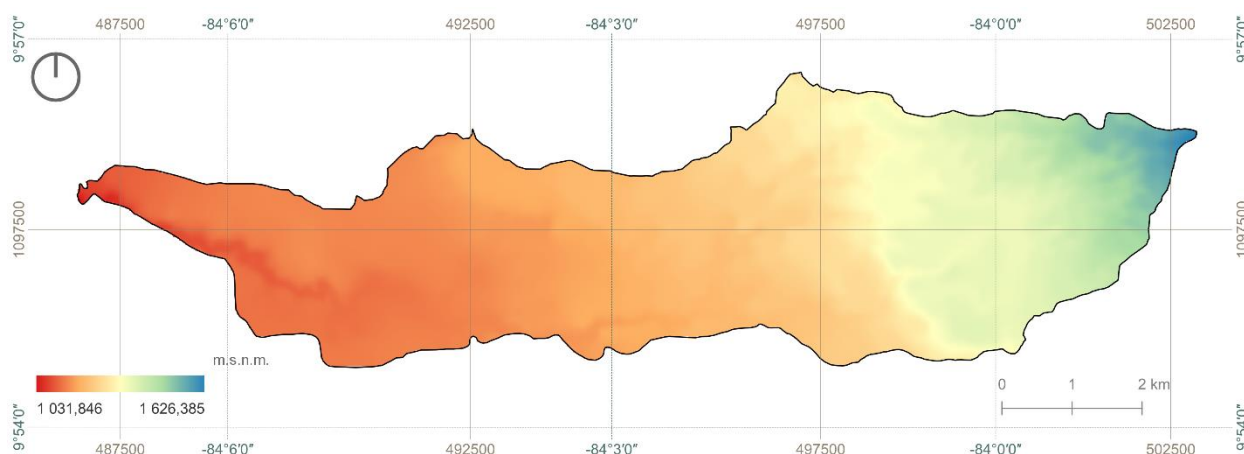
7.2.3 Zonificación de la microcuenca según elevación

El área de estudio presenta un cambio de elevación en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), que va desde 1032 m.s.n.m. en la parte baja hasta 1626 m.s.n.m. en la parte alta de la microcuenca, por lo que fue necesario dividir el área de estudio en diferentes zonas según su elevación. Se realizó una estratificación del área de estudio, definiendo 5 zonas según rangos de elevación (m.s.n.m.), con el fin de comparar de manera más adecuada las diferencias en



temperatura entre los diferentes tipos de cobertura. Para esto, se utilizó un modelo de elevación digital (DEM) obtenido del Atlas digital de Costa Rica (Ortiz-Malavasi, 2014), el cual se corrigió y cortó con el límite de la microcuenca (Figura 14). Dividir el área de estudio en zonas según intervalos de altitud ayudó a comprender mejor las variaciones en la temperatura de la superficie en función de la elevación, permitiendo identificar tendencias que pueden no ser evidentes si se considera un solo rango de altitud.

Figura 14. Modelo de elevación digital (DEM) del CBIMA corregido



Elaborado a partir del Modelo de elevación digital (DEM) obtenido del Atlas digital de Costa Rica (2014).

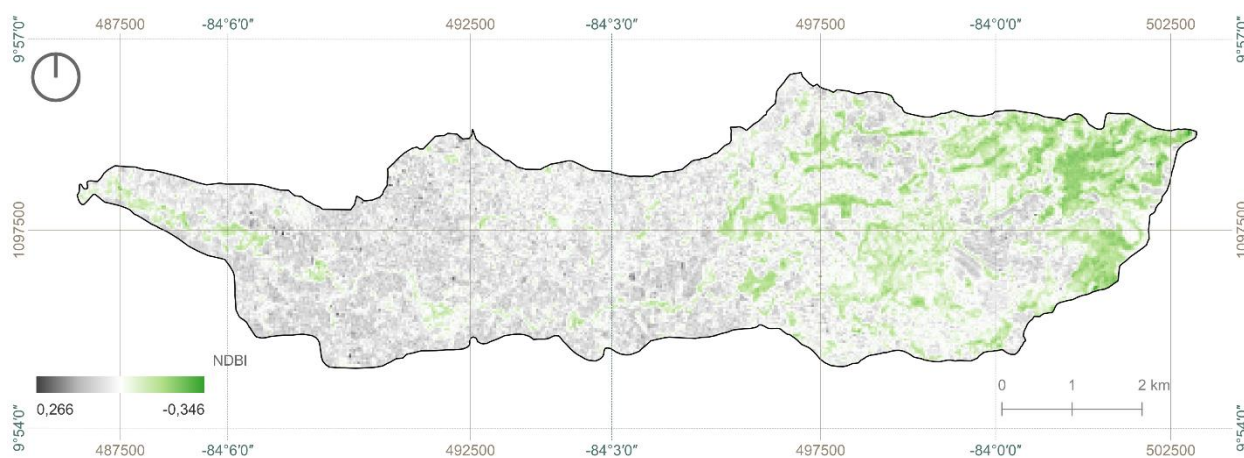
7.2.4. Selección de la muestra

Primeramente, se seleccionaron datos de forma sistemática, con el fin de obtener la mayor cantidad de datos posible y a la vez reducir el impacto de ciertos factores que podrían alterar los resultados. El CBIMA presenta en algunos sectores grandes extensiones de un mismo tipo de cobertura, como ocurre en el sector oeste donde predominan las infraestructuras. Por esta razón, la capa vectorial de cobertura contiene polígonos de gran tamaño de un solo tipo de cobertura. Los datos de la muestra para el análisis estadístico se extraen de un punto dentro de estos polígonos. Para obtener una mayor cantidad de datos y



una muestra más representativa de las coberturas del CBIMA, se generó una cuadrícula de 100 x 100 m, dividiendo los polígonos grandes y obteniendo polígonos con un área máxima de una hectárea. Además, debido a la resolución de 30 m de la capa de LST generada, se decidió conservar solamente los polígonos con un área mayor a 3600 m² (60 x 60 m) y descartar aquellos con áreas menores, ya que los datos de temperatura obtenidos a partir de polígonos con un área menor a 3600 m² podrían estar afectados por varios tipos de cobertura. Como resultado de este proceso se obtuvo una capa de puntos con 4146 datos de LST distribuidos de forma bastante homogénea dentro del área de estudio. Posteriormente, se calculó el Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI), utilizando las bandas 5 y 6 de imágenes Landsat 8 para marzo del 2023 (Figura 15). Se descartaron los datos pertenecientes a los usos diferentes a trama verde e infraestructura (Cuerpos de agua, Cultivos permanentes, Ganadería y pastos y Sin vegetación), así como los datos de infraestructura que presentaron un NDBI menor a -0,1, con el fin de descartar datos de zonas urbanizadas que podrían estar afectados por otros usos.

Figura 15. Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI), marzo 2023



Elaborado utilizando las bandas 5 y 6 de imágenes Landsat 8 para marzo del 2023.

Finalmente, se determinó cual tipo de cobertura tenía menor cantidad de datos en cada zona y se seleccionaron de forma aleatoria igual cantidad de datos para los otros dos tipos de cobertura, obteniendo así una muestra balanceada en la cantidad de datos por uso. La muestra total es de 900 datos, de los cuales 300 datos pertenecen a áreas verdes en zonas urbanas (A), 300 datos pertenecen a bosques y áreas naturales (B) y 300 datos pertenecen a infraestructura (G). En el Apéndice A. Modelo cartográfico Objetivo 1 (Selección de muestra) se presenta el proceso realizado en QGIS hasta obtener la muestra para el análisis estadístico.

7.2.5. Análisis estadístico

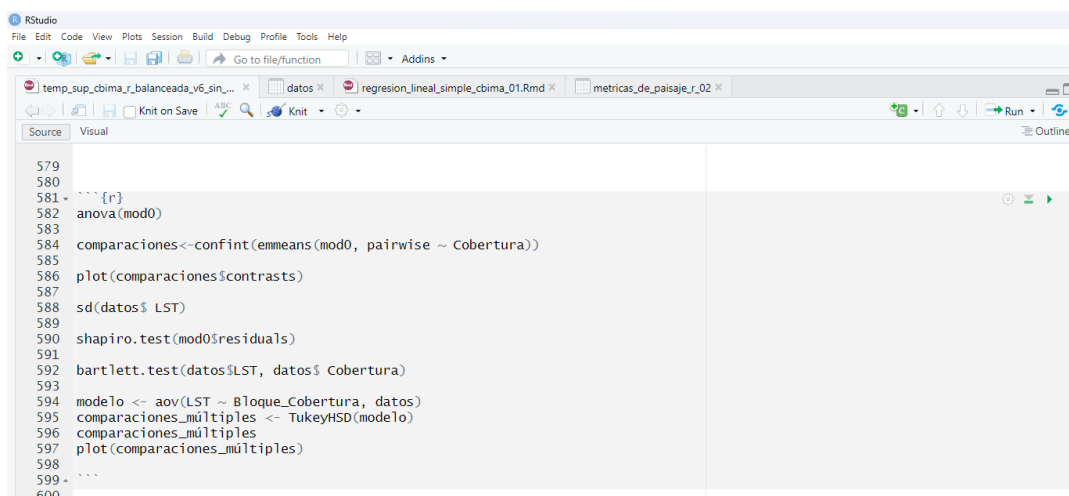
Para el análisis estadístico se utilizó el software RStudio. Se realizó un análisis de los datos por bloques o zonas de elevación, definiendo bloques completos de 3 clases o coberturas en todos los casos.

Análisis descriptivo. Se generaron gráficos de cajas y bigotes (boxplot), por cobertura y por zonas, para una adecuada interpretación visual de los resultados.

Análisis inferencial. Utilizando el software RStudio, se realizaron pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk en los datos, con el fin de determinar si los datos presentan una distribución normal. También se realizó la prueba de Bartlett, para determinar la homogeneidad de las varianzas. Se realizó un análisis de la varianza (ANOVA), para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de los tipos de cobertura, donde la hipótesis nula planteada supone que no existen diferencias significativas entre las medias de los diferentes tipos de cobertura, mientras que la hipótesis alternativa supone que hay al menos una diferencia significativa entre las medias de los diferentes tipos de cobertura. El ANOVA no identifica dónde se encuentran las diferencias significativas entre grupos; por lo tanto, se realizó la prueba de Tukey, para comparaciones múltiples. Se realizaron comparaciones de medias de los 3 tipos de cobertura en cada zona, así como comparaciones entre las medias de cada tipo de cobertura según las zonas de elevación. En la Figura 16 se muestran algunas de las funciones utilizadas en RStudio para el análisis estadístico.



Figura 16. Funciones de RStudio utilizadas en el análisis estadístico



```

579
580
581 - ---- {r}
582 anova(mod0)
583
584 comparaciones<-confint(emmeans(mod0, pairwise ~ Cobertura))
585
586 plot(comparaciones$constrasts)
587
588 sd(datos$LST)
589
590 shapiro.test(mod0$residuals)
591
592 bartlett.test(datos$LST, datos$ Cobertura)
593
594 modelo <- aov(LST ~ Bloque_Cobertura, datos)
595 comparaciones_múltiples <- TukeyHSD(modelo)
596 comparaciones_múltiples
597 plot(comparaciones_múltiples)
598
599 - ----
600

```

Script elaborado en RStudio para análisis estadístico de datos de la muestra obtenida.

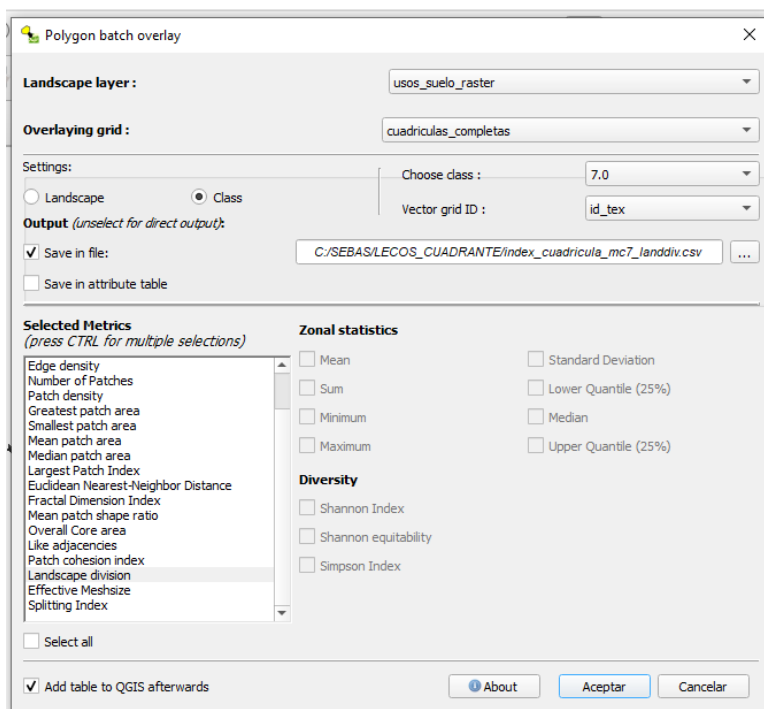
7.3. Análisis de la morfología urbana utilizando métricas del paisaje

7.3.1. Cálculo de métricas del paisaje

Se generó una cuadrícula de 300x300m (90000 m²), con las herramientas de investigación de QGIS, para el límite del CBIMA, tomando en consideración tanto la resolución de las imágenes Landsat 8, como la escala descrita por Stewart & Oke (2012) para las Zonas Climáticas Locales, las cuales se definen como regiones que pueden extenderse desde cientos de metros hasta varios kilómetros en escala horizontal. Posteriormente, se seleccionaron los cuadrantes completos y se cortó la capa del uso del suelo con cada cuadrante, se rasterizó el uso del suelo con la variable macroclase y se calculó las métricas de los fragmentos (Figura 17) y las métricas del paisaje (Figura 18) para cada cuadrante con LecoS. Además, se calculó la LST media para cada cuadrante (Figura 19), así como la elevación media, a partir del modelo de elevación del terreno. Se conformó una base de datos con las variables y se hizo un análisis de componentes principales con el Software InfoStat para seleccionar las métricas del paisaje que mejor expliquen la LST (Figura 20).

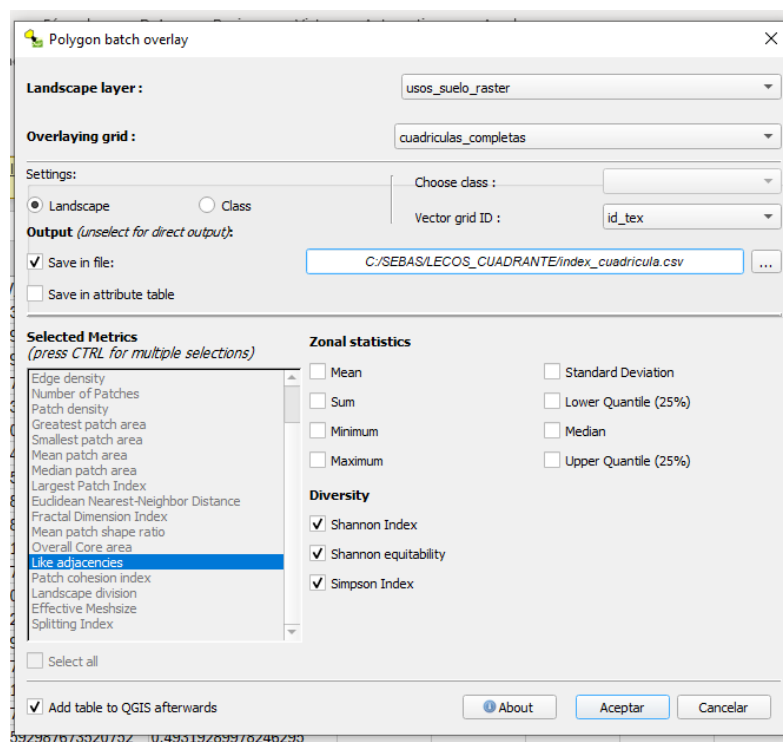


Figura 17. Métricas de los fragmentos



Proceso de cálculo de métricas de los fragmentos con la herramienta LecoS, en QGIS.

Figura 18. Métricas del paisaje



Proceso de cálculo de métricas del paisaje con la herramienta LecoS, en QGIS.

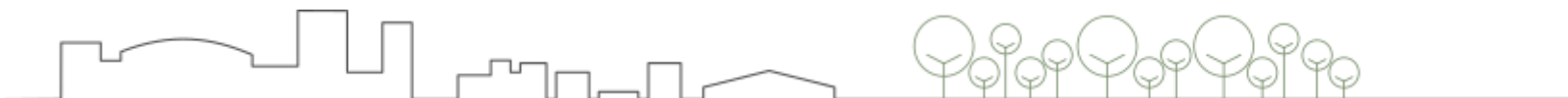
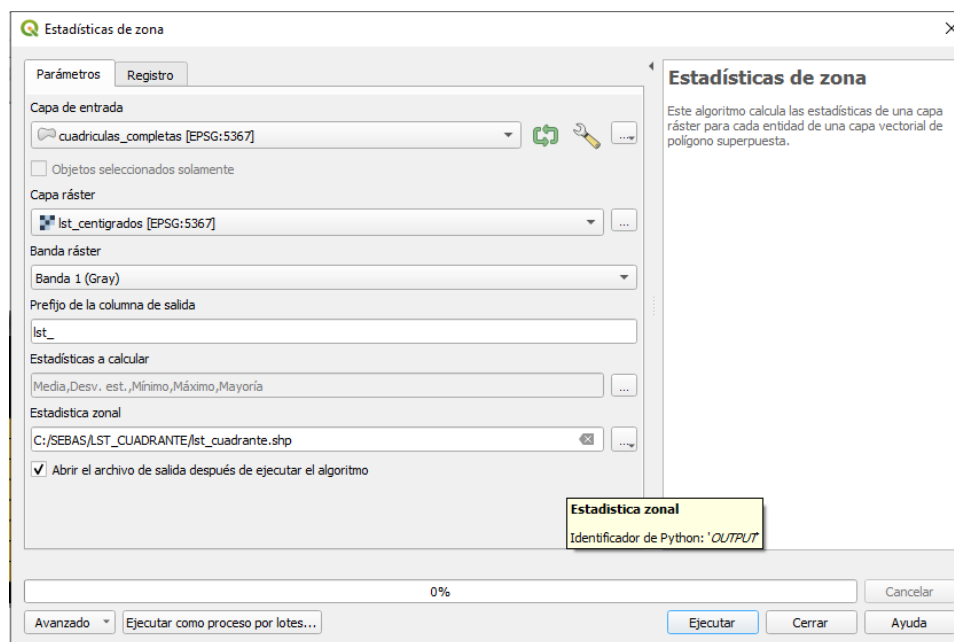
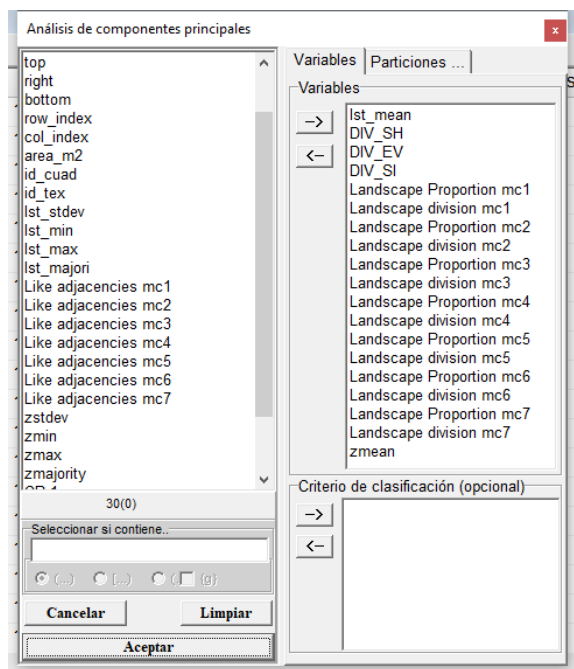


Figura 19. LST promedio

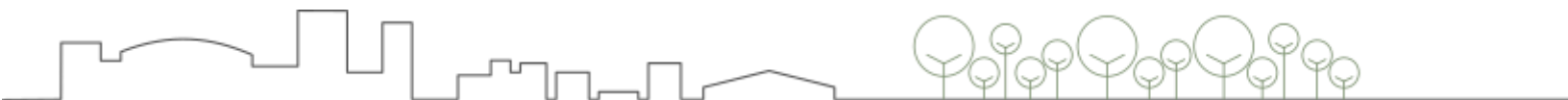


Proceso de cálculo de LST para cuadrículas, utilizando estadísticas de zona, en QGIS.

Figura 20. Análisis de componentes principales



Proceso para análisis de componentes principales con el Software InfoStat.



7.3.2. Análisis estadístico de las métricas del paisaje

Análisis de correlación de las variables. En RStudio, se generó una matriz de correlación de las métricas del paisaje seleccionadas a partir del análisis de componentes principales, para determinar cuáles variables influyentes estaban correlacionadas entre sí y evitar la multicolinealidad en el modelo de regresión.

Análisis de regresión lineal simple. En RStudio se realizó un análisis de regresión lineal simple, utilizando la LST media como variable dependiente, mientras que para la variable predictora se seleccionó la variable más influyente determinada en los análisis anteriores.

7.3.3. Selección de zonas con infraestructura a escala local

Para la selección de zonas con infraestructura a escala local, se consideraron las zonas de elevación 1, 2 y 3, en las cuales se concentra la mayor cantidad de infraestructura en el CBIMA, dejando por fuera las zonas 4 y 5, que presentan un menor porcentaje de infraestructura.

A partir de la capa de LST generada, se seleccionaron las 3 zonas con infraestructura a escala local que presentaron las mayores temperaturas de cada zona, es decir las que presentaron mayor intensidad de ICU. También se seleccionaron las 3 zonas con infraestructura que presentaron las menores temperaturas o baja intensidad de ICU. Para efectos de esta investigación, la intensidad de ICU promedio de cada zona local estudiada es la diferencia entre la LST promedio de la zona local y la LST promedio de los bosques y áreas naturales de la zona de elevación a la que pertenece. En total se seleccionaron 9 zonas a escala local con alta intensidad de ICU y 9 zonas con baja intensidad de ICU.

7.3.4. Métricas del paisaje para zonas locales seleccionadas

Para cada una de las zonas locales seleccionadas, se rasterizó el uso del suelo con la variable macroclase y se calculó las métricas de los fragmentos y las métricas del paisaje, utilizando la herramienta LecoS, en QGIS.



7.3.5. Análisis descriptivo de las zonas locales seleccionadas

Se realizó un análisis utilizando imágenes satelitales, la capa de LST y las métricas del paisaje generadas, con el fin de tener una mejor interpretación de la intensidad de ICU y su relación con las métricas del paisaje.

7.4. Estimación del efecto de enfriamiento de los espacios verdes

7.4.1. Selección de los espacios verdes urbanos

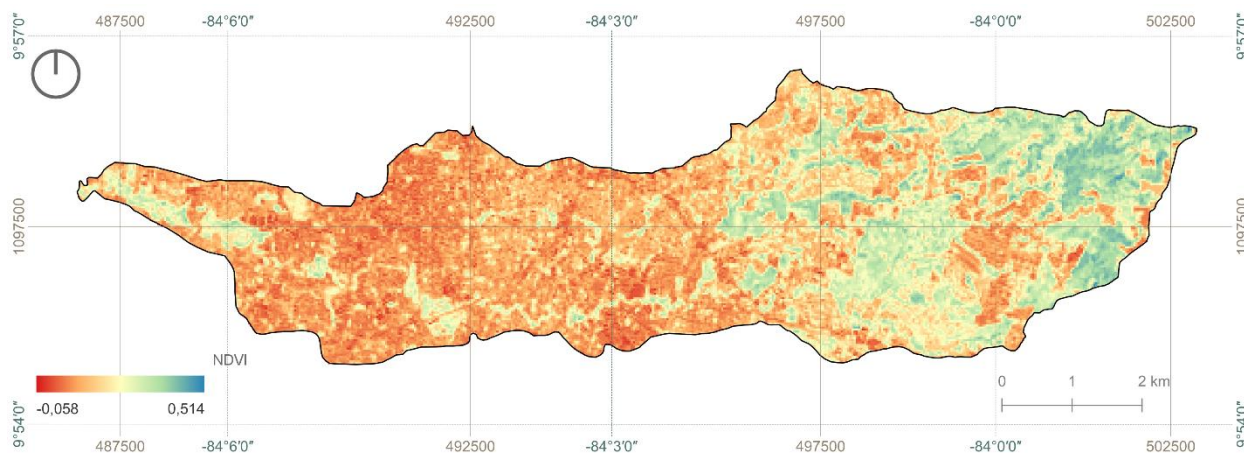
Se seleccionaron 20 espacios verdes dentro del área de estudio, con diferencias en tamaño, forma y tipo de cobertura; incluyendo parques urbanos pequeños y medianos, así como bloques de bosques y áreas naturales grandes. Utilizando la herramienta de estadísticas de zona de QGIS, se calculó la LST media del interior de cada uno de los espacios verdes seleccionados.

7.4.2. Cálculo de temperatura promedio de la zona circundante

Utilizando el software QGIS, se generó un anillo de 500 m desde el borde de cada uno de los espacios verdes seleccionados. El área entre el borde del espacio verde y el anillo de 500 metros se definió como la zona circundante al espacio verde. Se calculó la LST media de la zona circundante, excluyendo todos los espacios verdes que se encontraron dentro de la zona, para lo cual se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), calculado para marzo del 2023 (Figura 21), considerando un anillo adicional de 30 metros desde el borde de las áreas verdes, a razón de los píxeles que podrían verse afectados por la resolución de la capa de LST generada a partir de imágenes de Landsat 8.



Figura 21. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), marzo del 2023



Elaborado con bandas 4 y 5 de imágenes del satélite Landsat 8 para marzo del 2023.

7.4.3. Generación de anillos cada 30 metros

Se generaron 11 anillos de 30 metros iniciando desde el borde del espacio verde, hasta alcanzar 330 metros. A cada uno de los 11 anillos se les calculó la LST media.

7.4.4. Cálculo de intensidad de enfriamiento por anillo

De acuerdo con Arellano Ramos et al. (2019), la intensidad de enfriamiento (ΔT) es la diferencia de temperatura entre el contexto urbano y el espacio verde. Partiendo de esto, se calculó la intensidad de enfriamiento para cada uno de los anillos utilizando la LST media de cada anillo y la LST media de los espacios verdes, donde la intensidad de enfriamiento es la diferencia entre la LST media del anillo y la LST media del espacio verde. En el Apéndice B. Modelo cartográfico Efecto de enfriamiento Espacios Verdes se muestra el modelo cartográfico del proceso realizado en QGIS hasta el cálculo de la intensidad de enfriamiento.



7.4.5. Estimación de intensidad y extensión máxima de enfriamiento

Con base en los datos obtenidos en el paso anterior, se calculó la intensidad y distancia máxima de enfriamiento de cada espacio verde seleccionado, tomando en consideración la LST media de la zona circundante previamente calculada, aplicando una metodología similar a la empleada por Arellano Ramos et al. (2019) en Barcelona. De esta forma, la intensidad y distancia de enfriamiento máxima del espacio verde es el punto donde la temperatura del anillo igualó o superó la temperatura de la zona circundante o cuando se dio un cambio en la curva de enfriamiento, debido a la influencia de otros espacios verdes en la zona circundante.

7.4.6. Análisis del efecto de enfriamiento de los espacios verdes

Análisis descriptivo. Se realizó un análisis utilizando imágenes satelitales, la capa de LST y los anillos generados, con el fin de tener una mejor interpretación de la intensidad y distancia de enfriamiento de los diferentes espacios verdes. También se generaron gráficos con las curvas de enfriamiento de los espacios verdes utilizando Excel.

Análisis de correlación de la muestra. Se realizó un análisis de correlación, para definir si existe relación entre la intensidad de enfriamiento con el tamaño y la cobertura arbórea de los espacios verdes, por medio de gráficos de dispersión y líneas de tendencia de los datos de la muestra, generados en Excel. Debido al tamaño de la muestra no se realizó inferencia estadística.

7.5. Estrategia de socialización y divulgación de los resultados de la investigación

Se estableció una estrategia de acercamiento y vinculación del proyecto de investigación con diferentes actores relacionados al ordenamiento territorial y la planificación urbana del CBIMA y el GAM, para la divulgación de los resultados y la metodología de la investigación, así como para recibir retroalimentación de expertos y personas involucradas al tema. Se realizaron varias reuniones de forma virtual, incluyendo a representantes de diferentes municipalidades y miembros de la unidad técnica del Proyecto TEVU.



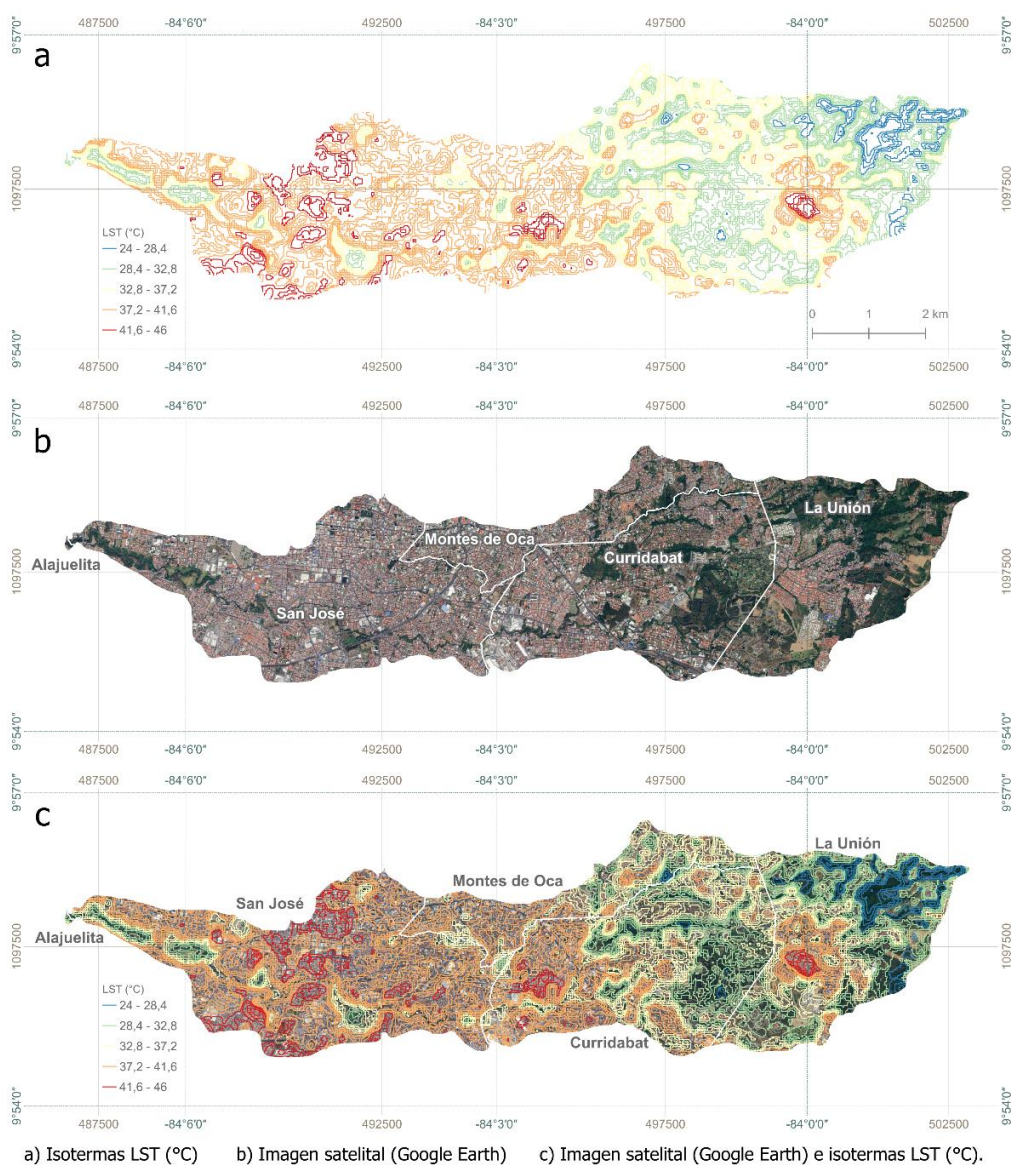
8. Resultados

8.1. Calentamiento urbano y patrones de cobertura

8.1.1. Temperatura de la superficie

La temperatura de la superficie del área de estudio presenta variaciones a lo largo de la microcuenca, que visualmente se puede relacionar con los cambios o variaciones en los tipos de cobertura, tal como se observa en la capa de isotermas para marzo del 2023 (Figura 22).

Figura 22. Isotermas LST, CBIMA, marzo del 2023

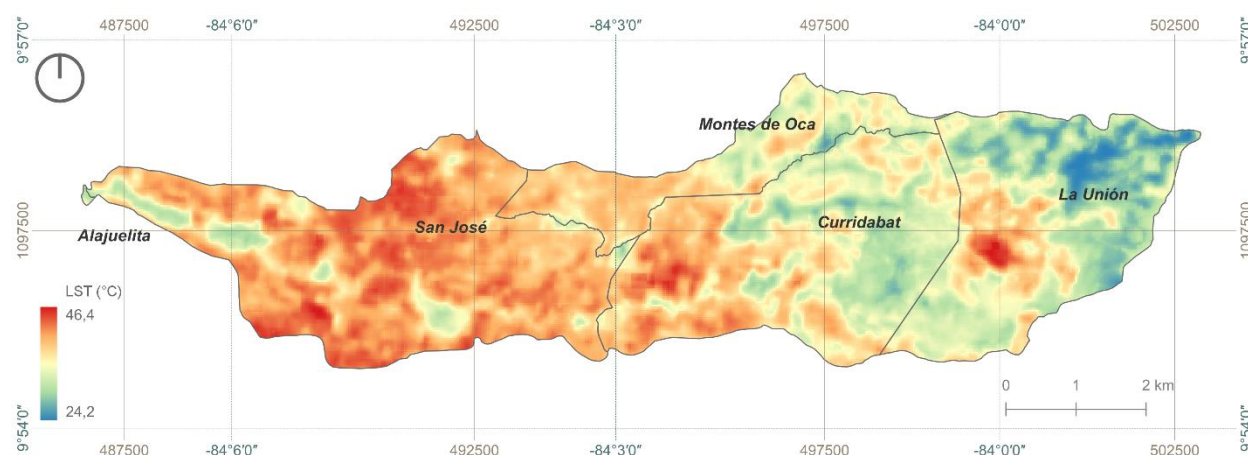


Elaborado en QGIS, a partir de LST del CBIMA e imagen satelital de Google Earth.



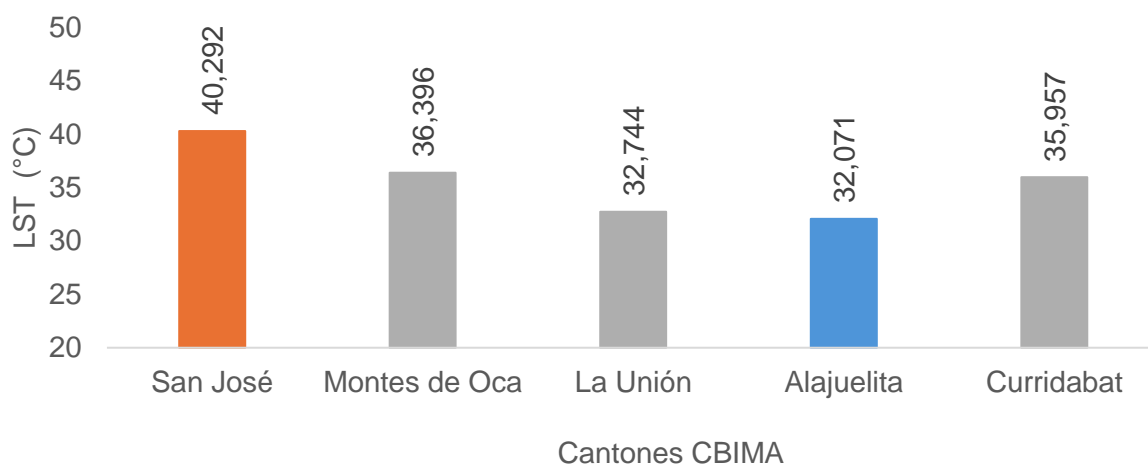
En la Figura 23 se muestra la distribución de LST por cantón, donde es posible observar diferencias importantes en las temperaturas de los cantones, especialmente al comparar el cantón de San José y el cantón de La Unión. En la Figura 24 se muestran la temperatura promedio por cantón. El cantón que presentó la temperatura promedio más alta es San José con 40,292 °C, mientras que el cantón con la temperatura promedio más baja fue Alajuelita con 32,071 °C.

Figura 23. Distribución de LST por cantón (marzo,2023).



Elaborado a partir de LST generada para marzo del 2023.

Figura 24. LST promedio por cantón (marzo,2023)

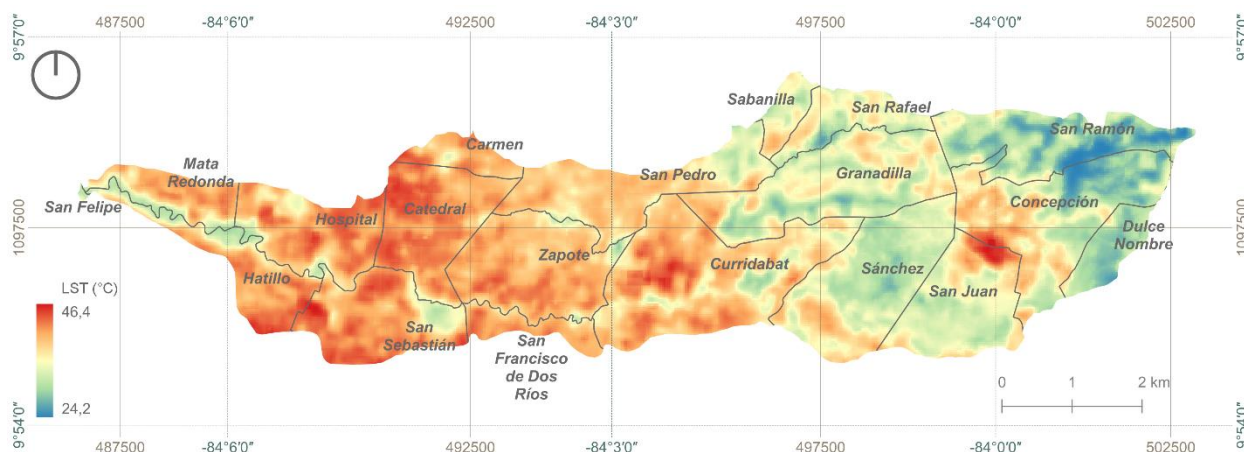


Elaborado a partir de LST generada para marzo del 2023.



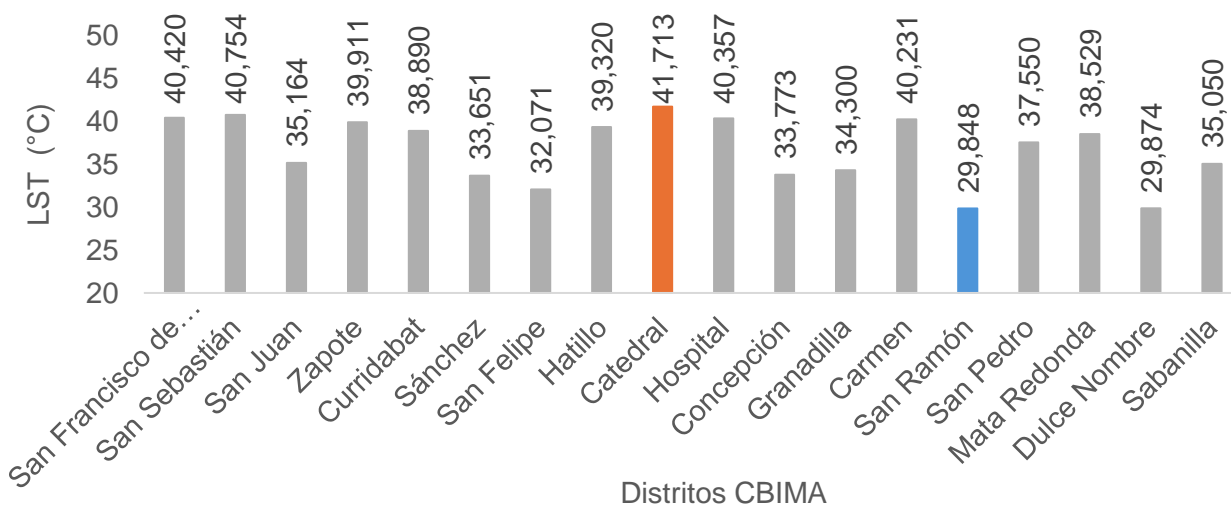
En la Figura 25 se muestra la distribución de LST por distrito, mientras que en la Figura 26 se muestra un gráfico con la temperatura promedio por distrito. El distrito que presentó la temperatura promedio más alta fue Catedral en San José con 41,713 °C, mientras que el distrito con la temperatura promedio más baja fue San Ramón de La Unión con 29,848 °C.

Figura 25. Distribución de LST por distrito (marzo, 2023)



Elaborado a partir de LST generada para marzo del 2023.

Figura 26. LST promedio por distrito (marzo, 2023)



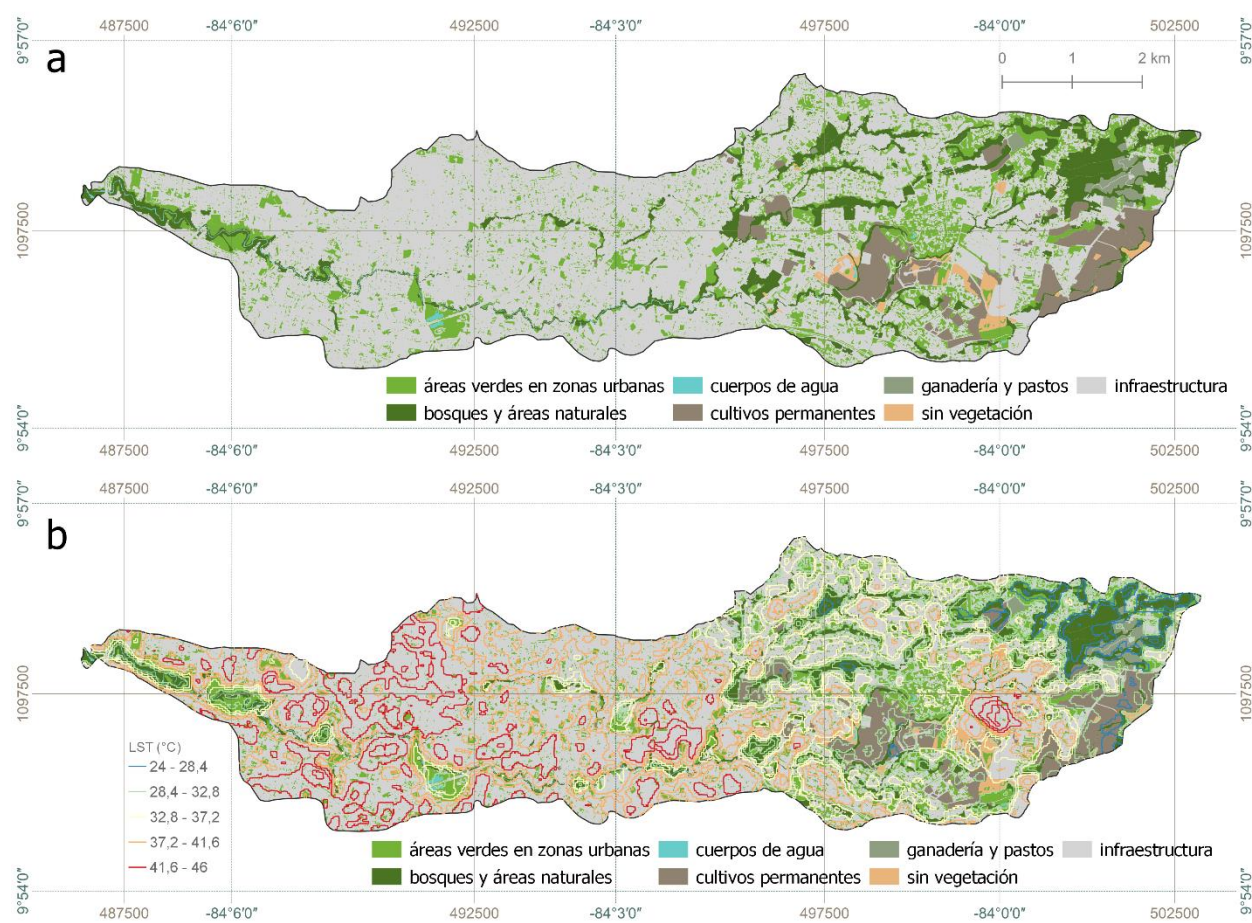
Elaborado a partir de LST generada para marzo del 2023.



8.1.2. Cobertura y uso del suelo

Se generó una capa de cobertura del suelo actualizada para marzo del 2023, agrupando los diferentes usos en 7 macroclases principales (Figura 27). Las zonas más densamente urbanizadas se encuentran al oeste de la microcuenca, mientras que en el sector este existe una mayor diversidad de usos y menos densidad de infraestructura.

Figura 27. Cobertura del suelo del CBIMA actualizada para marzo del 2023



a) Cobertura CBIMA, marzo 2023. b) Cobertura CBIMA e isotermas LST (°C), marzo 2023.

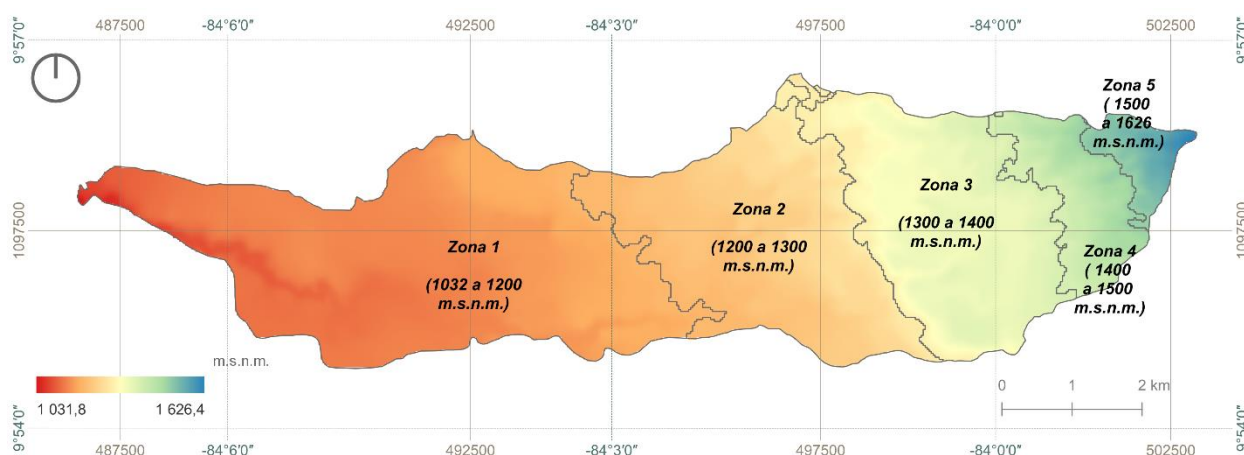
Cobertura modificada y actualizada para marzo 2023, a partir de las clasificaciones supervisadas de Trama Verde y Usos de la Tierra del CBIMA del año 2021, realizadas por el Proyecto Paisajes Productivos en conjunto con MINAE (MINAE-SINAC-PNUD, 2022).



8.1.3. Zonas según elevación (m.s.n.m.)

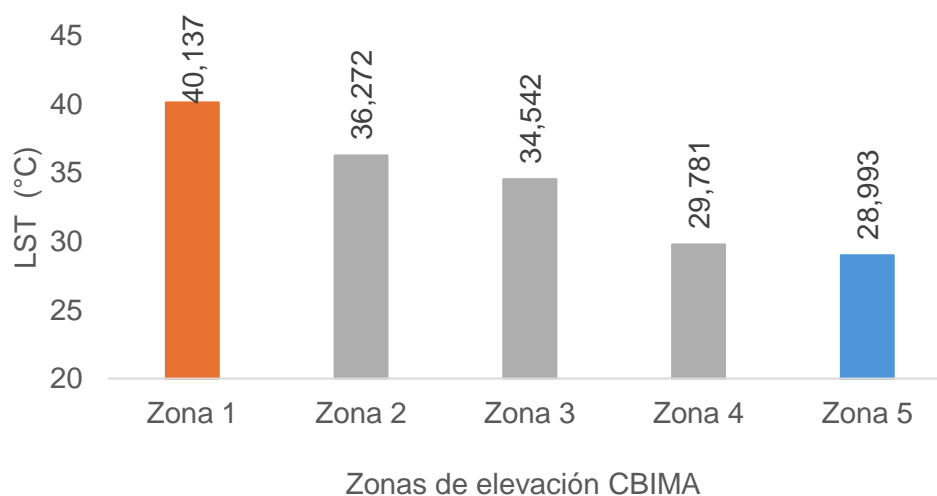
Se realizó una estratificación de la zona de estudio según la elevación (m.s.n.m.), definiendo 5 zonas (Figura 28). La zona 1, corresponde a la parte baja de la microcuenca y es la más extensa de las 5 zonas. La zona 5 corresponde a la parte alta de la microcuenca. En la Figura 29 se muestra la temperatura promedio de cada zona, donde se observa como la LST disminuye conforme la altitud en m.s.n.m. aumenta.

Figura 28. Zonas según elevación en m.s.n.m.



Elaborado a partir del Modelo de elevación digital (DEM) obtenido del Atlas digital de Costa Rica (2014).

Figura 29. LST promedio por zonas de elevación en m.s.n.m. (marzo, 2023)



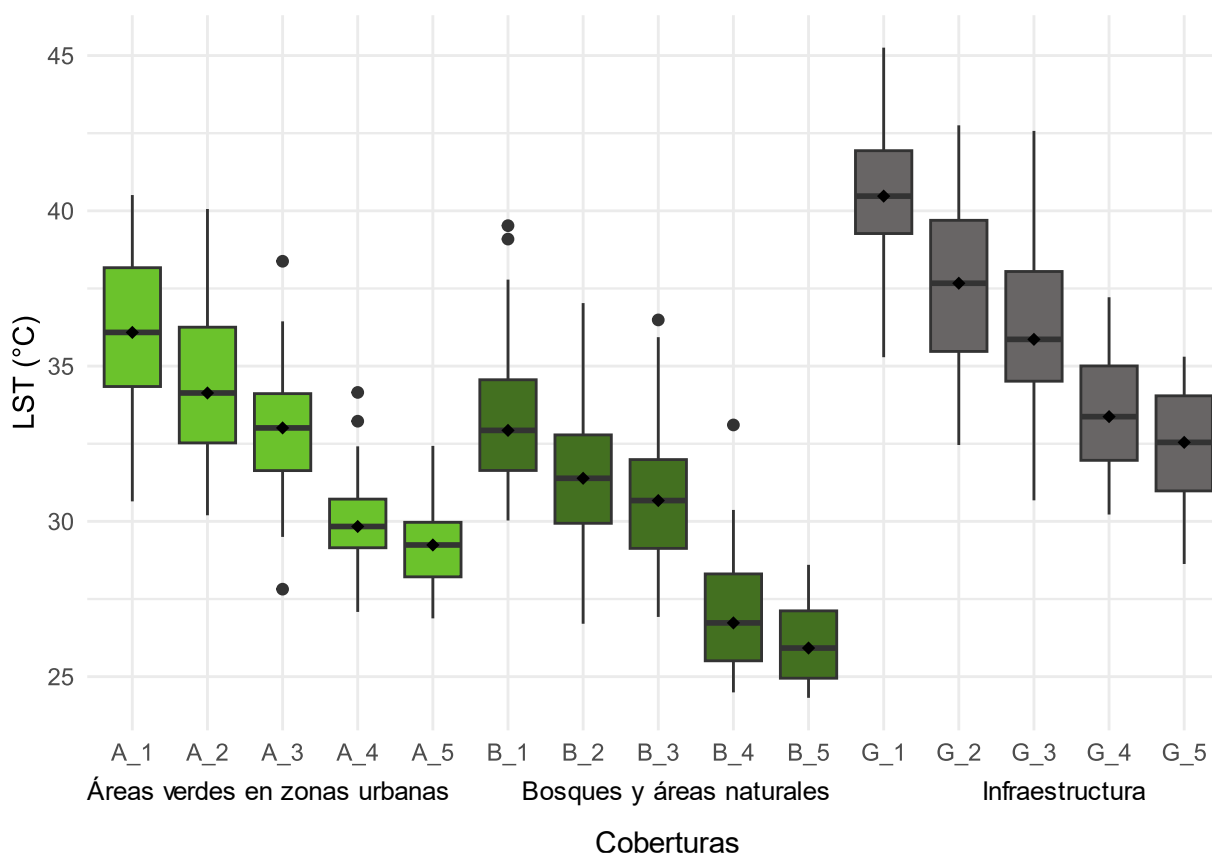
Elaborado a partir de LST generada para marzo del 2023.



8.1.4. Análisis estadístico de LST y coberturas por bloques de elevación

Análisis descriptivo. Se generó un diagrama de cajas y bigotes o boxplot de los datos de la muestra, observando las variaciones de los tipos de coberturas según las zonas de elevación (Figura 30), donde se percibe un patrón descendente de la temperatura de los tres tipos de cobertura conforme aumenta la altitud de la zona de elevación, confirmando la importancia de la estratificación por elevación.

Figura 30. Variación de LST de cada tipo de cobertura según la zona de elevación



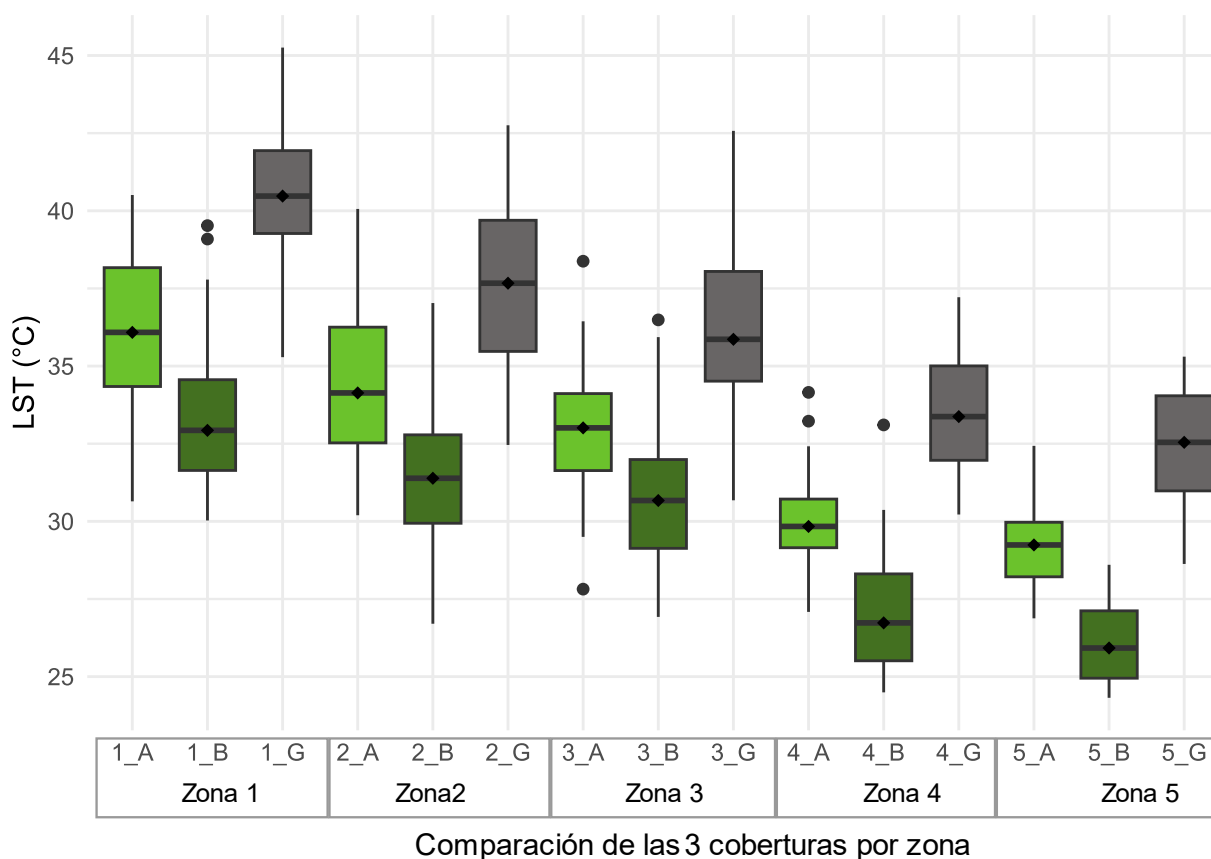
Elaborado en RStudio, utilizando los datos de la muestra seleccionada.

Nota: En el eje X del gráfico se indican las coberturas según macroclase y zonas de elevación. Las letras indican la macroclase, donde: A = Áreas verdes en zonas urbanas, B = Bosques y áreas naturales y G = Infraestructura. Los números indican las zonas de elevación en m.s.n.m., donde: 1 = Zona 1, 2 = Zona 2, 3 = Zona 3, 4 = Zona 4 y 5 = Zona 5.



Se generó otro diagrama de cajas y bigotes o boxplot de los datos para observar la relación de los tres tipos de coberturas en cada zona (Figura 31), siendo posible apreciar un patrón repetitivo al comparar los 3 tipos de cobertura en cada zona, donde la cobertura de bosques y áreas naturales (B) presenta la temperatura más baja, mientras que la infraestructura (G) presenta la temperatura más alta en cada una de las zonas, sugiriendo que existen diferencias significativas entre los diferentes tipos de cobertura.

Figura 31. Comparación de LST de las 3 coberturas por zona de elevación



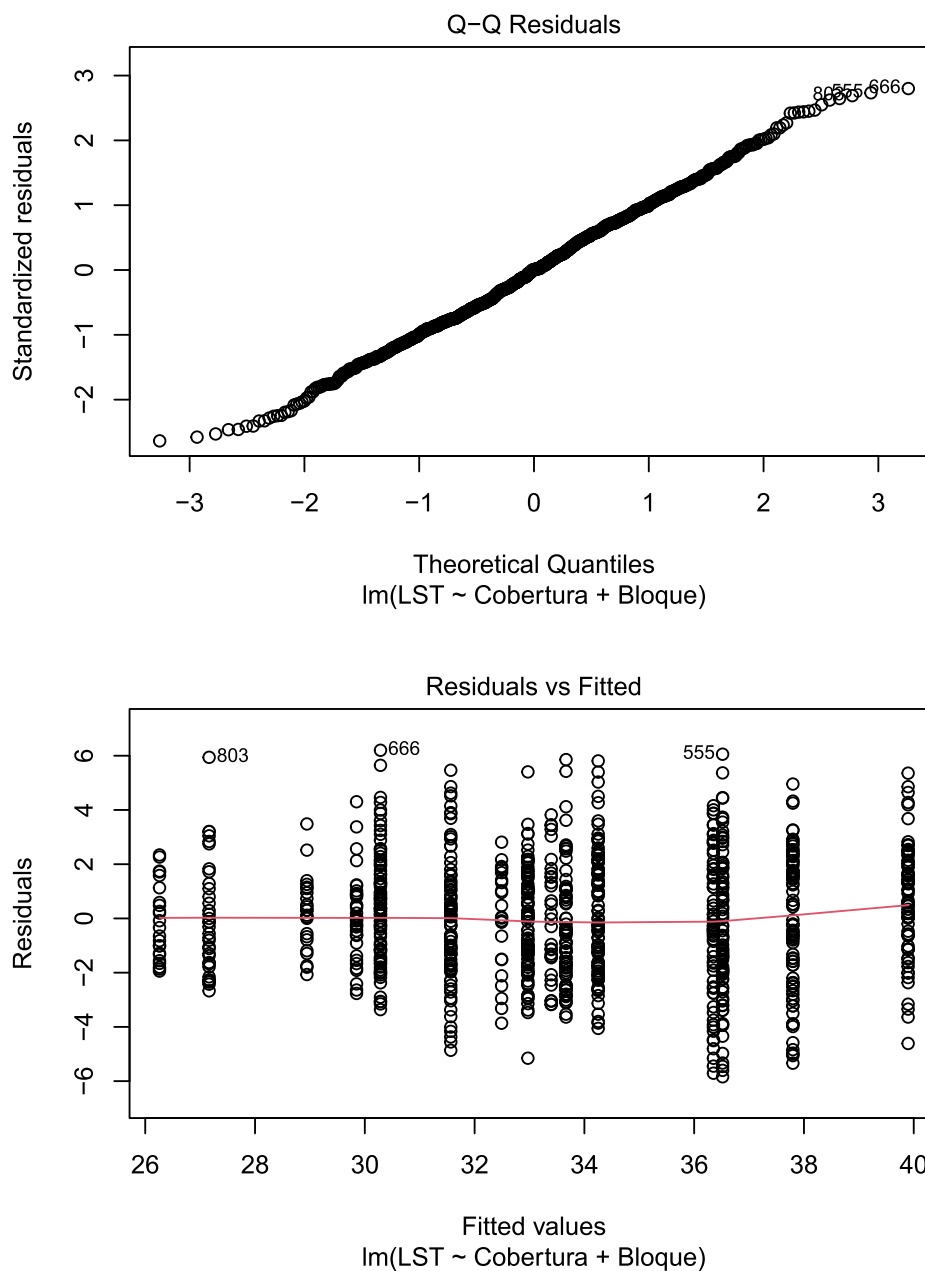
Elaborado en RStudio, utilizando los datos de la muestra seleccionada.

Nota: En el eje X del gráfico se indican las coberturas según macroclase y zonas de elevación. Las letras indican la macroclase, donde: A = Áreas verdes en zonas urbanas, B = Bosques y áreas naturales y G = Infraestructura. Los números indican las zonas de elevación en m.s.n.m., donde: 1 = Zona 1, 2 = Zona 2, 3 = Zona 3, 4 = Zona 4 y 5 = Zona 5.



Análisis inferencial. La prueba de normalidad de Shapiro Wilk indica un p-valor de 0,1267, mientras que la prueba de Bartlett indica un p-valor de 0,06023. Tanto los gráficos del modelo estadístico (Figura 32) como las pruebas realizadas (Cuadro 1) corroboran los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los datos.

Figura 32. Gráficos del modelo estadístico (QQ-Plot y Residuales vs Predichos)



Gráficos del modelo: Arriba el QQ Plot sugiere un comportamiento normal de los datos. Abajo el gráfico de Residuales vs Predichos sugiere la homocedasticidad de los datos. Elaborado en RStudio.



Cuadro 1. Pruebas de normalidad y homogeneidad de las varianzas

Shapiro-Wilk normality test			
## data: mod0\$residuals			
W =	0,99723	P-value =	0,1267
Bartlett test of homogeneity of variances			
data: datos\$LST and datos\$Cobertura			
Bartlett's K-squared =	5,6193	Df = 2	P-value = 0,06023

Elaborado en RStudio, utilizando los datos de la muestra seleccionada.

El análisis de la varianza (ANOVA) indicó un p-valor $< 2,2e-16$, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se puede afirmar que si existen diferencias significativas en la temperatura de la superficie de al menos 2 de los tipos de cobertura (Cuadro 2).

Cuadro 2. Tabla de análisis de la varianza (ANOVA)

Tabla de análisis de la varianza (ANOVA)						
Variable respuesta: LST						
	Df	SumSq	Mean Sq	Coeficiente F	P- valor	Pr(>F)
Cobertura	2	5951.6	2975.80	602.88	$< 2.2e-16$	***
Bloque	4	4678.8	1169.71	236.98	$< 2.2e-16$	***
Residuals	894	4412.7	4.94			

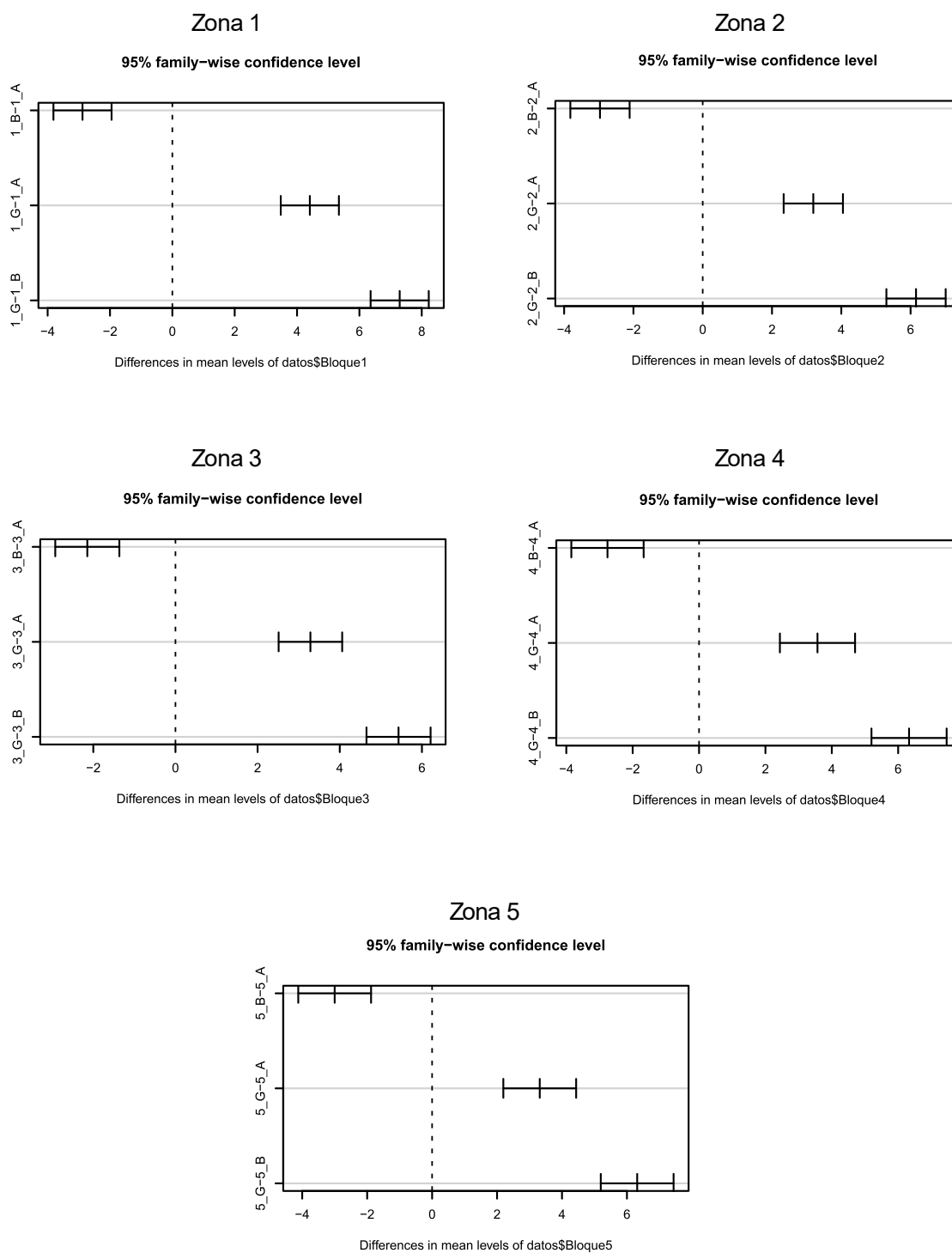
Elaborado en RStudio, utilizando los datos de la muestra seleccionada.

Las pruebas de Tukey de comparaciones múltiples indicaron diferencias significativas entre los 3 tipos de cobertura en cada una de las zonas, por lo que es posible afirmar con un nivel de confianza del 95% que existen diferencias significativas entre los tipos de cobertura en todas las zonas (Figura 33).



Figura 33. Intervalos de confianza de comparaciones múltiples por zonas

**Comparaciones múltiples de Tukey para medias
(Tukey multiple comparisons of means)**



Notas: En todas las comparaciones múltiples se presentan diferencias significativas entre las medias de la temperatura de las 3 coberturas. Elaborado en RStudio.



A partir de estos resultados es posible afirmar que la temperatura de la superficie de los bosques y áreas naturales es significativamente más baja que la temperatura de las áreas verdes en zonas urbanas e infraestructura. Mientras que la temperatura de la infraestructura es significativamente mayor a la temperatura de los otros 2 tipos de cobertura. Esto confirma la importancia de los bosques y áreas naturales en la regulación del clima dentro del CBIMA, así como el aporte de las áreas verdes urbanas para el mejoramiento del confort térmico dentro de las zonas urbanizadas, siendo factores importantes para tomar en cuenta en la planificación urbana sostenible.

8.2. Islas de calor, morfología urbana y métricas del paisaje

8.2.1. Métricas e indicadores influyentes en la temperatura de la microcuena

Con las métricas del paisaje se generó información cuantitativa para comprender la estructura, la configuración y la dinámica de los paisajes naturales y antropogénicos. De un total de 25 métricas calculadas con LecoS y estadísticas de zona de QGIS, para los 357 recuadros dentro de la microcuena, se encontraron 6 métricas del paisaje o indicadores que se consideran influyentes en la LST. Las variables que mejor explican la LST son: proporción de infraestructura (LP-G), fragmentación del paisaje de infraestructura (LD-G), proporción de bosques y áreas naturales (LP-B), fragmentación del paisaje de bosques y áreas naturales (LD-B), índice de diversidad de Simpson (DIV-SI) y la elevación en m.s.n.m (Z). Sin embargo, la matriz de correlación de las variables indica que existe correlación entre ellas (Cuadro 3), por lo tanto, para evitar la multicolinealidad, se seleccionó la variable más influyente, LP-G, para realizar una regresión lineal simple.



Cuadro 3. Matriz de correlación de variables y métricas del paisaje

Variable	LST	DIV_SI	LP_B	LD_B	LP_G	LD_G	Z
Temperatura de la superficie (LST)	1,000	-0,677	-0,657	0,476	0,906	-0,876	-0,778
Índice de diversidad de Simpson (DIV_SI)	-0,677	1,000	0,395	-0,041	-0,717	0,848	0,498
Proporción de bosques y áreas naturales (LP_B)	-0,657	0,395	1,000	-0,853	-0,613	0,589	0,440
Fragmentación de bosques y áreas naturales (LD_B)	0,476	-0,041	-0,853	1,000	0,431	-0,351	-0,333
Proporción de infraestructura (LP_G)	0,906	-0,717	-0,613	0,431	1,000	-0,944	-0,655
Fragmentación de bosques y áreas naturales (LD_G)	-0,876	0,848	0,589	-0,351	-0,944	1,000	0,637
Elevación en m.s.n.m. (Z)	-0,778	0,498	0,440	-0,333	-0,655	0,637	1,000

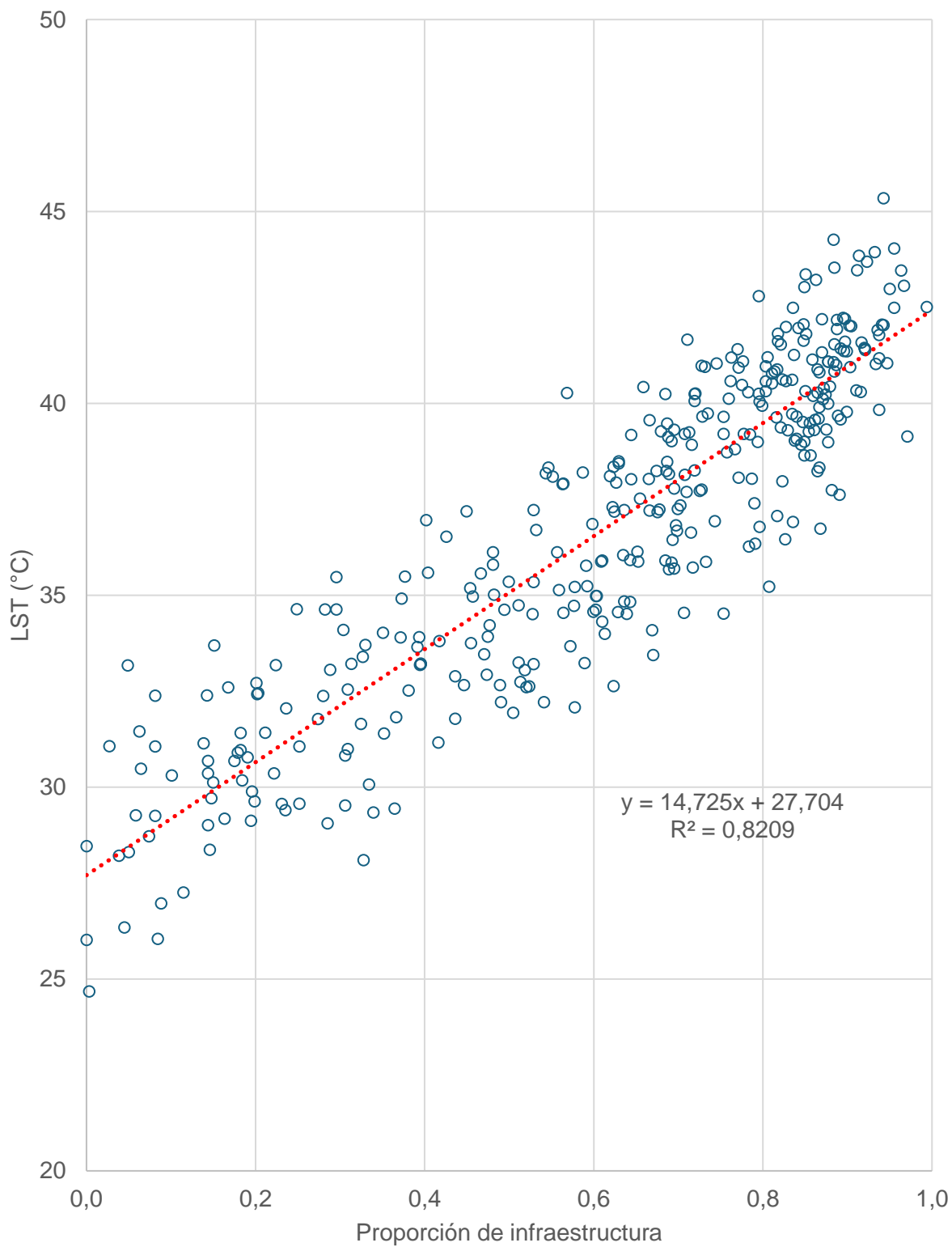
Elaborado en RStudio, utilizando los datos de la muestra seleccionada.

8.2.2. Impacto de la proporción de infraestructura en el calentamiento urbano

El modelo de regresión indicó que existe una relación lineal creciente entre la variable dependiente LST y la variable predictora LP-G. El estimador Beta 1 del modelo tiene un valor de 14,725; definiendo la pendiente creciente de la línea de mejor ajuste del modelo, donde es posible predecir que conforme LP-G aumenta, la LST también aumentará. El R^2 del modelo es de 0,8209, lo que indica que la variable predictora explica en un 82% la LST, por lo que se puede considerar un modelo aceptable para la predicción (Figura 34).



Figura 34. Regresión lineal entre la proporción de infraestructura (LP-G) y la LST



Elaborado en Excel, utilizando los datos de la muestra seleccionada.



Con base en los resultados, se logró determinar una relación lineal creciente de la LST y la LP-G, siendo el factor más influyente en el calentamiento urbano dentro de la microcuenca. También se logró determinar cuáles métricas del paisaje tienen una influencia importante en la temperatura de la zona de estudio, se presentó una relación lineal decreciente de la LST con la proporción de bosques y áreas naturales, donde a medida que la proporción de este tipo de cobertura aumenta, la LST tiende a reducirse. Algo similar ocurre con la elevación en m.s.n.m., donde a medida que la altitud aumenta, la LST disminuye. Otros factores a los que es importante prestar atención es a los índices de diversidad, donde en este caso, el índice de diversidad de Simpson resultó ser más influyente que los otros índices de diversidad calculados. La LD-G y LD-B son factores a los que también se les debe prestar atención.

8.2.3. Zonas locales y calentamiento urbano

Para una mejor comprensión de la relación entre las métricas del paisaje y la intensidad de ICU (Δ ICU), se estudiaron 18 zonas a escala local (zonas locales), 9 de ellas con una alta intensidad de ICU y 9 con baja intensidad de ICU. En la Figura 35 se observa la ubicación de cada zona estudiada. En el Cuadro 4 se presenta la intensidad promedio de ICU, así como la intensidad máxima de ICU para cada zona estudiada. En el Apéndice C. Ubicación y características de zonas locales estudiadas, se muestra un cuadro con información más detallada de las 18 zonas, incluyendo su ubicación, área y otras características.

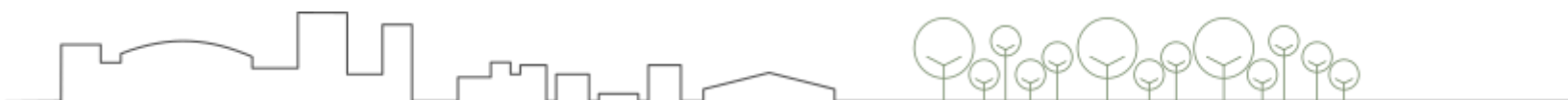
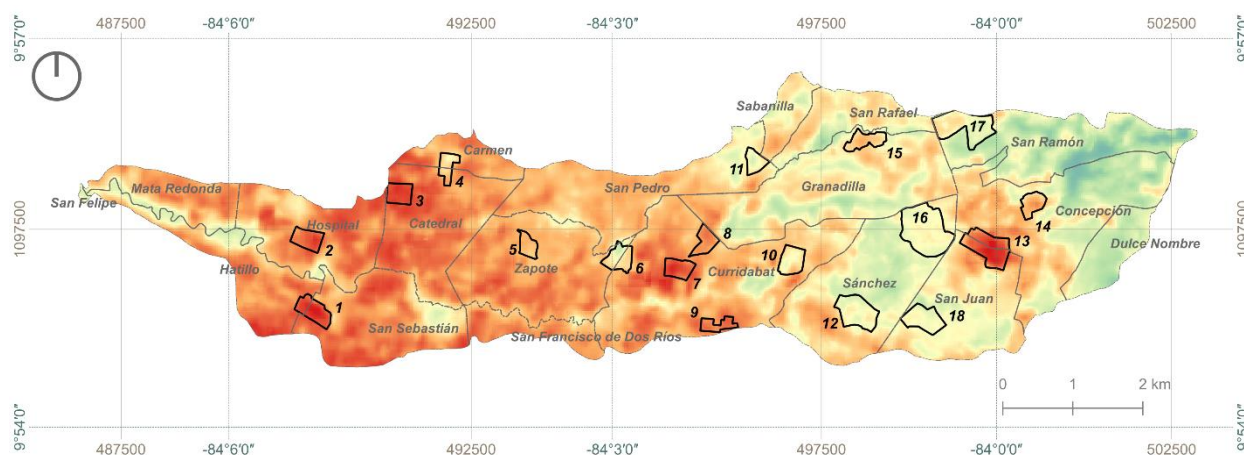


Figura 35. Zonas con infraestructura a escala local para análisis de ICU



Elaborado en QGIS.

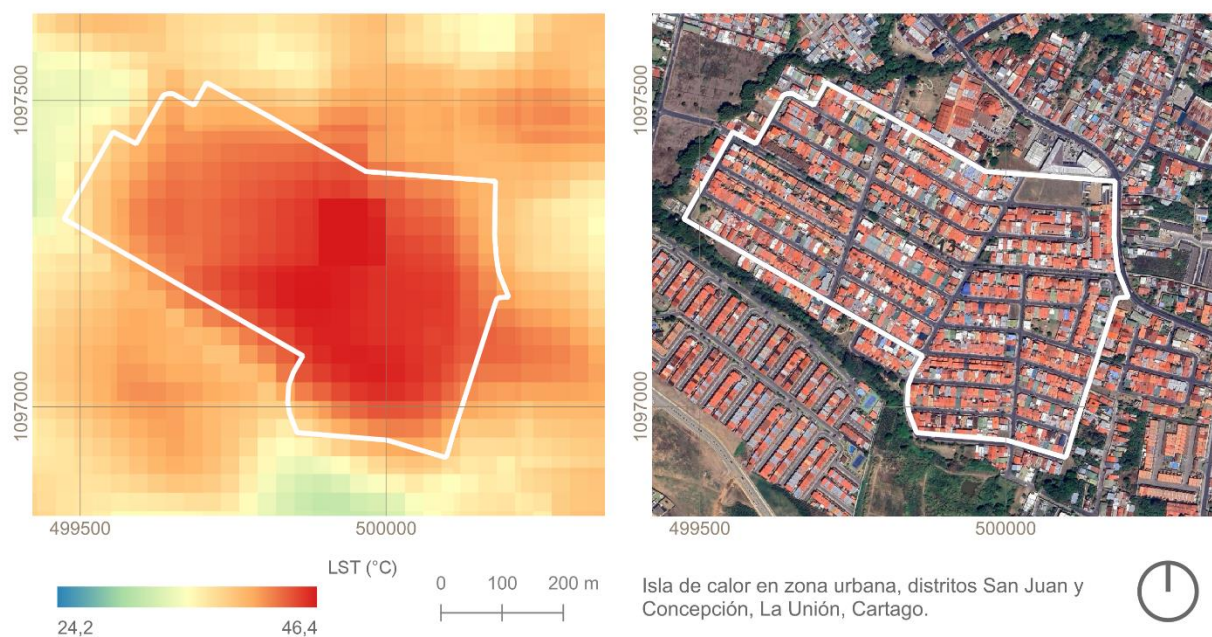
Cuadro 4. Intensidad promedio de ICU e Intensidad máxima de ICU de zonas locales

▲ ICU (°C)			▲ ICU (°C)			▲ ICU (°C)		
id	promedio	máxima	id	promedio	máxima	id	promedio	máxima
1	12,505	14,811	7	12,44	14,688	13	12,841	16,365
2	11,081	13,448	8	9,814	11,412	14	7,712	11,200
3	12,698	13,711	9	11,003	12,216	15	6,282	9,191
4	5,093	9,397	10	4,024	9,339	16	2,23	4,085
5	6,887	8,247	11	2,367	5,437	17	2,377	6,087
6	3,094	7,438	12	1,784	6,376	18	2,06	3,638

Elaborado en Excel.

Zonas locales con alta intensidad de ICU. El promedio de ▲ ICU de las 9 zonas locales con ICU alta fue de 10,708 °C. La mayor ▲ ICU fue de 16,365 °C y se presentó en la zona local 13 con una ▲ ICU promedio de 12,841 °C y una LP-G de 0,946 (Figura 36).

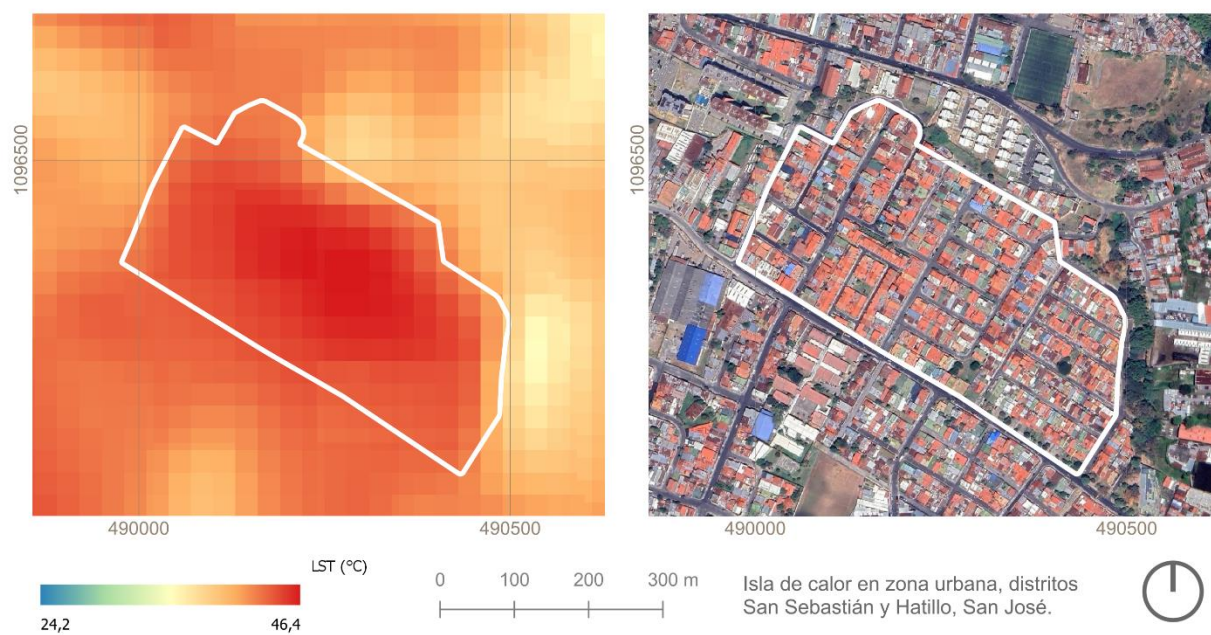
Figura 36. Zona local 13



Elaborado en QGIS.

La zona local 1 también presentó una Δ ICU alta, con un promedio de 12,505 °C, una Δ ICU máxima de 14,811 °C y una LP-G de 0,934 (Figura 37).

Figura 37. Zona local 1

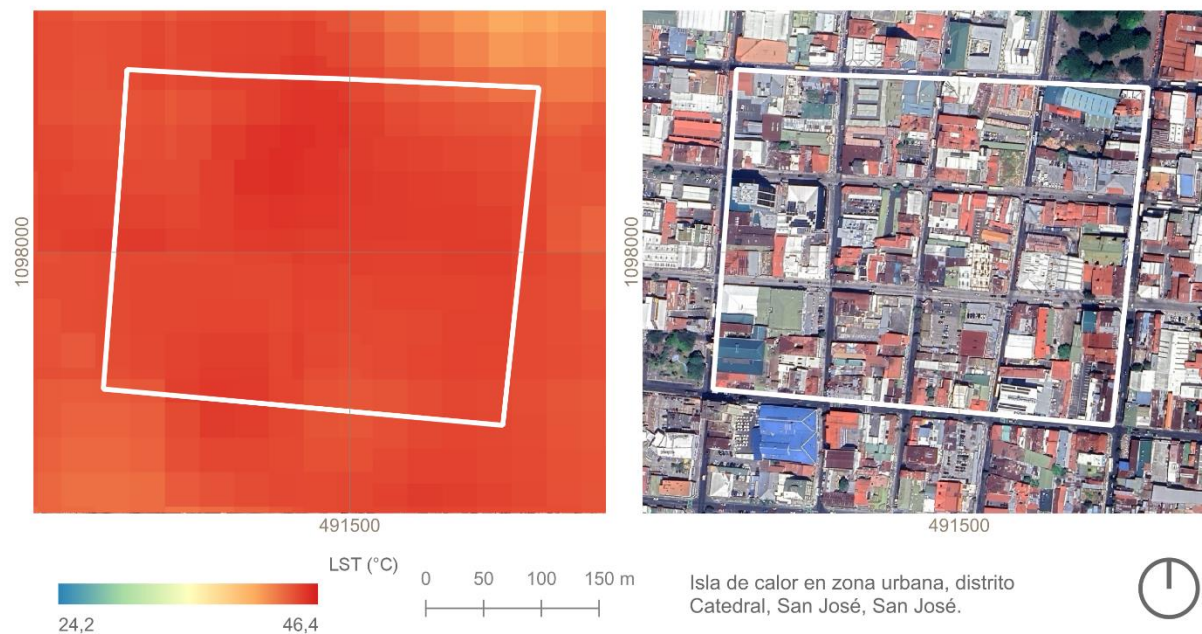


Elaborado en QGIS.



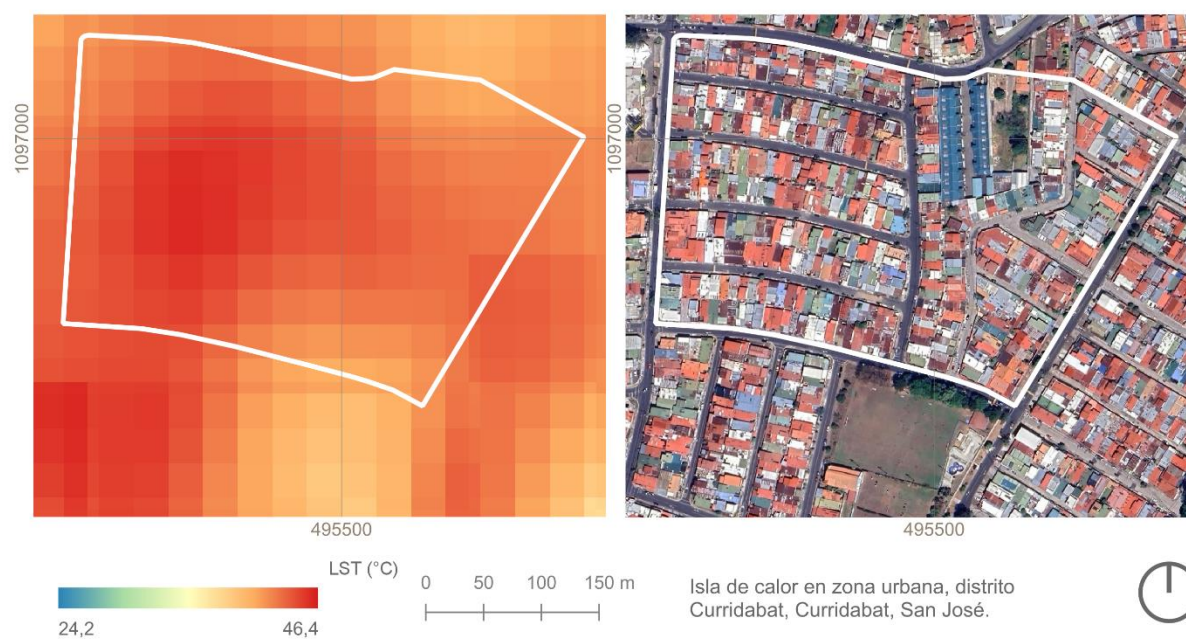
En la Figura 38 y la Figura 39 se muestran otros 2 ejemplos de zonas urbanas con alta intensidad de ICU y alta proporción de infraestructura.

Figura 38. Zona local 3



Elaborado en QGIS.

Figura 39. Zona local 7

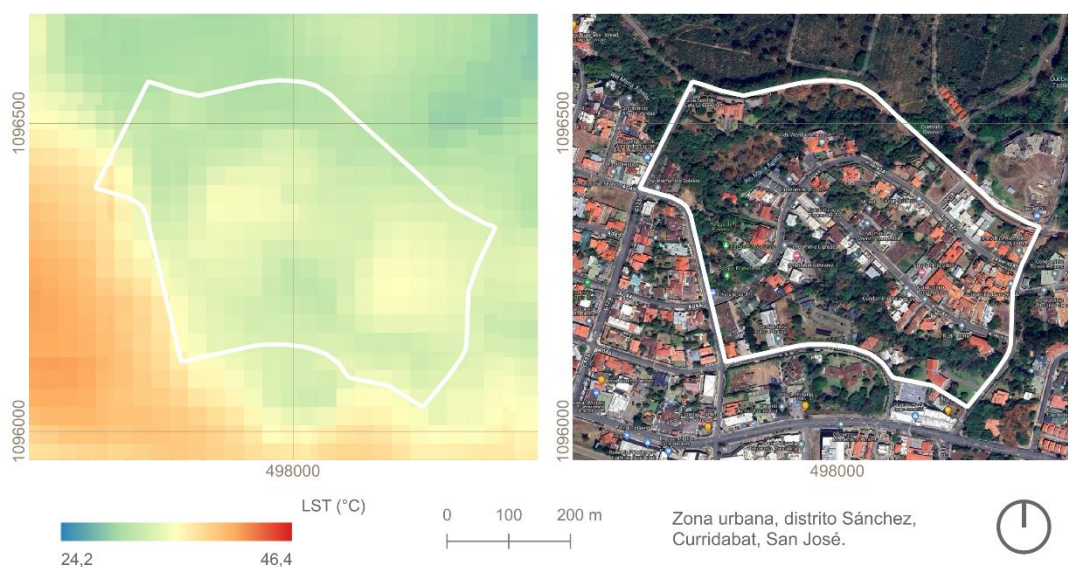


Elaborado en QGIS.



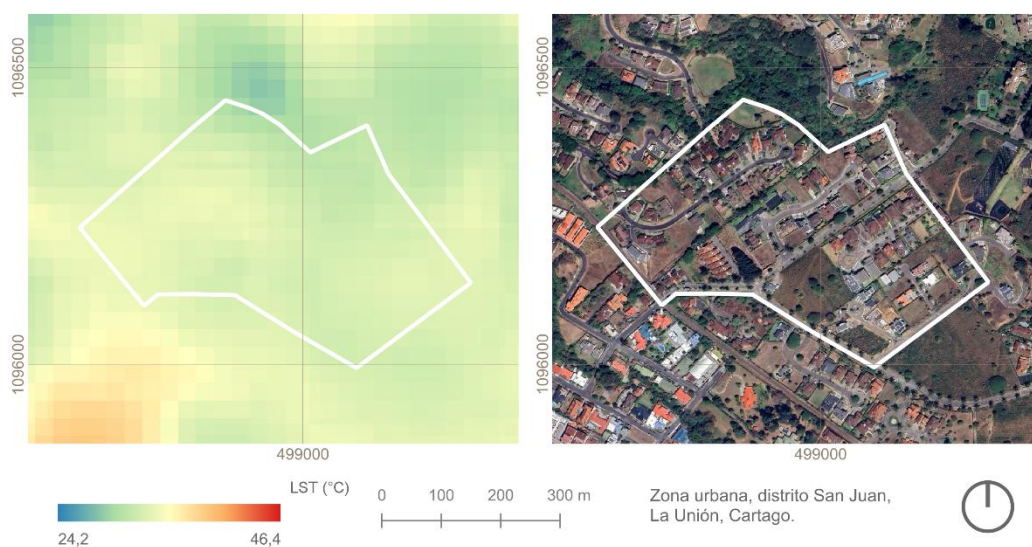
Zonas locales con baja intensidad de ICU. El promedio de Δ ICU de las 9 zonas locales con ICU baja fue de $3,324^{\circ}\text{C}$. Las zonas 12 (Figura 40) y 18 (Figura 41) presentaron las menores Δ ICU promedio, con $1,784^{\circ}\text{C}$ y $2,06^{\circ}\text{C}$ respectivamente. La LP-G de la zona 12 fue de $0,468$, mientras que la LP-G de la zona 18 fue de $0,551$. En la Figura 42 se presenta un diagrama síntesis con información gráfica de las 18 zonas locales estudiadas.

Figura 40. Zona local 12



Elaborado en QGIS.

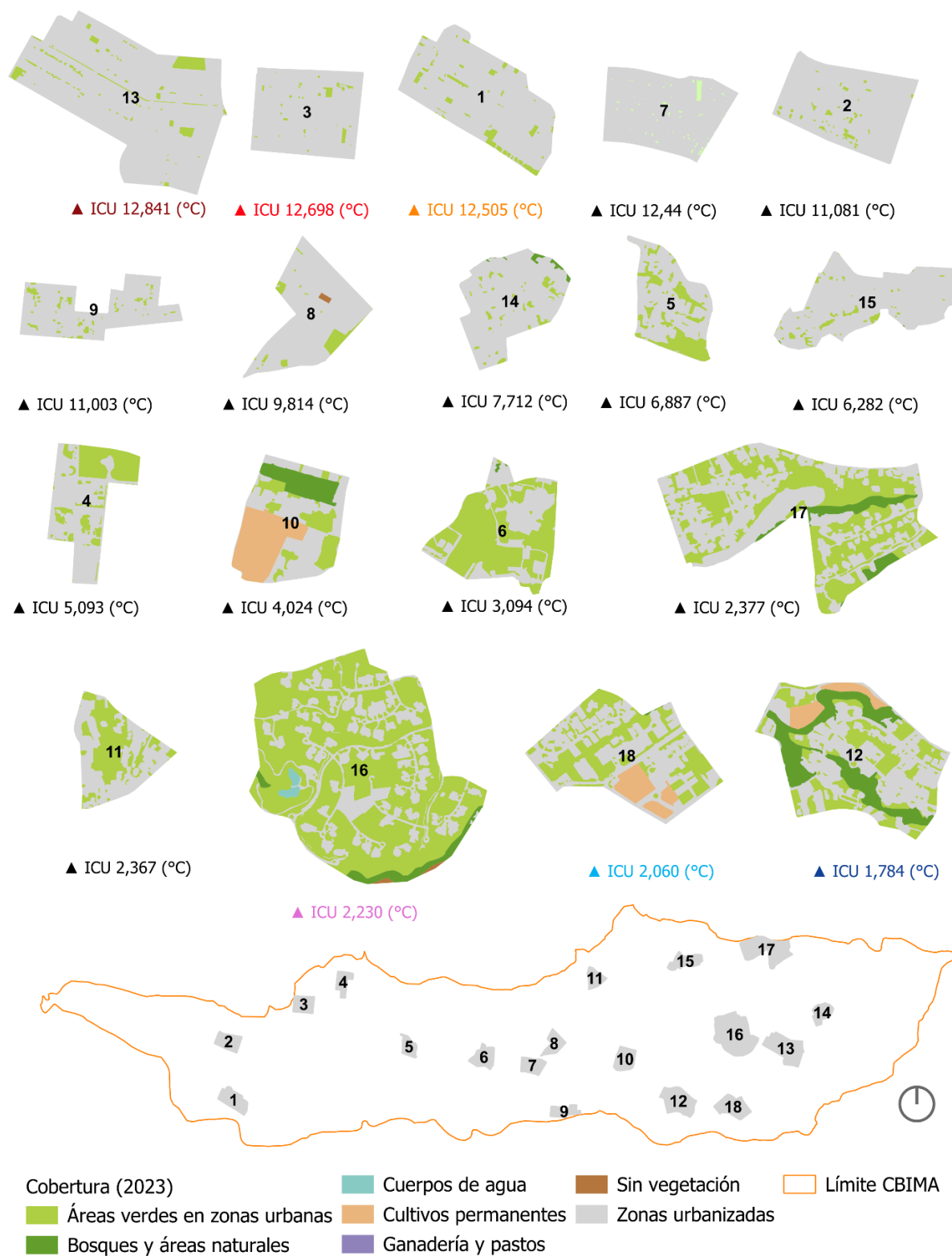
Figura 41. Zona local 18



Elaborado en QGIS.



Figura 42. Diagrama síntesis de zonas locales estudiadas



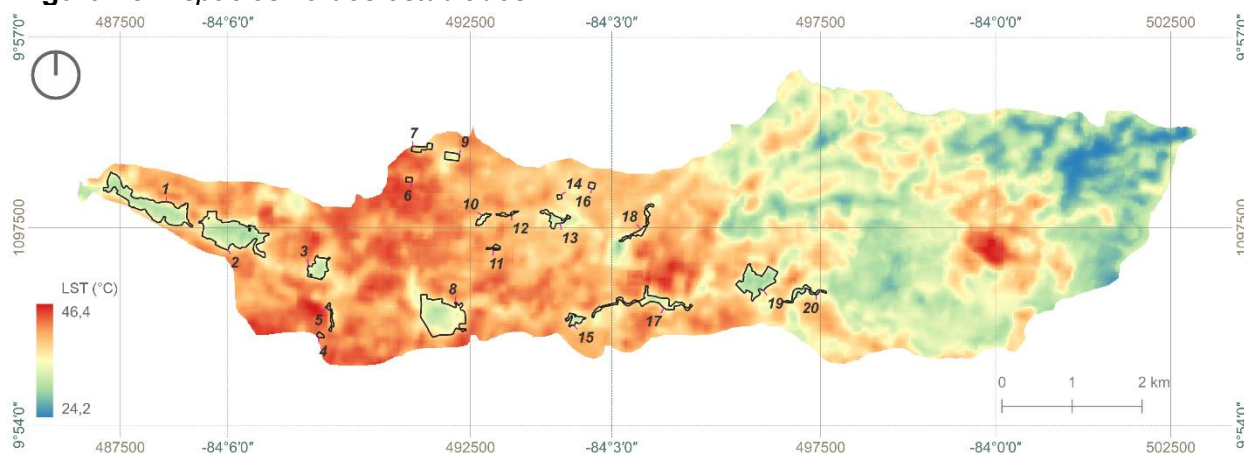
Se muestran las 18 zonas locales estudiadas, ordenadas de mayor a menor intensidad de ICU. Elaborado en QGIS.

Estos resultados respaldan lo observado en el análisis estadístico de regresión lineal realizado, reflejando el impacto que tiene la proporción de infraestructura en la temperatura de la superficie y por ende en el confort térmico del CBIMA. Los resultados concuerdan con los hallazgos encontrados por otros investigadores, donde se evidenció el impacto de la impermeabilización de las superficies en el clima urbano (An et al., 2022; Zhang, Y. et al., 2022). Estos resultados brindan información valiosa para la toma de decisiones con un enfoque sostenible y resiliente en la planificación urbana del CBIMA.

8.3. Efecto de enfriamiento de los espacios verdes

Los espacios verdes estudiados presentan diferencias entre sí en cuanto tamaño, tipo de cobertura, densidad de la cobertura, tipo de vegetación, altitud, morfología y características de las zonas circundantes. Todos estos factores influyen de diferentes maneras en su capacidad de enfriamiento. En la Figura 43 se muestran los 20 espacios verdes seleccionados dentro de la microcuenca.

Figura 43. Espacios verdes estudiados

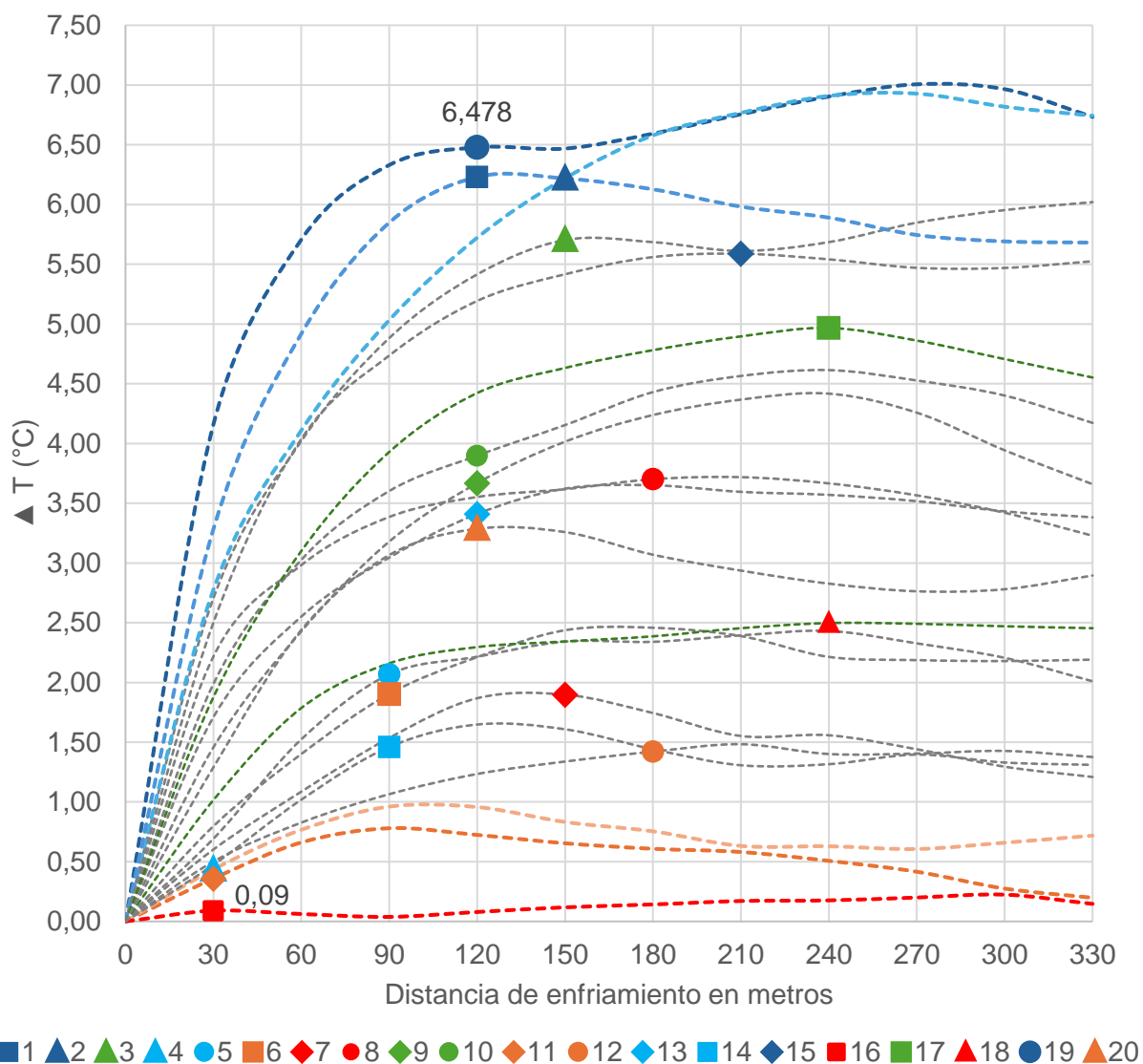


Elaborado en QGIS.

Se presentó variabilidad en la extensión e intensidad de enfriamiento de los diferentes espacios verdes, debido a la heterogeneidad de la muestra (Figura 44).



Figura 44. Efecto de enfriamiento de las áreas verdes seleccionadas



Elaborado en Excel, a partir de datos obtenidos en QGIS. Cada figura y color se relaciona con el número de espacio verde indicado.

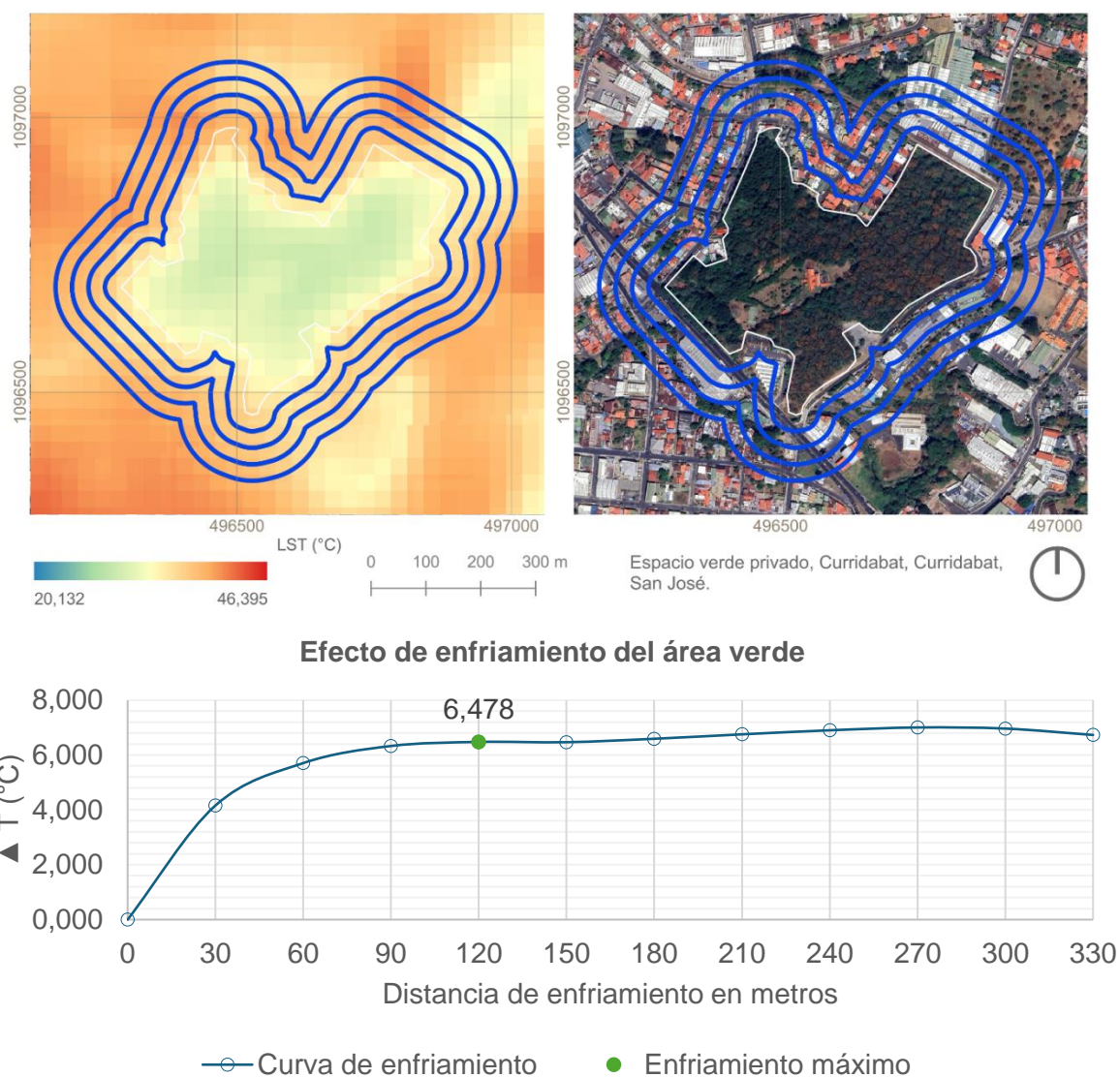
A continuación, se muestran los 3 espacios verdes que presentaron mayor intensidad de enfriamiento, seguido de los 2 espacios con mayor extensión de enfriamiento, donde es importante destacar que 4 de estos 5 espacios están relacionados a la infraestructura azul. Por último, se presentan los 3 espacios con menor extensión e intensidad de enfriamiento. En el Apéndice D. Curvas de enfriamiento se incluyen gráficos separados para cada uno de los espacios verdes estudiados.



8.3.1. Espacios verdes con mayor intensidad de enfriamiento

En la Figura 45 y la Figura 46 se muestra el espacio verde 19, que presentó la mayor intensidad de enfriamiento de toda la muestra estudiada, donde se puede observar una cobertura arbórea muy densa de especies que no pierden sus hojas en la época seca (no caducifolias), relacionada con la alta capacidad de enfriamiento. En total mide 14,10 hectáreas, de las cuales 12,61 presentan cobertura arbórea densa.

Figura 45. Espacio verde 19



Elaborado en QGIS y Excel.



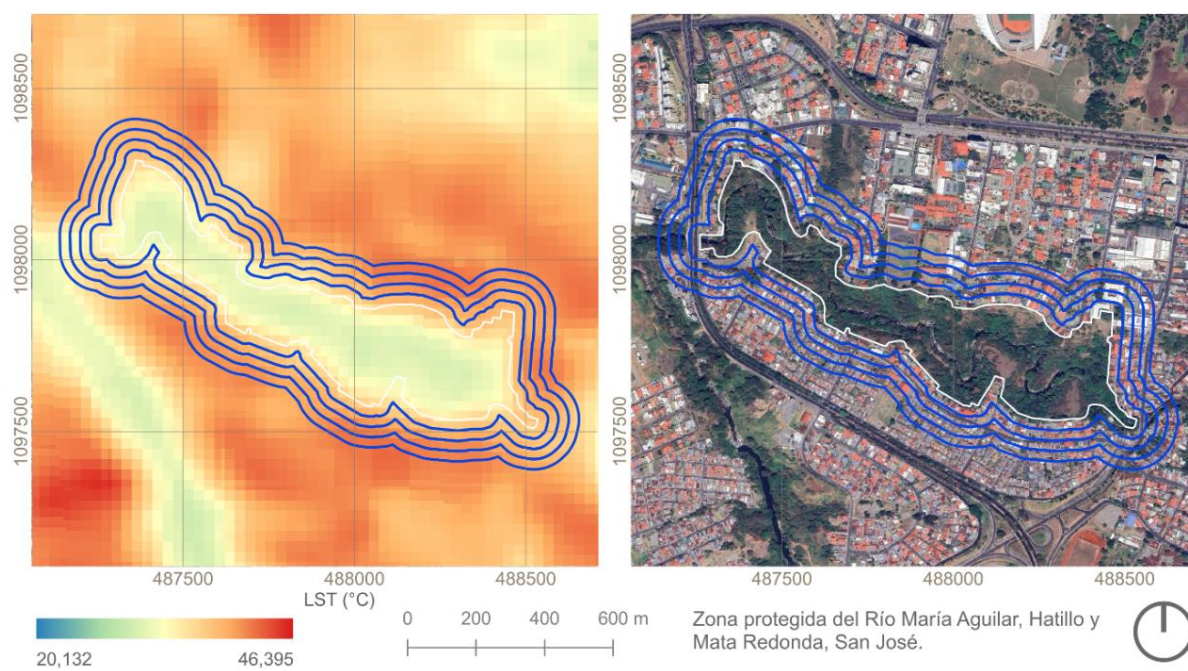
Figura 46. *Espacio verde 19*

Fuente: Google Earth Pro.

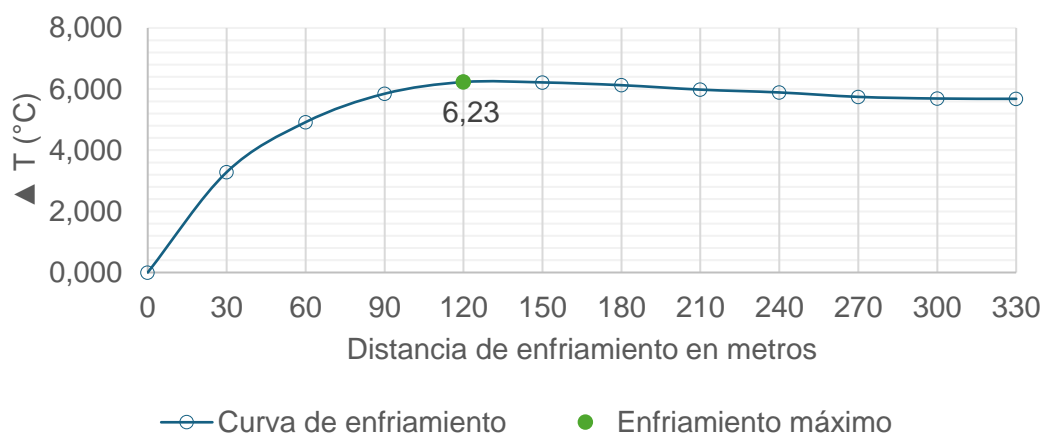


En la Figura 47 y la Figura 49 se puede observar la vegetación ribereña relacionada con la alta capacidad de enfriamiento del área verde 1. En comparación con el área verde 19, este espacio verde es considerablemente más grande (26,42 ha) con una cobertura de vegetación ribereña de 21 ha. Sin embargo, es importante destacar la diferencia en la densidad y tipo de vegetación en relación con el área verde 19. El área verde 1 presenta infraestructura azul.

Figura 47. Área verde 1 (Zona protegida del Río María Aguilar)



Efecto de enfriamiento del área verde



Elaborado en QGIS y Excel.



Figura 48. Área verde 1 (Zona protegida del Río María Aguilar)

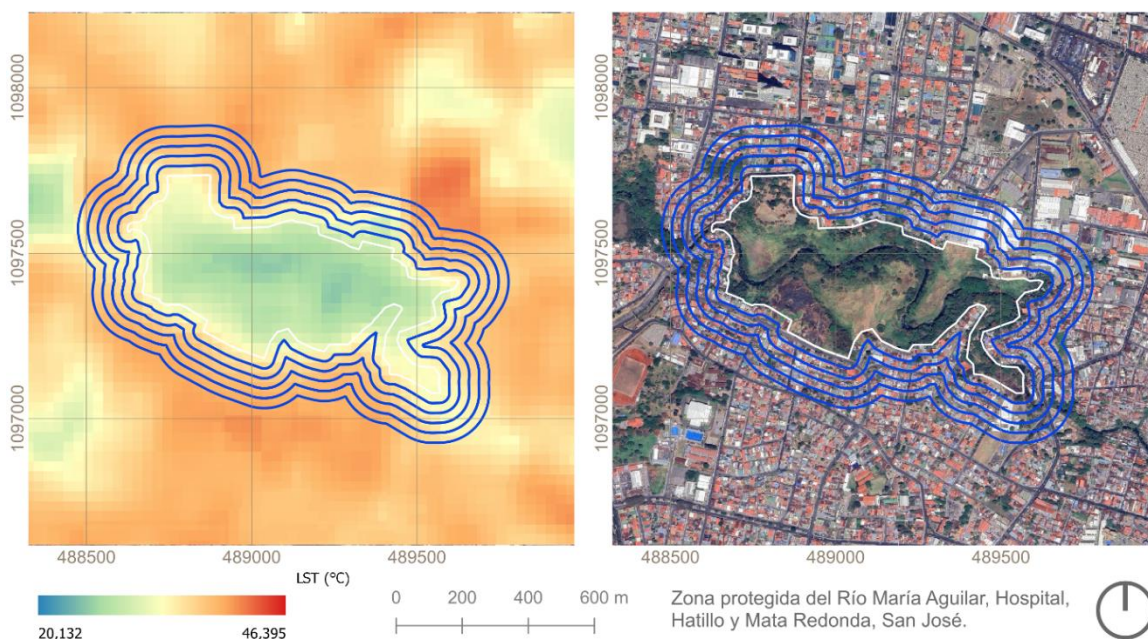


Fuente: Google Earth Pro.

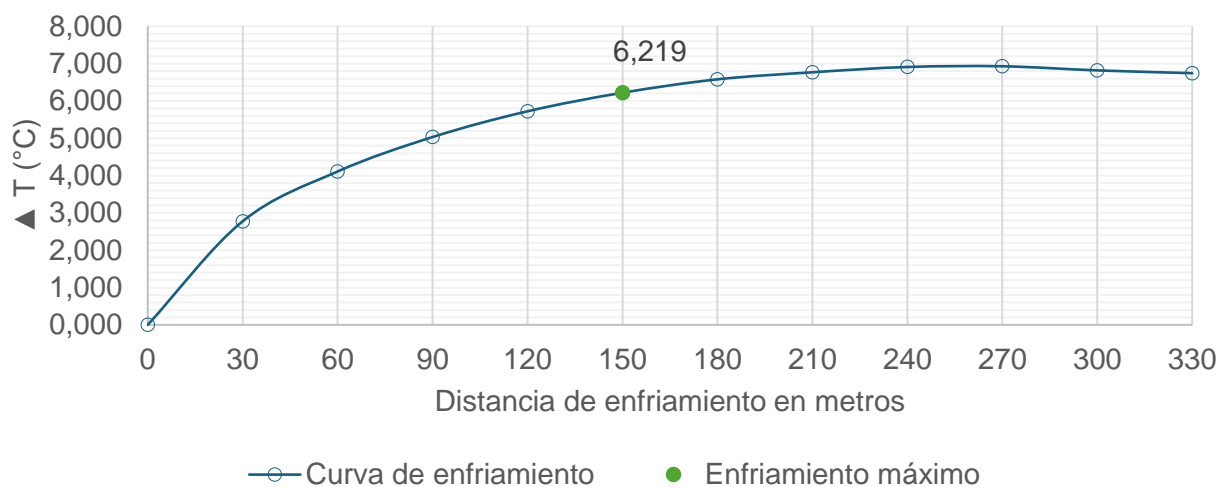


El área verde 2 presenta un gran tamaño (29 ha) y una forma más regular en comparación con el área verde 1. Sin embargo, su intensidad de enfriamiento se encuentra por debajo de las áreas verdes 19 y 1. Esto se puede deber a que presenta menor área y densidad en la cobertura arbórea (12,3 ha). El área verde 2 también presenta infraestructura azul (Figura 49 y Figura 50).

Figura 49. Área verde 2 (Zona protegida del Río María Aguilar)



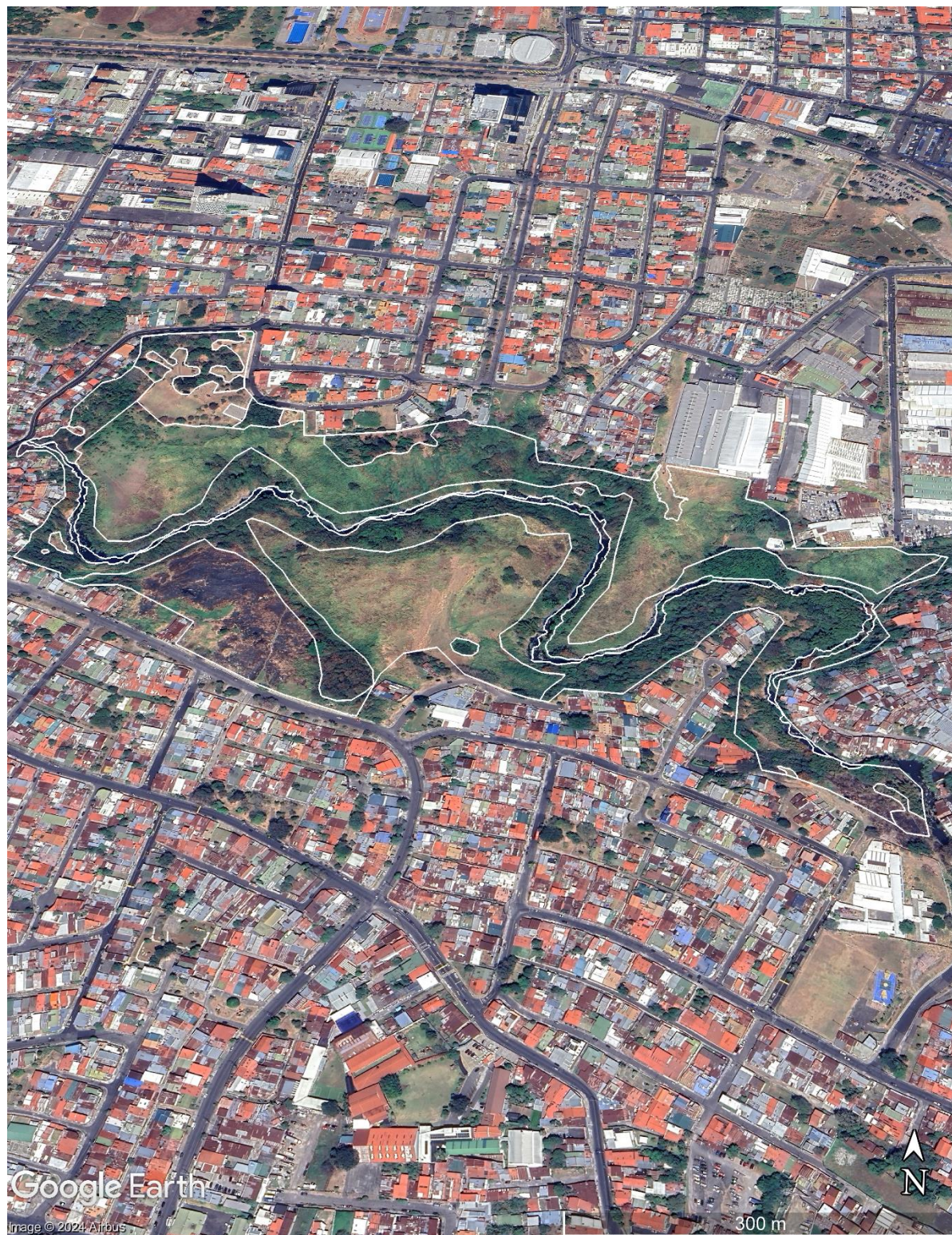
Efecto de enfriamiento del área verde 2



Elaborado en QGIS y Excel.



Figura 50. Área verde 2 (Zona protegida del Río María Aguilar)



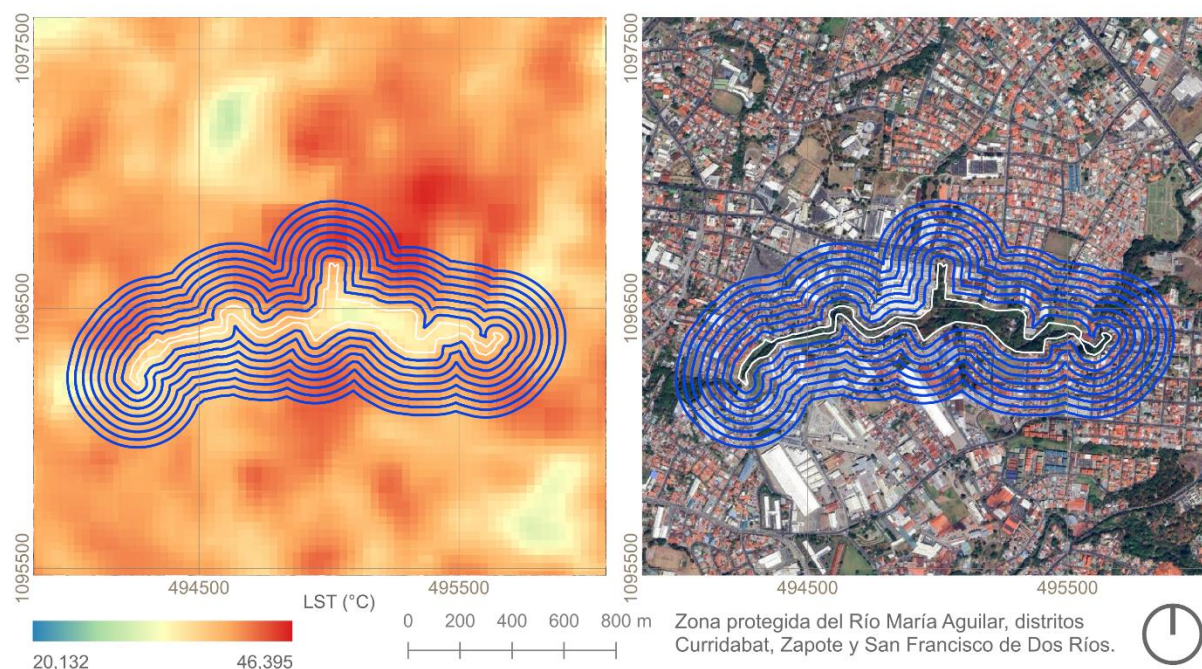
Fuente: Google Earth Pro.



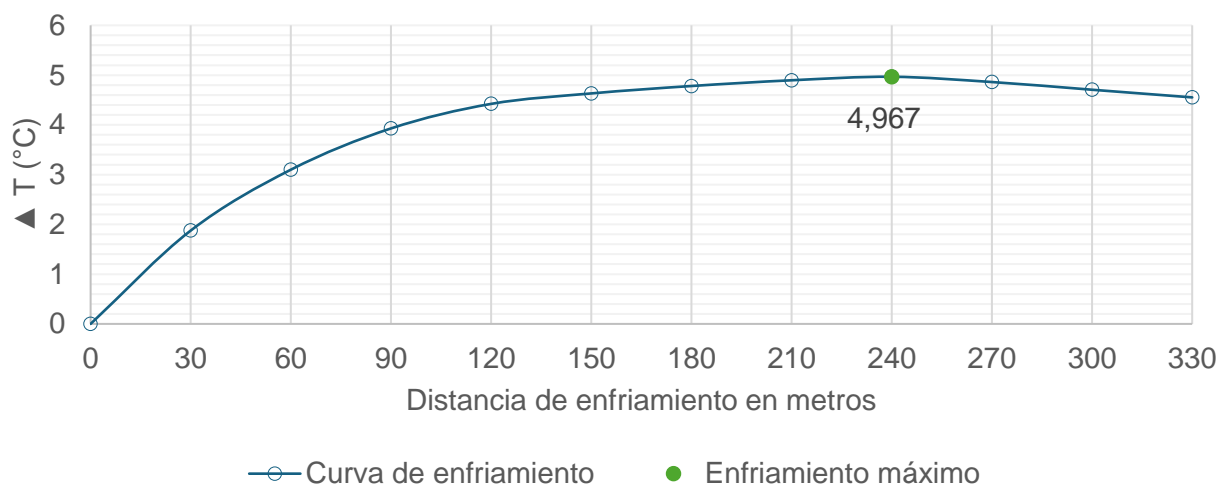
8.3.2. Espacios verdes con mayor extensión de enfriamiento

En la Figura 51 y la Figura 52 se muestra el espacio verde 17, uno de los espacios con mayor extensión de enfriamiento, que presenta infraestructura verde azul, relacionada a la zona protegida del río María Aguilar. Presenta una forma irregular y alargada.

Figura 51. Área verde 17 (Zona protegida del Río María Aguilar)



Efecto de enfriamiento del área verde 17



Elaborado en QGIS y Excel.



Figura 52. Área verde 17 (Zona protegida del Río María Aguilar)

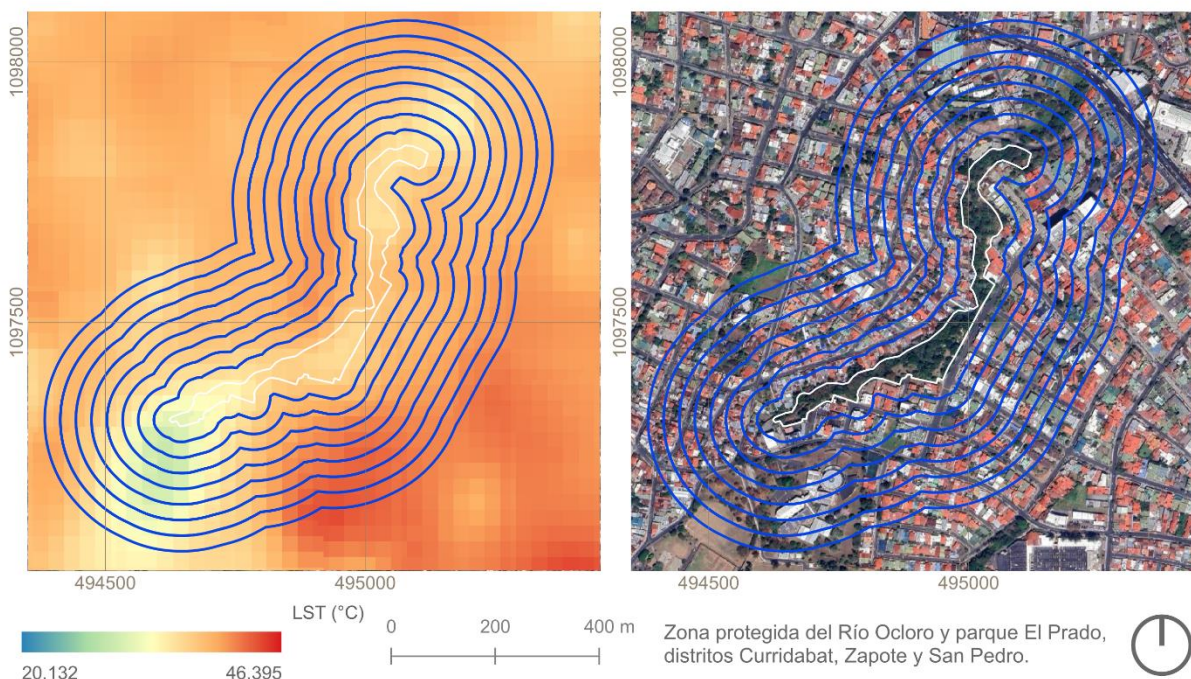


Fuente: Google Earth Pro.

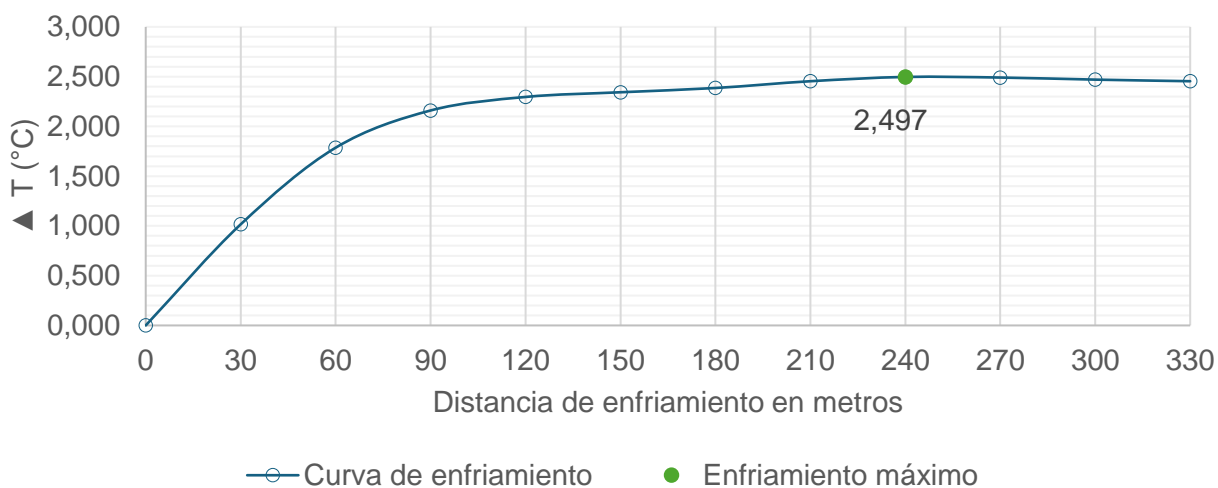


Al igual que el espacio verde 17, el espacio verde 18 presentó una extensión de enfriamiento de 240m. Presenta infraestructura verde azul, relacionada a la zona protegida del río Ocloro. También presenta una forma irregular y alargada (Figura 53 y Figura 54).

Figura 53. Área verde 18 (Zona protegida del Río Ocloro)



Efecto de enfriamiento del área verde 18



Elaborado en QGIS y Excel.

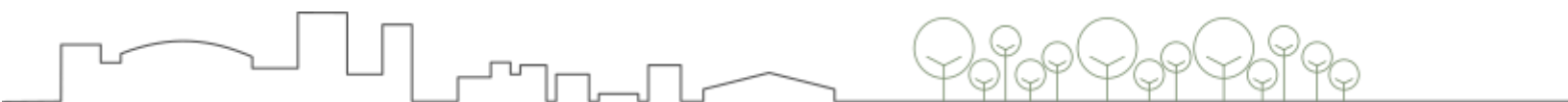


Figura 54. Área verde 18 (Zona protegida del Río Ocloro)



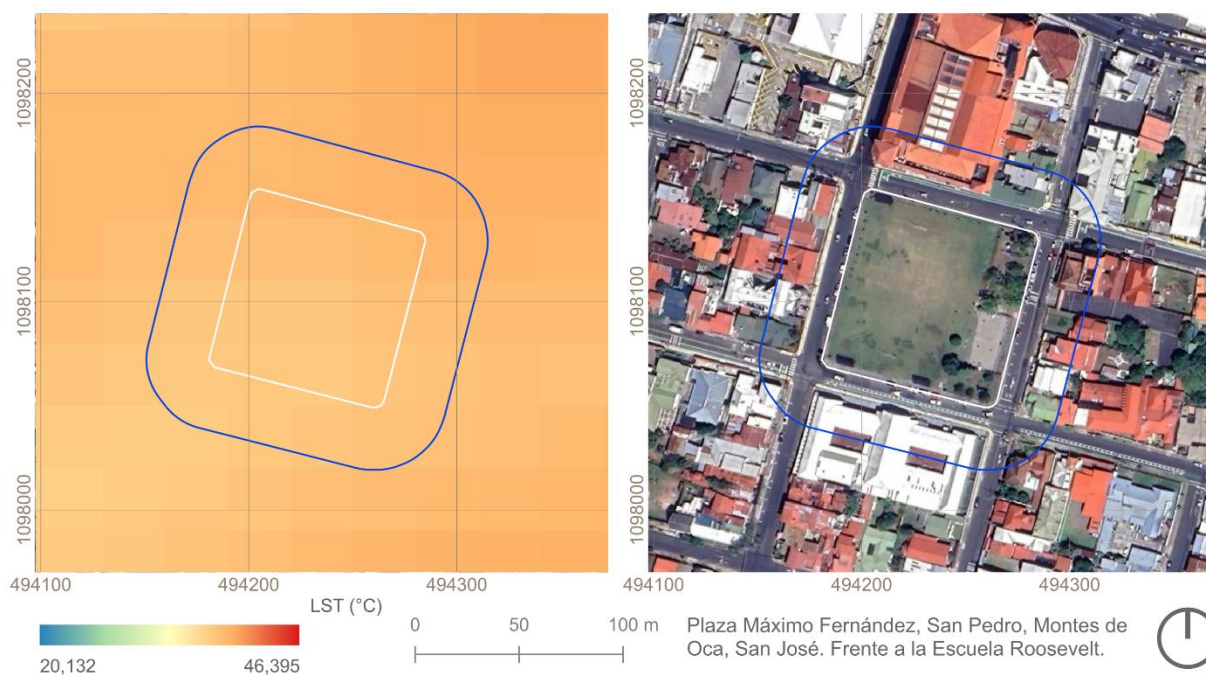
Fuente: Google Earth Pro.



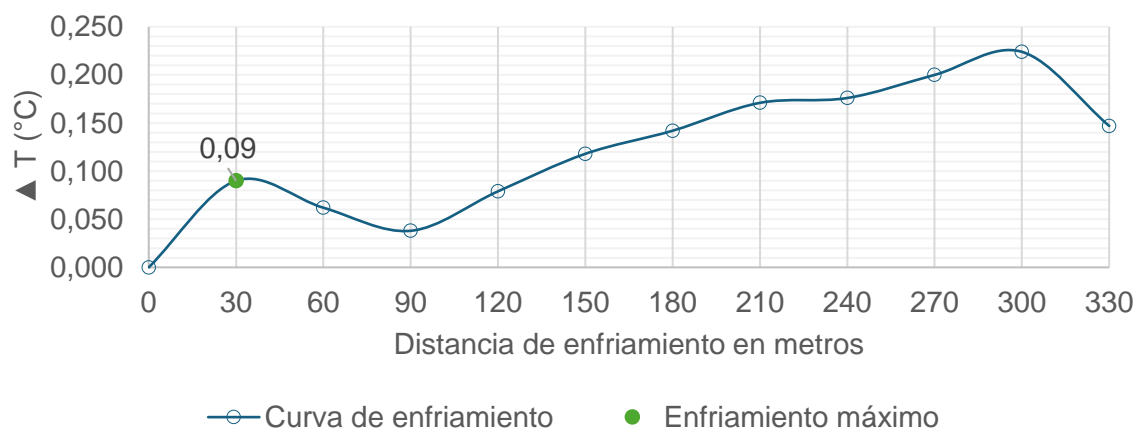
8.3.3. Espacios verdes con menor intensidad y extensión de enfriamiento

Los espacios verdes pequeños con vegetación baja y poca cobertura arbórea presentaron la menor intensidad y extensión de enfriamiento. En la Figura 55 y Figura 56 se observa la Plaza Máximo Fernández en San Pedro, con menos del 10% de cobertura arbórea y la menor intensidad de enfriamiento de todos los espacios verdes estudiados.

Figura 55. Área verde 16 (Plaza Máximo Fernández, San Pedro)



Efecto de enfriamiento del área verde 16



Elaborado en QGIS y Excel.



Figura 56. Área verde 16 (Plaza Máximo Fernández, San Pedro)

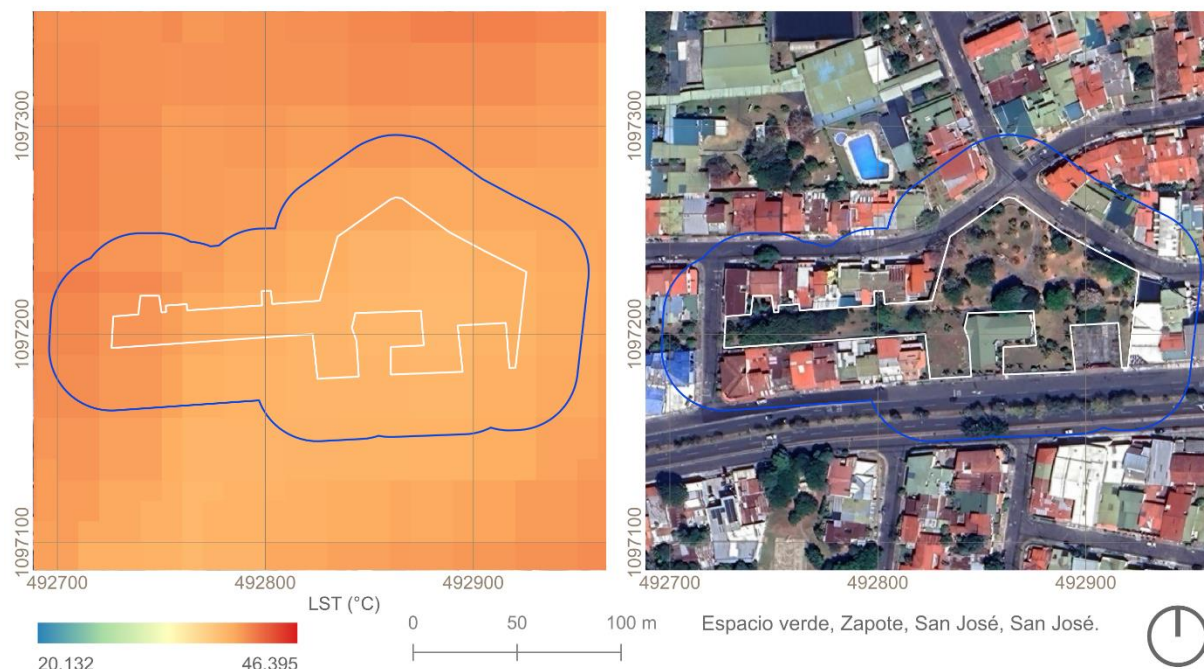


Fuente: Google Earth Pro.

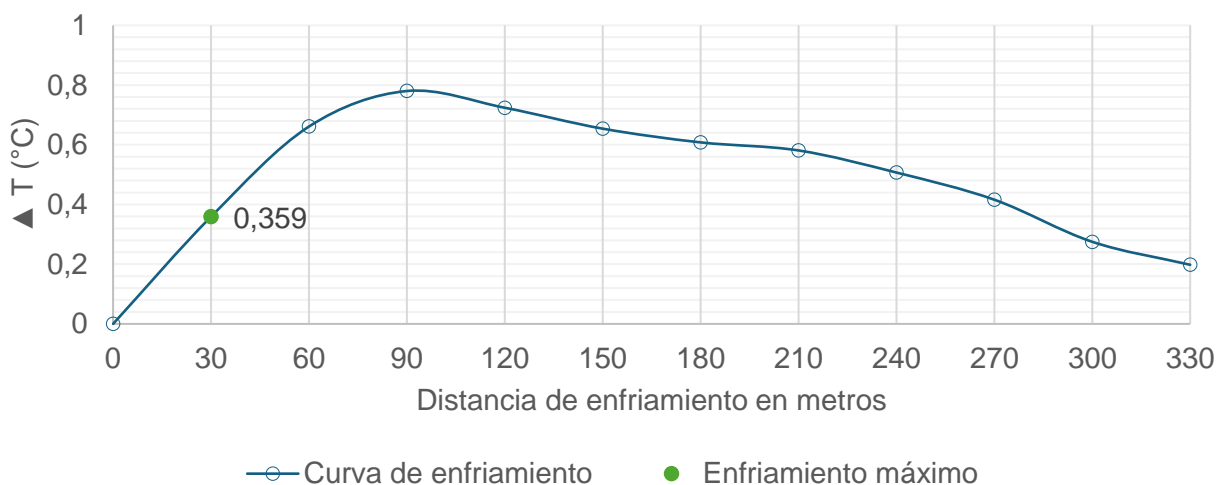


Los espacios verdes 11 y 4 también son espacios verdes pequeños con vegetación baja y poca cobertura arbórea, los cuales presentaron baja intensidad y extensión de enfriamiento. En la Figura 57 y la Figura 58 se muestra el espacio verde 11, mientras que en la Figura 59 y la Figura 60 se muestra el espacio verde 4.

Figura 57. Área verde 11 (Zapote, San José)



Efecto de enfriamiento del área verde 11



Elaborado en QGIS y Excel.



Figura 58. Área verde 11 (Zapote, San José)



Fuente: Google Earth Pro.

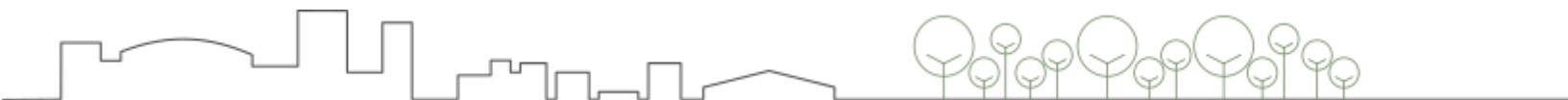
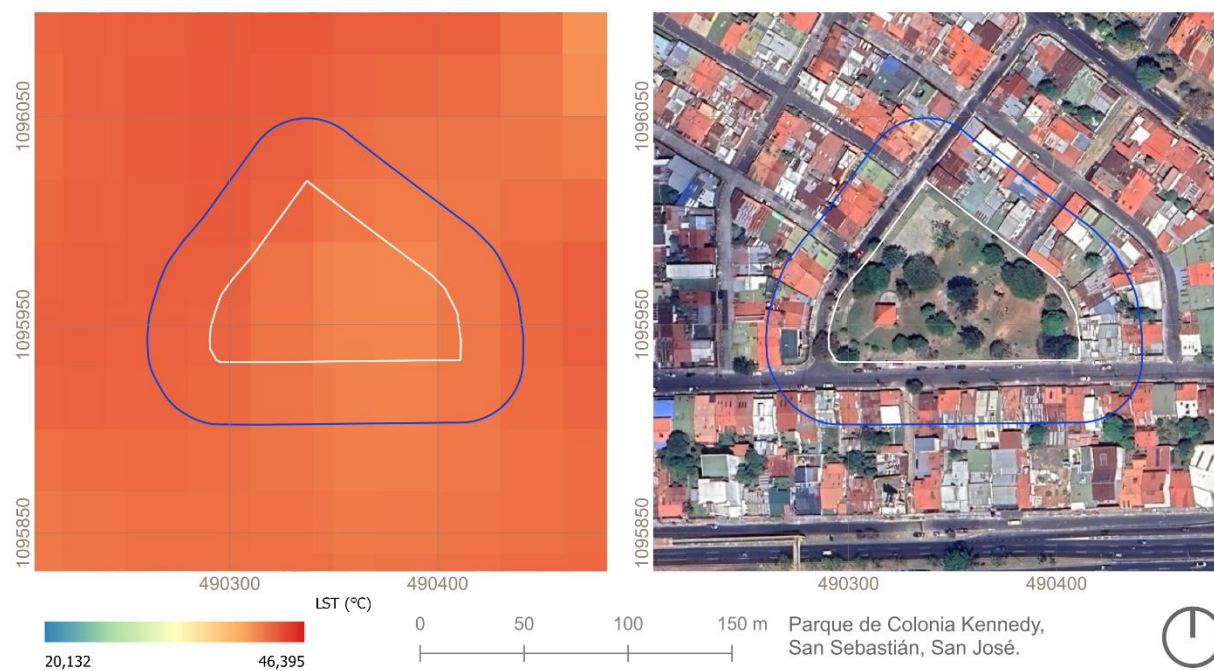
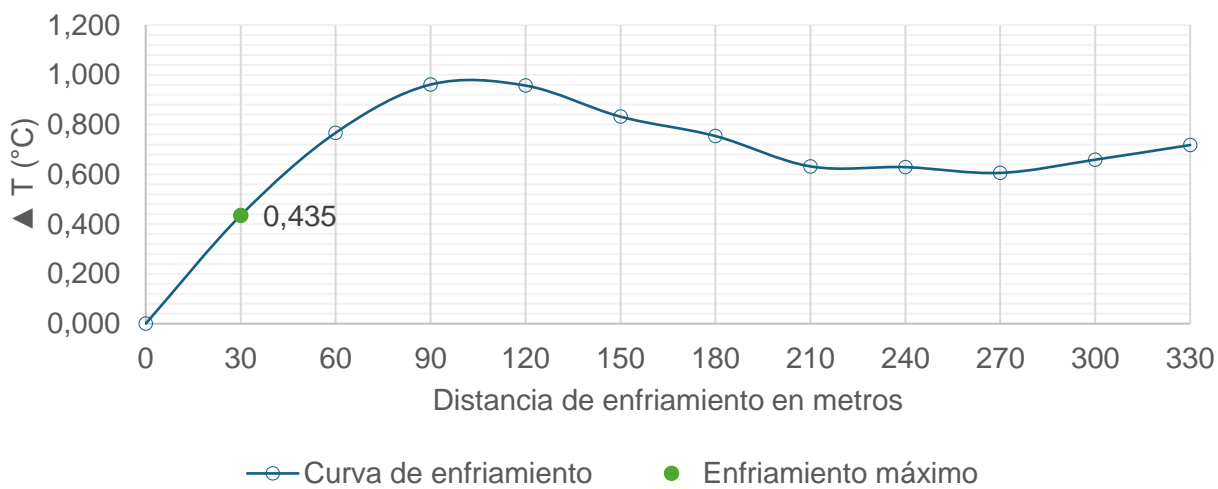


Figura 59. Área verde 4 (Parque Colonia Kennedy, San Sebastián)



Efecto de enfriamiento del área verde 4



Elaborado en QGIS y Excel.



Figura 60. Área verde 4 (Parque Colonia Kennedy, San Sebastián)



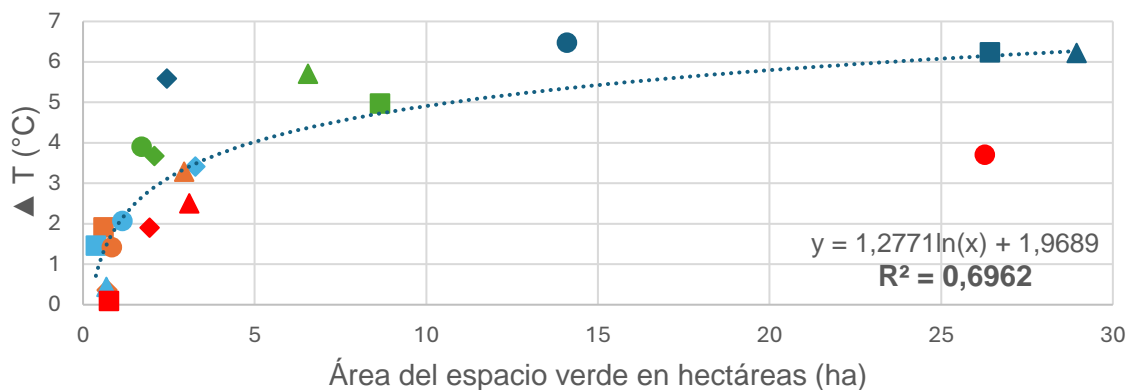
Fuente: Google Earth Pro.



8.3.4. Relación de la intensidad de enfriamiento y el tamaño del espacio verde

Para la muestra de 20 espacios verdes, se encontró una relación logarítmica entre la intensidad de enfriamiento y el tamaño (m²) (Figura 61).

Figura 61. Relación de intensidad de enfriamiento y tamaño del espacio verde

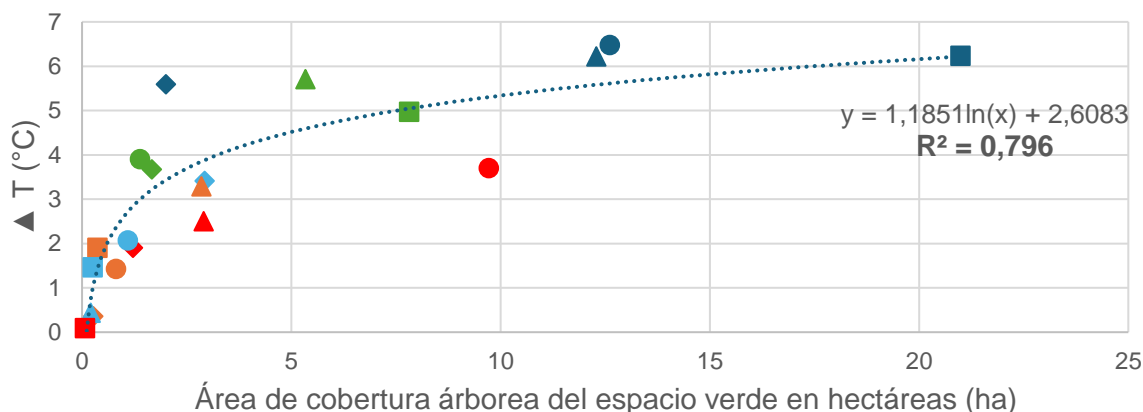


Elaborado en Excel.

8.3.5. Relación de intensidad de enfriamiento y cobertura del espacio verde

El área cubierta con árboles es una variable determinante en la intensidad de enfriamiento. Presentó una relación logarítmica con un R² de 0,796 (Figura 62).

Figura 62. Relación de intensidad de enfriamiento y área de cobertura arbórea



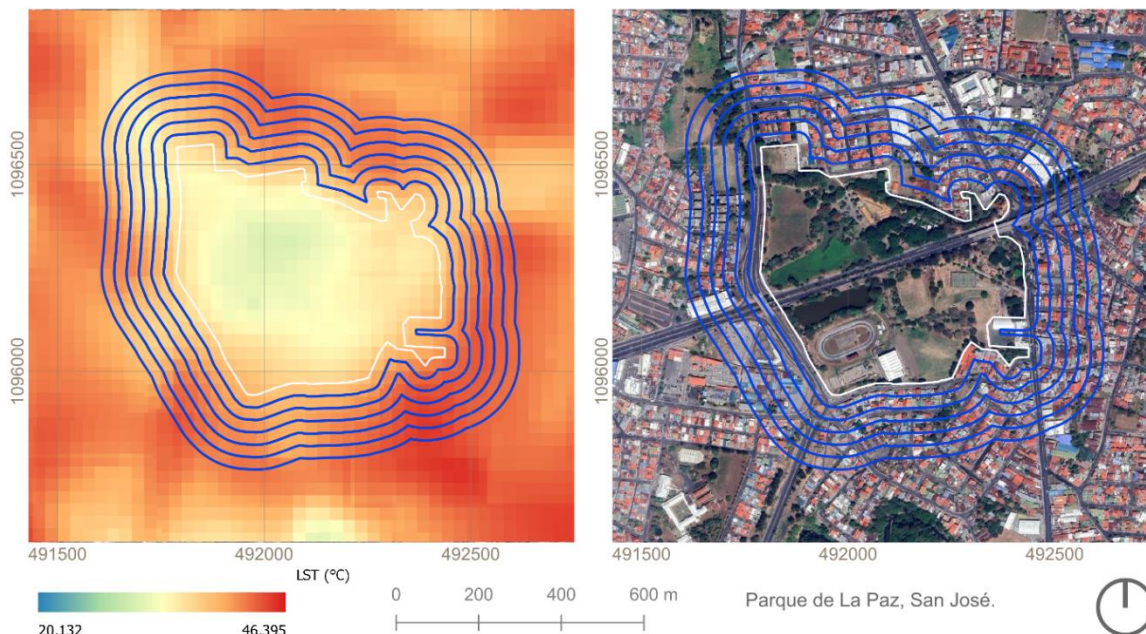
Elaborado en Excel.

Un ejemplo de un espacio verde que tiene una intensidad de enfriamiento no tan alta, pese a su gran tamaño, es el Parque de La Paz (Figura 63). En el gráfico de relación de la intensidad de enfriamiento con el tamaño del espacio verde, el Parque de la Paz (círculo rojo)



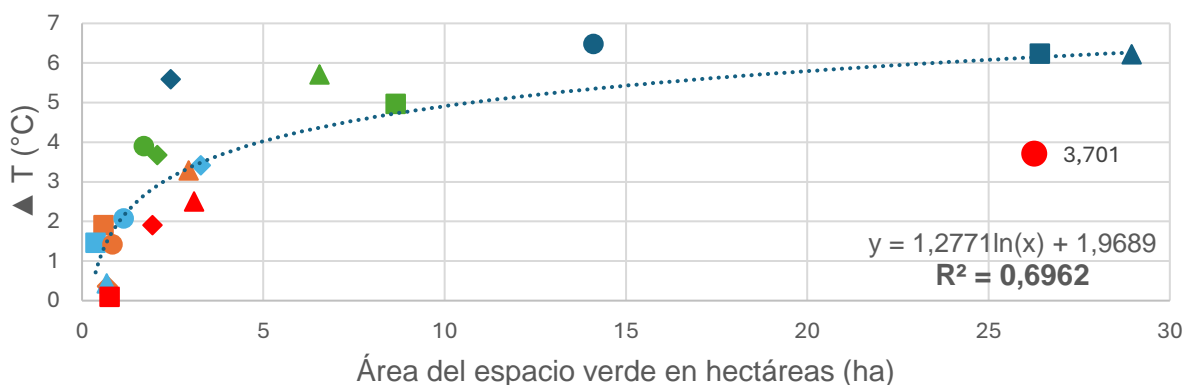
se ubica muy por debajo en intensidad de enfriamiento en relación con otras áreas verdes con un tamaño similar (Figura 64).

Figura 63. Área verde 8 (Parque de la Paz)



Elaborado en QGIS.

Figura 64. Relación intensidad de enfriamiento y tamaño del Parque de La Paz

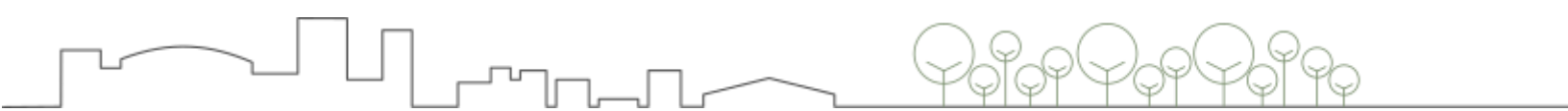
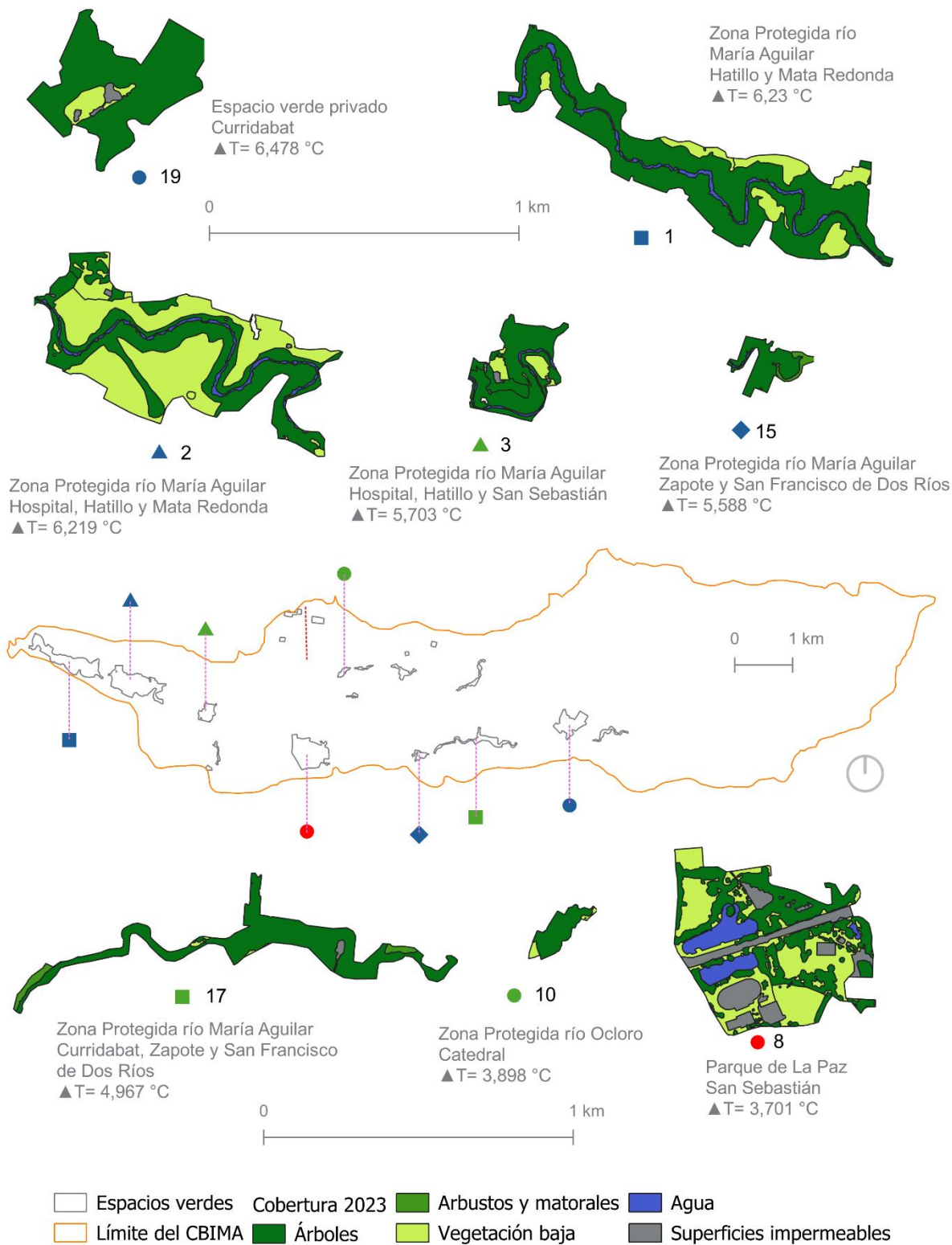


Elaborado en Excel.

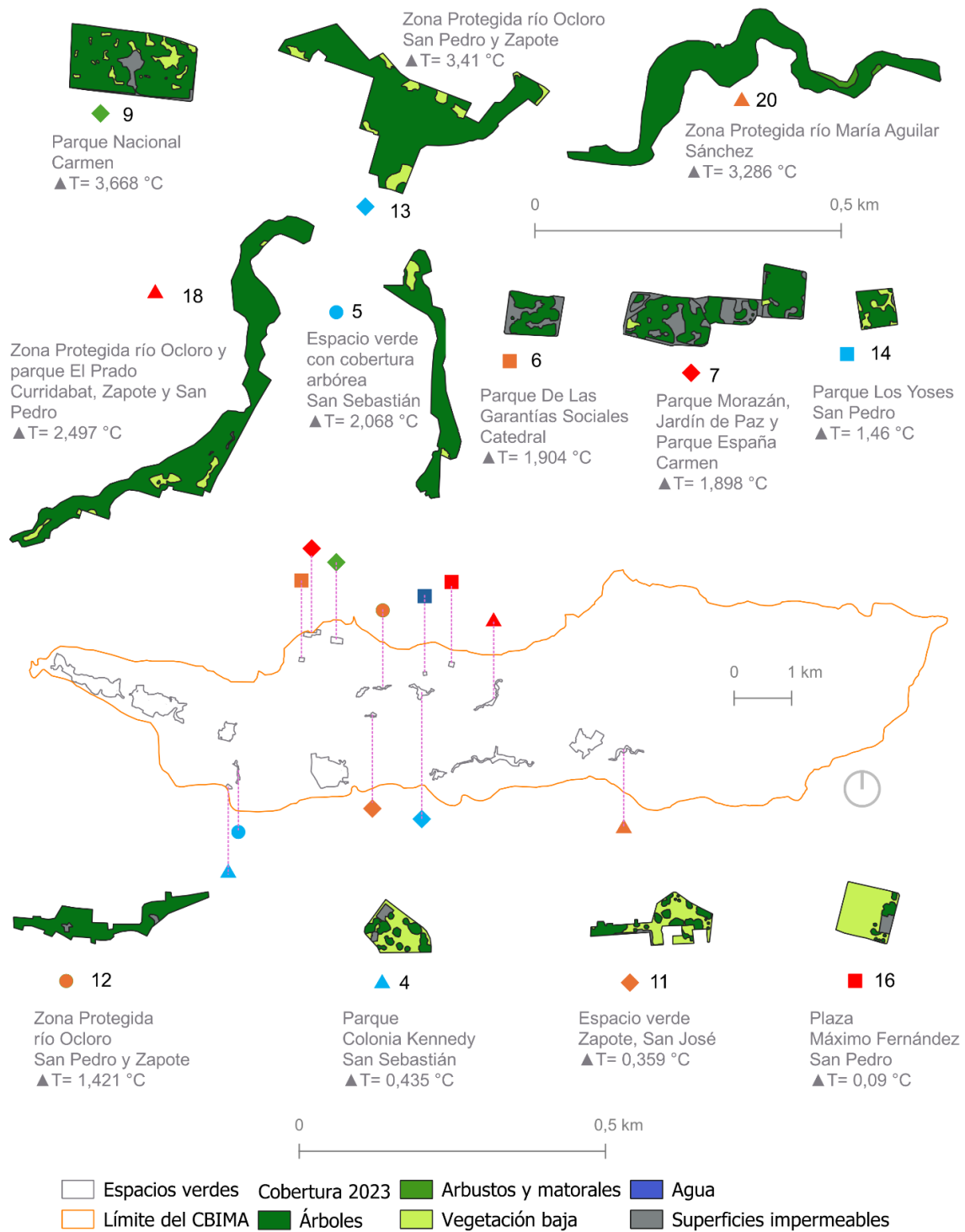
En la Figura 65 se muestra un diagrama síntesis, donde se observa la cobertura de los 20 espacios verdes estudiados ordenados de mayor a menor intensidad de enfriamiento. Es importante resaltar que 8 de los 10 espacios con mayor intensidad de enfriamiento tienen infraestructura azul.



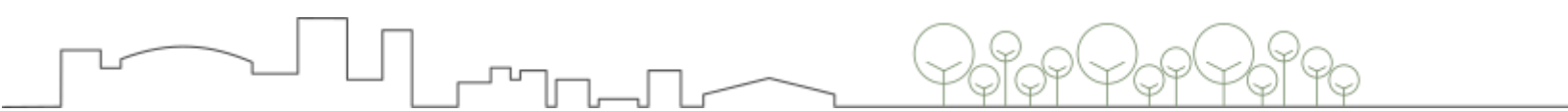
Figura 65. Diagrama síntesis de espacios verdes estudiados



Continúa Figura 65. Diagrama síntesis de espacios verdes estudiados



Se muestran los 20 espacios verdes estudiados ordenados de mayor a menor intensidad de enfriamiento. Elaborado en QGIS.



8.4. Recomendaciones de diseño resiliente

A partir de los resultados obtenidos, el análisis documental y la revisión de literatura se establecieron 4 recomendaciones principales a considerar para una planificación urbana sostenible y resiliente dentro de la microcuenca. A partir de estas recomendaciones generales, se definieron algunos lineamientos adicionales.

8.4.1. Promoción y conservación de bosques y áreas naturales.

Dada su influencia en la regulación del clima, es crucial preservar y proteger estos entornos naturales. Se deben implementar medidas para evitar la fragmentación extrema de los bosques y áreas naturales, permitiendo así una mayor continuidad en la trama verde. Para esto se plantean algunos lineamientos a considerar en la planificación y diseño urbano dentro de la microcuenca (Figura 66).

1. Recuperar zonas de protección de ríos. Restaurar y proteger las áreas naturales cercanas a los cursos de agua contribuye a la conservación del hábitat, la mitigación de inundaciones y la disminución del efecto de isla de calor urbana.
2. Promover la reforestación en espacios públicos y privados, con el fin de incrementar la cobertura arbórea dentro de la microcuenca y su efecto de enfriamiento.
3. Promover la diversidad de usos de la tierra, en las áreas urbanas contiguas a las zonas de protección de los ríos, que incluyan vegetación y superficies permeables, buscando extender el tamaño de las coberturas naturales y dar mayor conectividad a estos entornos dentro del CBIMA.

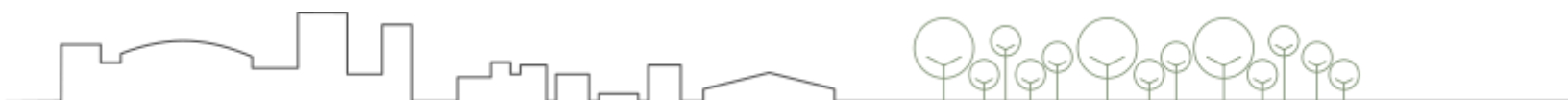
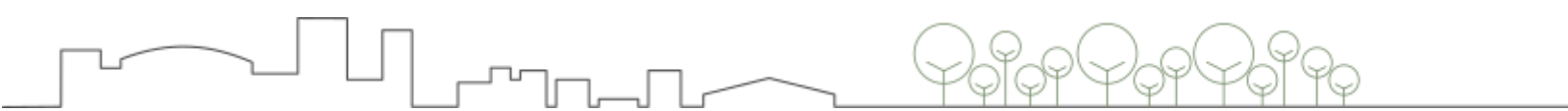
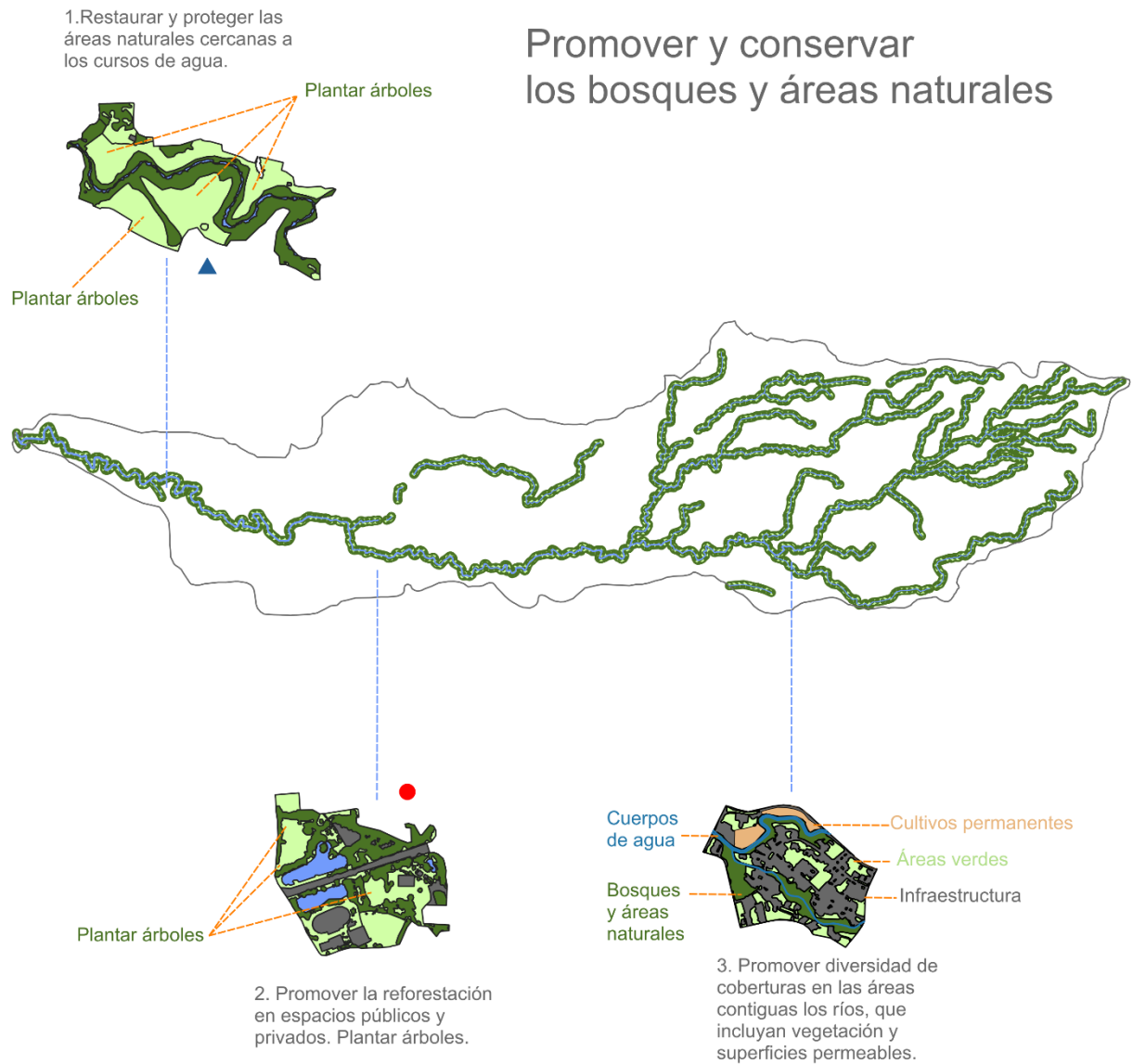


Figura 66. Recomendaciones para conservación de bosques y áreas naturales



8.4.2. Integración de áreas verdes urbanas.

Las áreas verdes urbanas también juegan un papel importante en la regulación del clima. Por lo tanto, es fundamental integrar y mantener estas áreas dentro del tejido urbano, ayudando a reducir la proporción de infraestructura y generando una mayor diversidad de usos (Figura 67). Se recomienda:

1. Fomentar la creación y el mantenimiento de espacios verdes como parques, plazas y jardines dentro de las áreas urbanas.
2. Fomentar la conectividad entre espacios públicos y áreas verdes urbanas. La creación de bulevares peatonales y ciclo vías arborizadas facilita el acceso a espacios verdes, promoviendo estilos de vida activos y saludables; además de mejorar el confort térmico de los espacios públicos.
3. Incentivar la arborización en las vías que proporcionen sombra y frescura. Con la arborización en las vías también se mejora la calidad del aire y se embellece el entorno urbano.
4. Planificar y diseñar espacios verdes eficientes, considerando el tamaño y la cobertura arbórea. Es recomendable priorizar la creación de espacios verdes con una cobertura arbórea significativa, ya que estos tienen una mayor capacidad de enfriamiento y contribuyen a mitigar el efecto del calentamiento urbano. En la medida de lo posible, se debe priorizar tener espacios verdes de gran tamaño. Sin embargo, esto en muchas ocasiones no es posible, por lo que una alternativa es distribuir espacios verdes de una forma homogénea dentro de las zonas más densamente pobladas, garantizando un mejor acceso de la población a los espacios verdes dentro de la ciudad y mejorando el clima urbano.

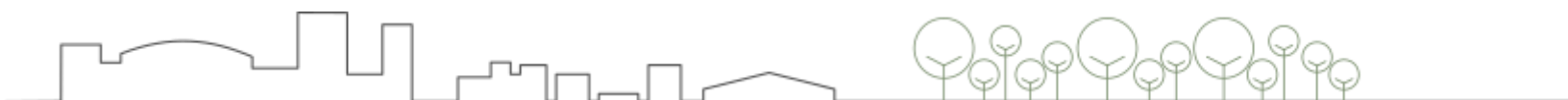
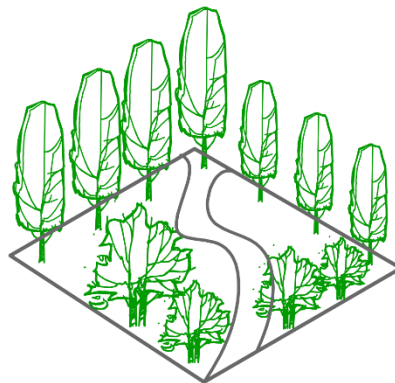


Figura 67. Recomendaciones para la integración de áreas verdes urbanas.

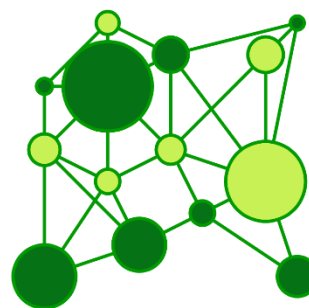
1

Fomentar la creación y mantenimiento de espacios verdes (parques, plazas o jardines).



2

Fomentar la conectividad entre espacios públicos y áreas verdes urbanas.



3

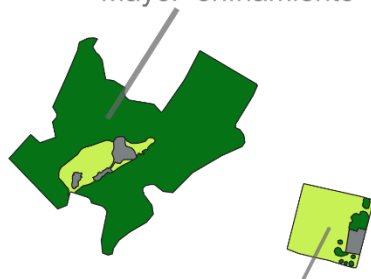
Incentivar la arborización en las vías que proporcionen sombra y frescura.



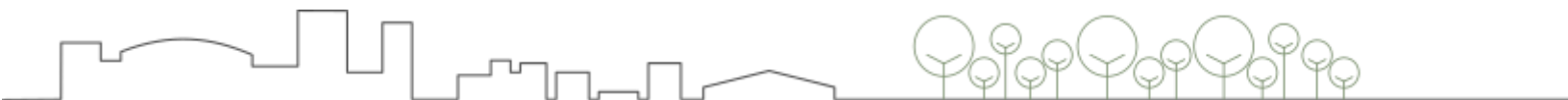
Mayor tamaño
Mayor cobertura arbórea
Mayor enfriamiento

4

Planificar y diseñar espacios verdes eficientes, considerando el tamaño y la cobertura arbórea.



Menor tamaño
Menor cobertura arbórea
Menor enfriamiento



8.4.3. Consideración de la morfología urbana en la planificación sostenible.

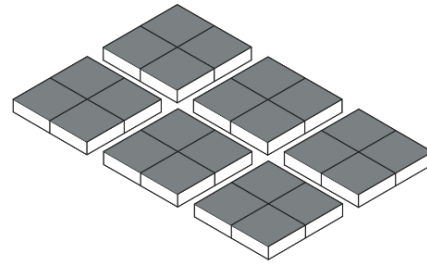
La morfología urbana influye en la LST. Por lo tanto, al planificar nuevas áreas urbanas o rehabilitar las existentes, es importante tener en cuenta cómo la configuración física de la ciudad puede afectar el clima local. Se proponen los siguientes lineamientos (Figura 68):

1. Enfoque en la diversidad de cobertura: Mantener un índice de diversidad equilibrado de los tipos de cobertura puede contribuir a mejorar las condiciones de confort térmico en las zonas urbanas. Esto implica evitar la predominancia de la infraestructura y superficies impermeables, fomentando la coexistencia de diferentes tipos de cobertura, incluidos bosques, áreas naturales y espacios verdes urbanos.
2. Densificación en altura: Para evitar la continuidad y predominancia de grandes extensiones de infraestructura y superficies impermeables se puede considerar el desarrollo vertical de edificaciones, con lo cual se podría mantener o incrementar la densidad, reduciendo el porcentaje de cobertura edificada, dando espacio para otros tipos de cobertura, que incluyan superficies permeables y trama verde.
3. Diseño de edificios con infraestructura verde: Incluir elementos como paredes y techos verdes en los diseños de edificios ayuda a mejorar el confort térmico y la calidad del aire, además de proporcionar hábitats para la vida silvestre urbana. Aunado a la regulación del clima, estas estructuras proporcionan beneficios adicionales de aislamiento térmico, absorción de agua de lluvia y mejora estética del entorno urbano.
4. Uso de materiales que mejoren el confort térmico: La instalación de cubiertas o pinturas de color claro en techos, así como la implementación de pavimentos y superficies permeables en las vías, ayuda a reducir el efecto del calor urbano y mitigar problemas de inundaciones.
5. Incorporación de elementos que brinden sombra y protección de áreas descubiertas: Garantizar que existan suficientes áreas sombreadas y protegidas del sol en espacios públicos contribuye al confort térmico de los ciudadanos.

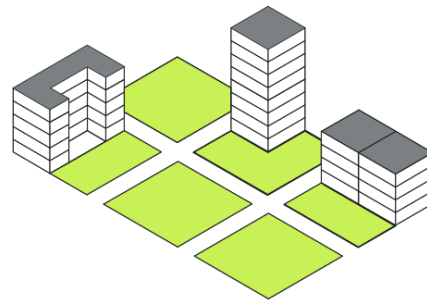


Figura 68. Recomendaciones considerando la morfología urbana.

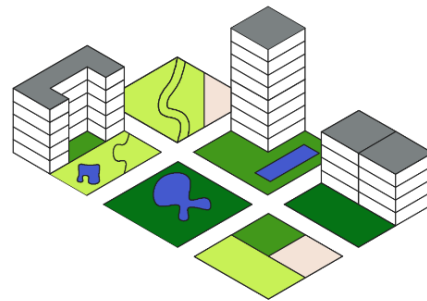
- ▶ Evitar la predominancia de la infraestructura y superficies impermeables



- ▶ Densificar en altura y reducir el porcentaje de cobertura edificada dando espacio para tener coberturas permeables



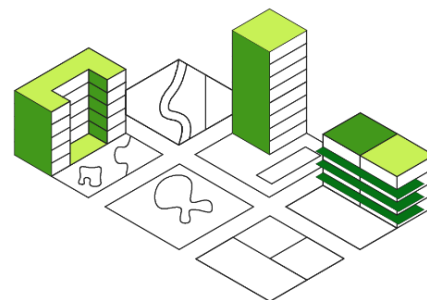
- ▶ Diversidad de tipos de cobertura, incluyendo infraestructura azul y cobertura arbórea



- ▶ Incluir infraestructura verde en el diseño de las edificaciones

- ▶ Incluir elementos que brinden sombra y protección

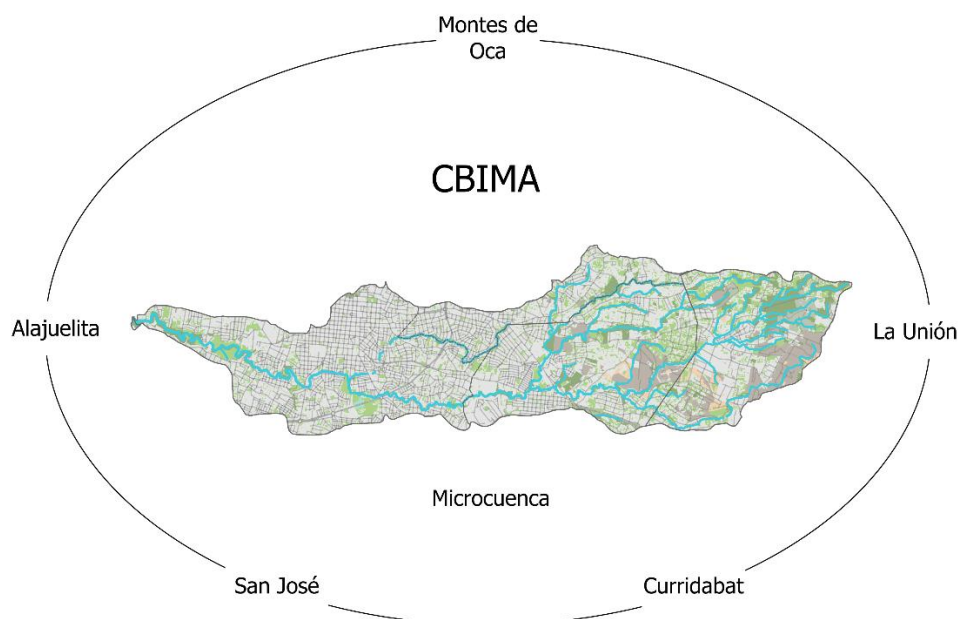
- ▶ Utilizar materiales que ayuden a mejorar el confort en las edificaciones



8.4.4. Visión integral de territorio.

Fortalecer y promover un modelo de gobernanza que involucre de manera integral a los gobiernos locales de los 5 cantones del CBIMA (La Unión, Curridabat, Montes de Oca, San José y Alajuelita), de manera que se tomen decisiones a nivel de microcuenca (Figura 69).

Figura 69. Visión integral de territorio.



Con la implementación de estas recomendaciones y lineamientos se aporta al cumplimiento del ODS 11, que se enfoca en la transformación de las ciudades en entornos más inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. Para alcanzar el Objetivo 11, los esfuerzos deben centrarse en aplicar políticas y prácticas de desarrollo urbano inclusivo, resiliente y sostenible que den prioridad al acceso a los servicios básicos, incluyendo los espacios verdes urbanos (ONU, 2020). Las recomendaciones y lineamientos planteados influyen positivamente en la consecución de varias de las metas establecidas para el ODS 11 (Metas 11.3, 11.7, 11.b). También aportan a los objetivos ODS 13, acción climática; el ODS 15, que se centra en la vida en ecosistemas terrestres y el ODS 3 al influir en el bienestar y salud de los ciudadanos, a través de la mitigación del efecto de isla de calor urbano.



9. Conclusiones y recomendaciones

En el presente estudio se evaluó el impacto de la morfología urbana y la trama verde en la temperatura de la superficie de la microcuenca del río María Aguilar, utilizando sistemas de información geográfica y teledetección. A través de esta investigación, se identificaron las islas de calor y se demostró su relación con los tipos de cobertura verde e infraestructura presentes en la zona de estudio.

Se encontró que los bosques y áreas naturales tienen una influencia significativa en la regulación del clima, manteniendo temperaturas más bajas en comparación con las áreas verdes urbanas y la infraestructura. Estos hallazgos subrayan la importancia de preservar, proteger y restaurar los entornos naturales. Asimismo, se confirmó que las áreas verdes urbanas contribuyen a la regulación del clima urbano, resaltando la necesidad de integrarlas en la planificación urbana sostenible.

El estudio de las métricas del paisaje dentro de la microcuenca permitió determinar la relación entre la morfología urbana y la temperatura de la superficie. Conocer las métricas del paisaje que influyen en la temperatura es crucial para la toma de decisiones orientadas a una planificación sostenible y resiliente del corredor biológico interurbano.

También fue posible estimar el efecto de enfriamiento de diferentes espacios verdes, evidenciando su contribución a la mitigación del calentamiento urbano. Se demostró que tanto el tamaño como la cobertura arbórea son factores determinantes en la intensidad de enfriamiento. Además, un alto porcentaje de los espacios verdes estudiados que presentaron mayor intensidad de enfriamiento presentan infraestructura azul, siendo un factor importante para considerar en las estrategias para la planificación urbana sostenible. Basado en estos resultados, se establecieron recomendaciones de diseño resiliente para mitigar el calentamiento urbano dentro de la microcuenca, contribuyendo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 11, 13, 15 y 3.



Además, de forma paralela, se estableció e implementó una estrategia para la socialización de la investigación y divulgación de los resultados; así como para promover su ejecución, adaptación y replicabilidad en otros contextos. Se dieron a conocer los resultados ante representantes de más de 20 municipalidades, incluyendo representantes de los 5 cantones del CBIMA; así como a los miembros de la unidad técnica del Proyecto TEVU (Apéndice E. Estrategia de socialización y divulgación de los resultados). Al momento de la presentación de esta investigación, diferentes municipalidades manifestaron interés en tener acceso a los resultados y productos generados; así como en la posibilidad de replicarlo en sus cantones. También existe la posibilidad de publicar un artículo en el boletín informativo del Proyecto TEVU, con lo cual los resultados podrían darse a conocer más ampliamente.

La posibilidad de replicar esta metodología en diferentes zonas urbanizadas del país ofrece a los gobiernos locales e instituciones la oportunidad de generar información específica y útil para el ordenamiento territorial. Además, permite establecer un control y monitoreo sobre cómo las decisiones urbanas influyen en el clima de las ciudades. Los hallazgos y recomendaciones de diseño resiliente pueden incorporarse en los planes reguladores municipales, políticas de ordenamiento territorial y planificación urbana.

Los estudios sobre calentamiento y clima urbano, como el aquí desarrollado, no solo facilitan la creación de nuevas políticas para la planificación urbana, sino que también refuerzan y justifican con datos específicos las políticas y lineamientos ya establecidos. Adicionalmente, basados en estos resultados, los gobiernos locales e instituciones pueden crear incentivos y programas de sensibilización para promover la reforestación y conservación de la cobertura arbórea en espacios públicos y privados.

Se recomienda, en futuras investigaciones, profundizar en el estudio del efecto de enfriamiento de los espacios verdes. Por ejemplo, se podría analizar el efecto no lineal del enfriamiento, utilizando secciones transversales, aplicando una metodología similar a la utilizada por Arellano Ramos et al. (2019). De igual forma, existen otros factores que influyen en



el efecto de enfriamiento, como la forma del espacio verde o las especies de árboles, los cuales también podrían estudiarse en futuras investigaciones. Además, se recomienda profundizar en el análisis del impacto de la trama verde en el calentamiento urbano a escala local y micro, estudiando el efecto de los árboles urbanos, parques y áreas verdes pequeñas, que debido a la resolución de las imágenes de los sensores remotos no fue posible estudiar en la presente investigación. Para esto se recomienda explorar simulaciones utilizando el complemento UMEP para QGIS, desarrollado por Lindberg et al. (2018), con el cual se pueden realizar simulaciones climáticas en entornos urbanos. Adicionalmente, se podría profundizar en el estudio del efecto refrescante de la infraestructura azul y sus beneficios para la regulación del clima, lo cual podría explorarse mediante simulaciones climáticas o alguna otra metodología. Finalmente, en futuras investigaciones o en alguna investigación complementaria a la presente se recomienda incorporar un análisis en época lluviosa, a fin de poder comparar las diferencias en la temperatura durante la época lluviosa en relación con los periodos más críticos como lo fue el período estudiado en la presente investigación.

En conclusión, este estudio ofrece importantes hallazgos para la planificación urbana sostenible. Tanto la identificación de las islas de calor, como la evidencia de la influencia de la infraestructura verde y azul en la regulación del clima, subrayan la importancia de preservar y considerar estos entornos naturales en la planificación urbana. Además, las recomendaciones de diseño resiliente presentadas contribuyen al cumplimiento de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), ofreciendo pautas para mitigar el calentamiento urbano. Se destaca la necesidad de futuras investigaciones para profundizar en el efecto de enfriamiento de los espacios verdes y azules, así como el análisis detallado del impacto de la trama verde a escalas locales y micro, utilizando herramientas avanzadas de simulación para comprender mejor la interacción entre la trama verde y el clima urbano.

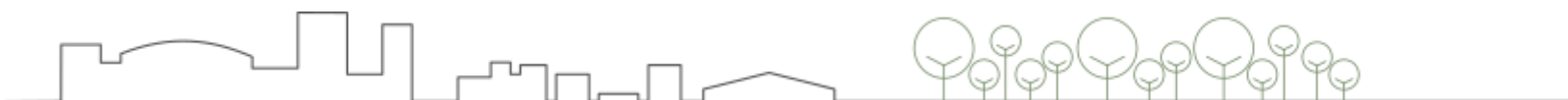


Referencias

- Almaaitah, T., Appleby, M., Rosenblat, H., Drake, J., & Joksimovic, D. (2021). The potential of Blue-Green infrastructure as a climate change adaptation strategy: A systematic literature review. *Blue-Green Systems*, 3(1)
- An, H., Cai, H., Xu, X., Qiao, Z., & Han, D. (2022). Impacts of urban green space on land surface temperature from urban block perspectives. *Remote Sensing*, 14(18)
- Arellano Ramos, B., García Haro, A., & Roca Cladera, J. (2019). (2019). Definición espacial del efecto de enfriamiento de los espacios verdes urbanos mediante teledetección: Estudios de caso en el Área Metropolitana de Barcelona. Paper presented at the *XIII CTV 2019 Proceedings: XIII International Conference on Virtual City and Territory: "Challenges and Paradigms of the Contemporary City"*: UPC, Barcelona, October 2-4, 2019,
- Barrantes Sotela, O. E. (2020). *Análisis del efecto del cambio de la cobertura de la tierra en el fenómeno de Isla de Calor Urbano (ICU) en la ciudad de Heredia, Costa Rica* (Maestría Académica en Desarrollo Sostenible con énfasis en Conservación de los Recursos Biológicos). kerwa.ucr.ac.cr
- Chen, C., Bagan, H., Xie, X., La, Y., & Yamagata, Y. (2021). Combination of sentinel-2 and palsar-2 for local climate zone classification: A case study of nanchang, China. *Remote Sensing*, 13(10)
- Chibuike, E. M., Ibukun, A. O., Abbas, A., & Kunda, J. J. (2018). Assessment of green parks cooling effect on Abuja urban microclimate using geospatial techniques. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 11



- Das, A., Saha, P., Dasgupta, R., Inacio, M., Das, M., & Pereira, P. (2024). How Do the Dynamics of Urbanization Affect the Thermal Environment? A Case from an Urban Agglomeration in Lower Gangetic Plain (India). *Sustainability*, 16(3)
- Ermida, S. L., Soares, P., Mantas, V., Götsche, F., & Trigo, I. F. (2020). Google earth engine open-source code for land surface temperature estimation from the landsat series. *Remote Sensing*, 12(9)
- Estado de la Nación. (2015). Ordenamiento territorial: implicaciones para el desarrollo humano. *Vigésimosegundo Informe Estado De La Nación En Desarrollo Humano Sostenible*,
- Faustino, J., & Jiménez Otárola, F. (2000). Manejo de cuencas hidrográficas.
- Feyisa, G. L., Dons, K., & Meilby, H. (2014). Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa. *Landscape and Urban Planning*, 123
- Garau, G. A., & Garau, J. L. (2018). La isla de calor urbana de Palma (Mallorca, Islas Baleares): avance para el estudio del clima urbano en una ciudad litoral mediterránea. *Boletín De La Asociación De Geógrafos Españoles*, (78)
- García Haro, A., Arellano Ramos, B., & Roca Cladera, J. (2019). (2019). Variaciones estacionales del efecto de enfriamiento de los parques urbanos de Barcelona: una aproximación mediante teledetección. Paper presented at the *XIII CTV 2019 Proceedings: XIII International Conference on Virtual City and Territory: "Challenges and Paradigms of the Contemporary City": UPC, Barcelona, October 2-4, 2019*,
- García, F. F., & Martilli, A. (2012). El clima urbano: aspectos generales y su aplicación en el área de Madrid. *Revista Indice* (50),



- Gearey, M., Robertson, L., Anderson, J., Barros, P., & Cracknell, D. (2019). Re-naturing the city for health and wellbeing: green/blue urban spaces as sites of renewal and contestation. *Planning Cities with Nature: Theories, Strategies and Methods*,
- Ghofrani, Z., Sposito, V., & Faggian, R. (2017). A comprehensive review of blue-green infrastructure concepts. *International Journal of Environment and Sustainability*, 6(1)
- Gutiérrez Miranda, M. (2021). *Los espacios verdes como determinantes de la salud en la población del Corredor Biológico Interurbano María Aguilar, Gran Área Metropolitana de Costa Rica*.
- INVU. (2013). *Plan GAM 13 - 30*. Recuperado 8 de noviembre de 2023, de <https://www.invu.go.cr/plan-gam-13-30>. <https://www.invu.go.cr/plan-gam-13-30>.
- Ioja, C. I., Badiu, D. L., Haase, D., Hossu, A. C., & Niță, M. R. (2021). How about water? Urban blue infrastructure management in Romania. *Cities*, 110
- Jung, M. (2013). LecoS-A QGIS plugin for automated landscape ecology analysis. *PeerJ Pre Prints*,
- Kirschner, V., Mackû, K., Moravec, D., & Mañas, J. (2023). Measuring the relationships between various urban green spaces and local climate zones. *Scientific Reports*, 13(1)
- Lindberg, F., Grimmond, C. S. B., Gabey, A., Huang, B., Kent, C. W., Sun, T., Theeuwes, N. E., Järvi, L., Ward, H. C., & Capel-Timms, I. (2018). Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services. *Environmental Modelling & Software*, 99



- Marando, F., Heris, M. P., Zulian, G., Udías, A., Mentaschi, L., Chrysoulakis, N., Parastatidis, D., & Maes, J. (2022). Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society*, 77
- Martínez González, N. P. (2021). Evolución de las islas de calor urbanas en el período 2002-2020 y su relación con las zonas climáticas locales de las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén, Región del Biobío, Chile.
- Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J., & Voogt, J. (2020). Urban climates and climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, 45
- Decreto Ejecutivo 40043- MINAE. Regulación del Programa Nacional de Corredores Biológicos. (2017).
http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?para_m1=NRTC&nValor1=1&nValor2=83424&nValor3=107128&strTipM=TC
- MINAE-GEF-PNUD. (2019). *Diagnóstico multidimensional del Corredor Biológico Interurbano María Aguilar. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – Proyecto Conservando la biodiversidad a través de la gestión sostenible en los paisajes de producción en Costa Rica*. <https://www.undp.org/es/costa-rica/publicaciones/diagnostico-multidimensional-del-corredor-biologico-interurbano-maria-aguilar-cbima>
- MINAE-GEF-PNUD. (2021). *OCTUBRE URBANO 2021 - MOCUPP*. Recuperado 25 de abril de 2024, de <https://mocupp.org/octubre-urbano-2021/>. <https://mocupp.org/octubre-urbano-2021/>
- MINAE-SINAC-GIZ. (2021a). *Atlas de Servicios Ecosistémicos de la Gran Área Metropolitana. Biodiver_ City San José*. <https://atlasverde.net/>.



MINAE-SINAC-GIZ. (2021b). *Guía de Soluciones Basadas en Naturaleza (SBN). Biodiver_ City San José*. <https://biocorredores.org/biodiver-city-sanjose/guia-de-soluciones-basadas-en-naturaleza-sbn>.

MINAE-SINAC-GIZ. (2022). *Iniciativa Ciudad Verde 5.1. Biodiver_ City San José*. . (). <https://biocorredores.org/biodiver-city-sanjose/iniciativas/publicacion-ciudad-verde-51>.

MINAE-SINAC-PNUD. (2020). *Monitoreo del Cambio de Uso y Cobertura de la Tierra en Paisajes Productivos Urbanos (Mocupp Urbano). Metodología para el Mapeo de la trama verde en el Corredor Biológico Interurbano Río María Aguilar, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Costa Rica*.

MINAE-SINAC-PNUD. (2022). *Monitoreo del Cambio de Uso y Cobertura de la Tierra en Paisajes Productivos Urbanos (Mocupp Urbano). Corredor Biológico Interurbano María Aguilar (CBIMA). Datos para el 2021*.

Miranda Quirós, M., Gutiérrez Miranda, M., Calderón Jiménez, E., & Jiménez Elizondo, K. (2022). El Corredor Biológico Interurbano María Aguilar y el desarrollo de soluciones basadas en la naturaleza.

Decreto Ejecutivo N° 42465- MOPT-MINAE-MIVAH. Lineamientos generales para la incorporación de las medidas de resiliencia en infraestructura pública. (2020). http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=92722&nValor3=122841&strTipM=TC

Muhammad, F., Xie, C., Vogel, J., & Afshari, A. (2022). Inference of local climate zones from GIS data, and comparison to WUDAPT classification and custom-fit clusters. *Land*, 11(5)



Municipalidad de Curridabat. (2019). *Islas de calor, impactos y respuestas: El caso del cantón de curridabat.*

ONU. (2020). *Objetivos y metas de Desarrollo sostenible - Desarrollo sostenible.* .

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>

Onu-Habitat. (2016). *La nueva agenda urbana.* <https://onuhabitat.org.mx/index.php/la-nueva-agenda-urbana-en-espanol>. <https://onuhabitat.org.mx/index.php/la-nueva-agenda-urbana-en-espanol>

Ortiz-Malavasi, E. (2014). Atlas de Costa Rica 2014.

Parvar, Z., Mohammadzadeh, M., & Saeidi, S. (2024). LCZ framework and landscape metrics: Exploration of urban and peri-urban thermal environment emphasizing 2/3D characteristics. *Building and Environment, 254*

Phelan, P. E., Kaloush, K., Miner, M., Golden, J., Phelan, B., Silva III, H., & Taylor, R. A. (2015). Urban heat island: mechanisms, implications, and possible remedies. *Annual Review of Environment and Resources, 40*

PNUD. (2021). *Con apoyo del PNUD, proyecto INTERLACE ampliará acciones para mejorar paisajes urbanos en el CBIMA | UNDP.* <https://www.undp.org/es/costa-rica/noticias/con-apoyo-del-pnud-proyecto-interlace-ampliara-acciones-para-mejorar-paisajes-urbanos-en-el-cbima>.



- Rakoto, P. Y., Deilami, K., Hurley, J., Amati, M., & Sun, Q. C. (2021). Revisiting the cooling effects of urban greening: Planning implications of vegetation types and spatial configuration. *Urban Forestry & Urban Greening*, 64
- Sancho Rodríguez, J. (2021). Corredores biológicos de Costa Rica: estrategia de conservación participativa. *Ambientico*, 280
- Sinnett, D., Calvert, T., & Smith, N. (2019). Do Built Environment Assessment Systems Include High-Quality Green Infrastructure? *Planning Cities with Nature: Theories, Strategies and Methods*,
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12)10.1175/BAMS-D-11-00019.1
- TEVU. (s.f.). *TEVU - Transición hacia una economía verde urbana*. Recuperado 24 de octubre de 2023, de <https://www.tevucr.org/somos-tevu>. <https://www.tevucr.org/somos-tevu>.
- Tietzmann e Silva, J. A., Giesta, J. P., de Araújo, L. M., & dos Santos, M. R. (2019). Establishing Payment for Environmental Services in Urban Areas. *Planning Cities with Nature: Theories, Strategies and Methods*,
- Von Breymann Miranda, H. (2017). Morfología y regulación urbana en la transformación de la ciudad. El caso de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica. *Revistarquis*, 6(2)
- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3)
- Wong, N. H., Tan, C. L., Kolokotsa, D. D., & Takebayashi, H. (2021). Greenery as a mitigation and adaptation strategy to urban heat. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(3)



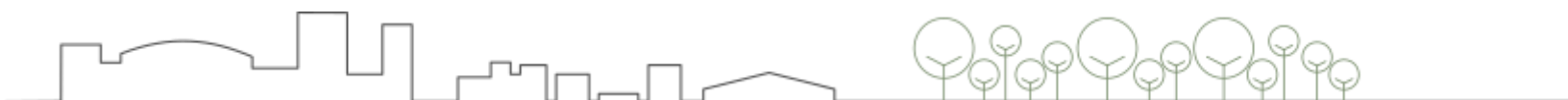
Yu, Z., Yang, G., Zuo, S., Jørgensen, G., Koga, M., & Vejre, H. (2020). Critical review on the cooling effect of urban blue-green space: A threshold-size perspective. *Urban Forestry & Urban Greening*, 49

Zeng, P., Sun, F., Liu, Y., Tian, T., Wu, J., Dong, Q., Peng, S., & Che, Y. (2022). The influence of the landscape pattern on the urban land surface temperature varies with the ratio of land components: Insights from 2D/3D building/vegetation metrics. *Sustainable Cities and Society*, 78

Zhang, X., Kasimu, A., Liang, H., Wei, B., Aizizi, Y., Zhao, Y., & Rehemani, R. (2023). Construction of Urban Thermal Environment Network Based on Land Surface Temperature Downscaling and Local Climate Zones. *Remote Sensing*, 15(4)

Zhang, Y., Wang, Y., Ding, N., & Yang, X. (2022). Spatial pattern impact of impervious surface density on urban heat island effect: A case study in Xuzhou, China. *Land*, 11(12)

Zhou, D., Xiao, J., Froking, S., Zhang, L., & Zhou, G. (2022). Urbanization contributes little to global warming but substantially intensifies local and regional land surface warming. *Earth's Future*, 10(5), e2021EF002401.



Índice de Cuadros

Cuadro 1. <i>Pruebas de normalidad y homogeneidad de las varianzas</i>	69
Cuadro 2. <i>Tabla de análisis de la varianza (ANOVA)</i>	69
Cuadro 3. <i>Matriz de correlación de variables y métricas del paisaje</i>	72
Cuadro 4. <i>Intensidad promedio de ICU e Intensidad máxima de ICU de zonas locales</i> .75	

Índice de Figuras

Figura 1. <i>Diagrama de causa y efecto del fenómeno de ICU</i>	15
Figura 2. <i>Factores que influyen en el calentamiento urbano de CBIMA</i>	17
Figura 3. <i>Mapa de ubicación de la microcuenca del Río María Aguilar</i>	18
Figura 4. <i>Microcuenca del Corredor Biológico Interurbano María Aguilar</i>	18
Figura 5. <i>Crecimiento de la mancha urbana del Gran Área Metropolitana</i>	26
Figura 6. <i>Zonas de prioridad para densificación Plan GAM 2013</i>	28
Figura 7. <i>Corredor Biológico Interurbano María Aguilar</i>	31
Figura 8. <i>Intensidad, máximo térmico y forma o configuración de la isla de calor</i>	34
Figura 9. <i>Repositorio de código de Ermida et al. (2020)</i>	46
Figura 10. <i>Código de Ermida et al. (2020), modificado</i>	47
Figura 11. <i>LST generada con el código de Ermida et al. (2020), modificado</i>	47
Figura 12. <i>Descarga de capas de Trama Verde y Usos de la Tierra CBIMA 2021</i>	48
Figura 13. <i>Mosaico Sentinel 2 del CBIMA, para marzo del 2023</i>	49
Figura 14. <i>Modelo de elevación digital (DEM) del CBIMA corregido</i>	51
Figura 15. <i>Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI), marzo 2023</i>	52
Figura 16. <i>Funciones de RStudio utilizadas en el análisis estadístico</i>	54
Figura 17. <i>Métricas de los fragmentos</i>	55
Figura 18. <i>Métricas del paisaje</i>	55



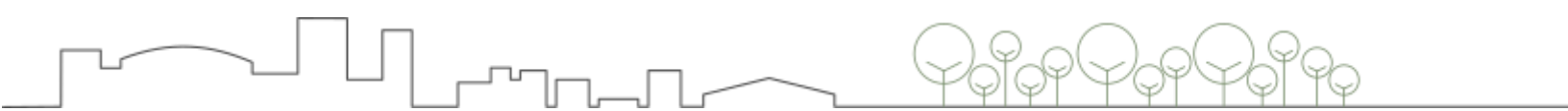
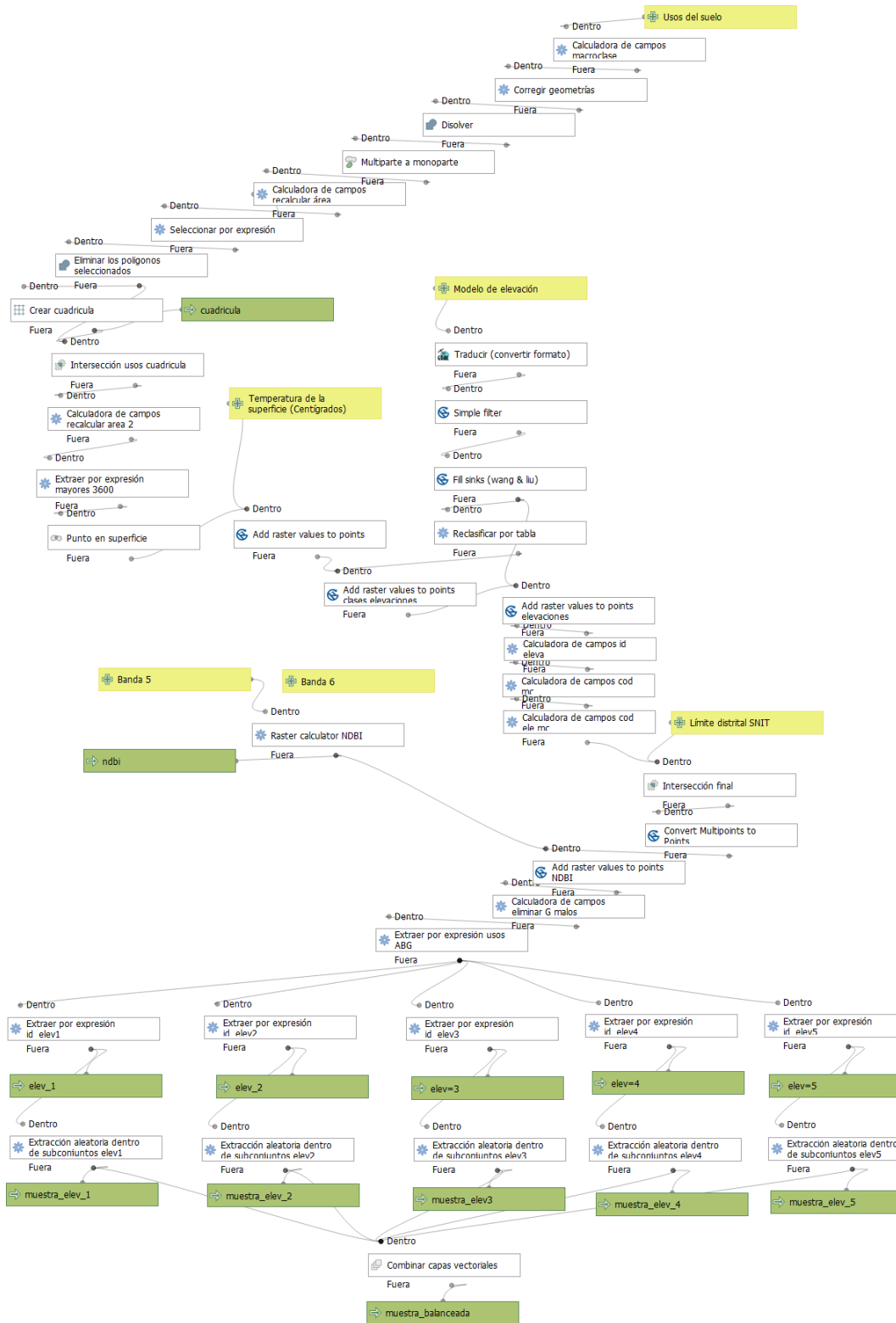
Figura 19. <i>LST promedio</i>	56
Figura 20. <i>Análisis de componentes principales</i>	56
Figura 21. <i>Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), marzo del 2023</i>	59
Figura 22. <i>Isotermas LST, CBIMA, marzo del 2023</i>	61
Figura 23. <i>Distribución de LST por cantón (marzo,2023)</i>	62
Figura 24. <i>LST promedio por cantón (marzo,2023)</i>	62
Figura 25. <i>Distribución de LST por distrito (marzo,2023)</i>	63
Figura 26. <i>LST promedio por distrito (marzo,2023)</i>	63
Figura 27. <i>Cobertura del suelo del CBIMA actualizada para marzo del 2023</i>	64
Figura 28. <i>Zonas según elevación en m.s.n.m.</i>	65
Figura 29. <i>LST promedio por zonas de elevación en m.s.n.m. (marzo,2023)</i>	65
Figura 30. <i>Variación de LST de cada tipo de cobertura según la zona de elevación</i>	66
Figura 31. <i>Comparación de LST de las 3 coberturas por zona de elevación</i>	67
Figura 32. <i>Gráficos del modelo estadístico (QQ-Plot y Residuales vs Predichos)</i>	68
Figura 33. <i>Intervalos de confianza de comparaciones múltiples por zonas</i>	70
Figura 34. <i>Regresión lineal entre la proporción de infraestructura (LP-G) y la LST</i>	73
Figura 35. <i>Zonas con infraestructura a escala local para análisis de ICU</i>	75
Figura 36. <i>Zona local 13</i>	76
Figura 37. <i>Zona local 1</i>	76
Figura 38. <i>Zona local 3</i>	77
Figura 39. <i>Zona local 7</i>	77
Figura 40. <i>Zona local 12</i>	78
Figura 41. <i>Zona local 18</i>	78
Figura 42. <i>Diagrama síntesis de zonas locales estudiadas</i>	79
Figura 43. <i>Espacios verdes estudiados</i>	80
Figura 44. <i>Efecto de enfriamiento de las áreas verdes seleccionadas</i>	81



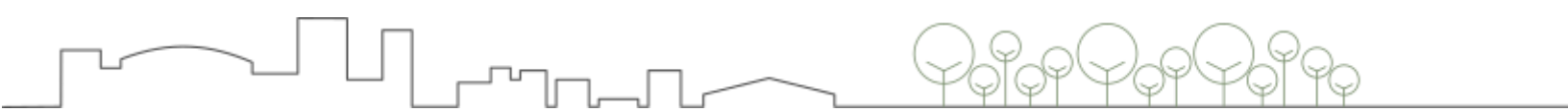
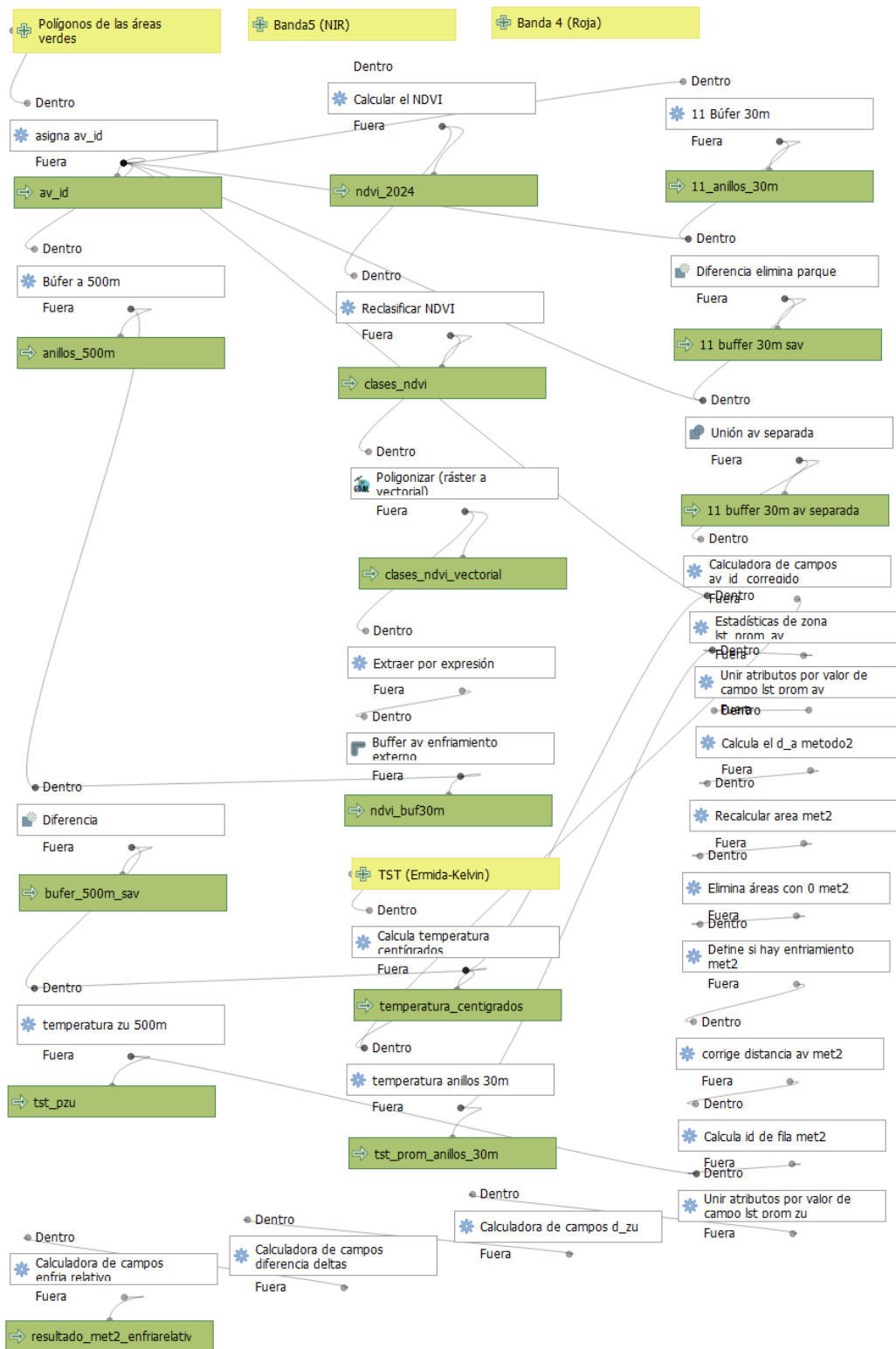
Figura 45. <i>Espacio verde 19</i>	82
Figura 46. <i>Espacio verde 19</i>	83
Figura 47. <i>Área verde 1 (Zona protegida del Río María Aguilar)</i>	84
Figura 48. <i>Área verde 1 (Zona protegida del Río María Aguilar)</i>	85
Figura 49. <i>Área verde 2 (Zona protegida del Río María Aguilar)</i>	86
Figura 50. <i>Área verde 2 (Zona protegida del Río María Aguilar)</i>	87
Figura 51. <i>Área verde 17 (Zona protegida del Río María Aguilar)</i>	88
Figura 52. <i>Área verde 17 (Zona protegida del Río María Aguilar)</i>	89
Figura 53. <i>Área verde 18 (Zona protegida del Río Ocloro)</i>	90
Figura 54. <i>Área verde 18 (Zona protegida del Río Ocloro)</i>	91
Figura 55. <i>Área verde 16 (Plaza Máximo Fernández, San Pedro)</i>	92
Figura 56. <i>Área verde 16 (Plaza Máximo Fernández, San Pedro)</i>	93
Figura 57. <i>Área verde 11 (Zapote, San José)</i>	94
Figura 58. <i>Área verde 11 (Zapote, San José)</i>	95
Figura 59. <i>Área verde 4 (Parque Colonia Kennedy, San Sebastián)</i>	96
Figura 60. <i>Área verde 4 (Parque Colonia Kennedy, San Sebastián)</i>	97
Figura 61. <i>Relación de intensidad de enfriamiento y tamaño del espacio verde</i>	98
Figura 62. <i>Relación de intensidad de enfriamiento y área de cobertura arbórea</i>	98
Figura 63. <i>Área verde 8 (Parque de la Paz)</i>	99
Figura 64. <i>Relación intensidad de enfriamiento y tamaño del Parque de La Paz</i>	99
Figura 65. <i>Diagrama síntesis de espacios verdes estudiados</i>	100
Figura 66. <i>Recomendaciones para conservación de bosques y áreas naturales</i>	103
Figura 67. <i>Recomendaciones para la integración de áreas verdes urbanas</i>	105
Figura 68. <i>Recomendaciones considerando la morfología urbana</i>	107
Figura 69. <i>Visión integral de territorio</i>	108



Apéndice A. Modelo cartográfico Objetivo 1 (Selección de muestra)



Apéndice B. Modelo cartográfico Efecto de enfriamiento Espacios Verdes



Apéndice C. Ubicación y características de zonas locales estudiadas

Zona Local	Ubicación Geográfica	Métricas del paisaje influyentes	Temperatura (°C)
1 Zona urbana, distritos San Sebastián y Hatillo, San José	CRTM05 (EPSG:5367) x: 490246.150 y: 1096329.675	Infraestructura: Proporción: 0,934 Fragmentación: 0,129	LST promedio: 44,319
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.91486 Longitud: -84.08895	Diversidad de Simpson: 0,123	▲ ICU: 12,506
2 Zona urbana, distrito Hospital, San José.	CRTM05 (EPSG:5367) x: 490157.227 y: 1097379.984	Infraestructura: Proporción: 0,973 Fragmentación: 0,053	LST promedio: 42,895
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.92436 Longitud: -84.08976	Diversidad de Simpson: 0,052	▲ ICU: 11,082
3 Zona urbana, distrito Catedral, San José, San José.	CRTM05 (EPSG:5367) x: 491470.138 y: 1097978.793	Infraestructura: Proporción: 0,971 Fragmentación: 0,057	LST promedio: 44,512
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.92978 Longitud: -84.07779	Diversidad de Simpson: 0,056	▲ ICU: 12,698
4 Zona urbana, distritos Carmen y Catedral, San José.	CRTM05 (EPSG:5367) x: 492129.380 y: 1098318.015	Infraestructura: Proporción: 0,648 Fragmentación: 0,584	LST promedio: 36,907
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.93285 Longitud: -84.07178	Diversidad de Simpson: 0,456	▲ ICU: 5,094
5 Zona urbana, distrito Zapote, San José.	CRTM05 (EPSG:5367) x: 493319.709 y: 1097294.567	Infraestructura: Proporción: 0,729 Fragmentación: 0,488	LST promedio: 38,701
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.92359 Longitud: -84.06092	Diversidad de Simpson: 0,395	▲ ICU: 6,887
6 Zona urbana, distritos Curridabat, Zapote y San Pedro.	CRTM05 (EPSG:5367) x: 494615.793 y: 1097108.206	Infraestructura: Proporción: 0,374 Fragmentación: 0,968	LST promedio: 34,908
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.92191 Longitud: -84.04910	Diversidad de Simpson: 0,471	▲ ICU: 3,094



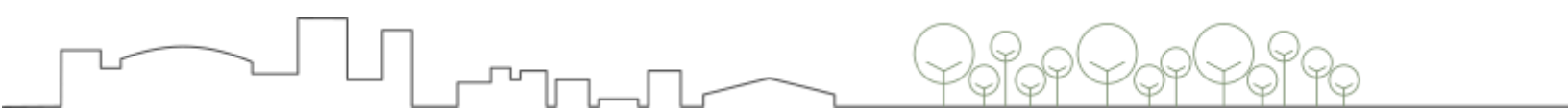
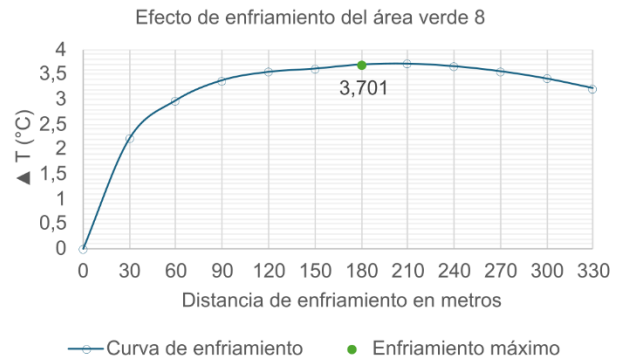
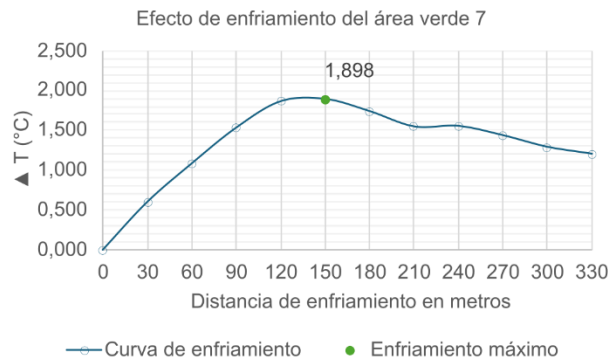
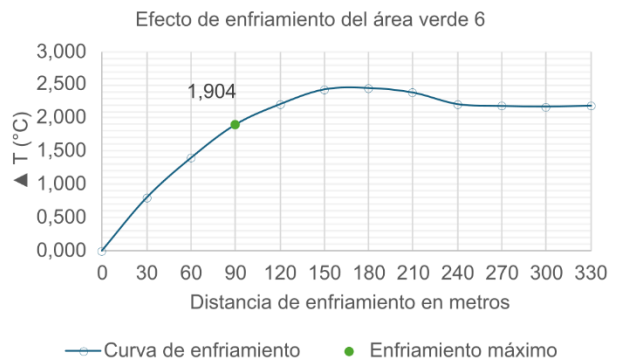
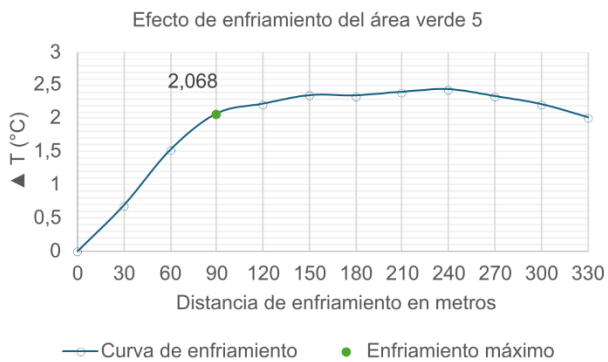
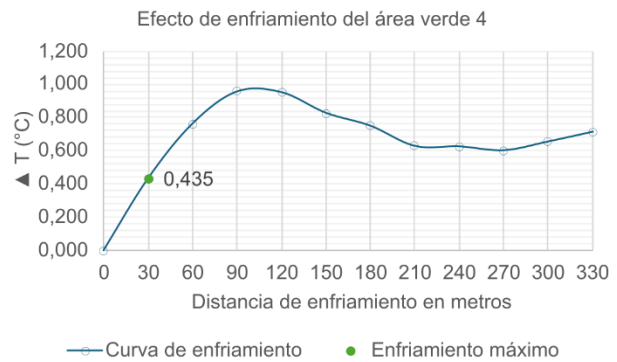
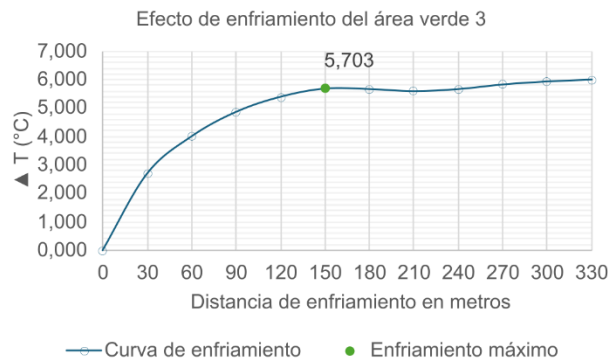
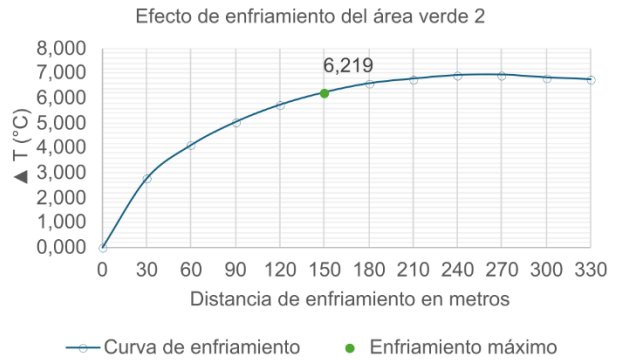
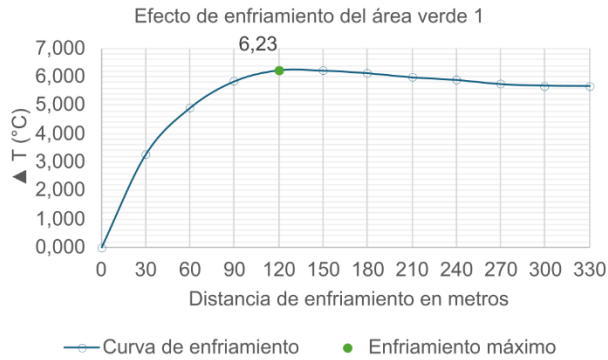
Zona Local	Ubicación Geográfica	Métricas del paisaje influyentes	Temperatura (°C)
7 Zona urbana, distrito Curridabat, Curridabat, San José. Área (ha): 9,919	CRTM05 (EPSG:5367) x: 495462.643 y: 1096921.121	Infraestructura: Proporción: 0,978 Fragmentación: 0,044	LST promedio: 43,569
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.92022 Longitud: -84.04138	Diversidad de Simpson: 0,043	▲ ICU: 12,44
8 Zona urbana, distrito Curridabat, Curridabat, San José. Área (ha): 9,202	CRTM05 (EPSG:5367) x: 495882.670 y: 1097377.616	Infraestructura: Proporción: 0,924 Fragmentación: 0,146	LST promedio: 40,943
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.92435 Longitud: -84.03755	Diversidad de Simpson: 0,141	▲ ICU: 9,814
9 Zona urbana, distrito Curridabat, Curridabat, San José. Área (ha): 7,317	CRTM05 (EPSG:5367) x: 496181.901 y: 1096148.415	Infraestructura: Proporción: 0,933 Fragmentación: 0,129	LST promedio: 42,132
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.91323 Longitud: -84.03482	Diversidad de Simpson: 0,125	▲ ICU: 11,003
10 Zona urbana, distrito Curridabat, Curridabat, San José. Área (ha): 12,280	CRTM05 (EPSG:5367) x: 497082.848 y: 1097070.710	Infraestructura: Proporción: 0,420 Fragmentación: 0,871	LST promedio: 35,153
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.92157 Longitud: -84.02660	Diversidad de Simpson: 0,699	▲ ICU: 4,024
11 Zona urbana, distrito San Pedro, Montes de Oca, San José. Área (ha): 7,693	CRTM05 (EPSG:5367) x: 496590.160 y: 1098477.298	Infraestructura: Proporción: 0,588 Fragmentación: 0,693	LST promedio: 33,496
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.93429 Longitud: -84.03110	Diversidad de Simpson: 0,484	▲ ICU: 2,367
12 Zona urbana, distrito Sánchez, Curridabat, San José. Área (ha): 21,398	CRTM05 (EPSG:5367) x: 498043.835 y: 1096301.027	Infraestructura: Proporción: 0,468 Fragmentación: 0,858	LST promedio: 32,913
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.91462 Longitud: -84.01784	Diversidad de Simpson: 0,665	▲ ICU: 1,785

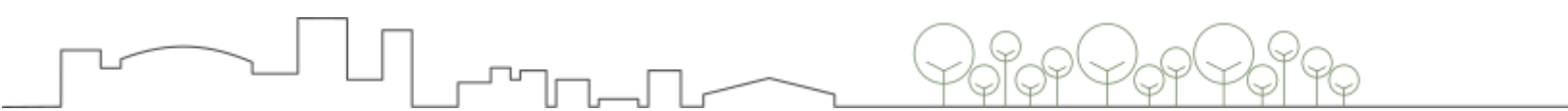
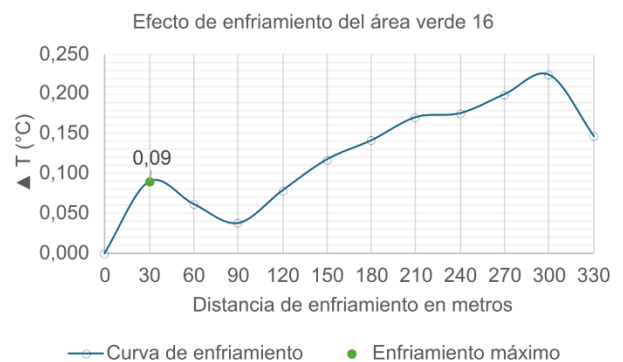
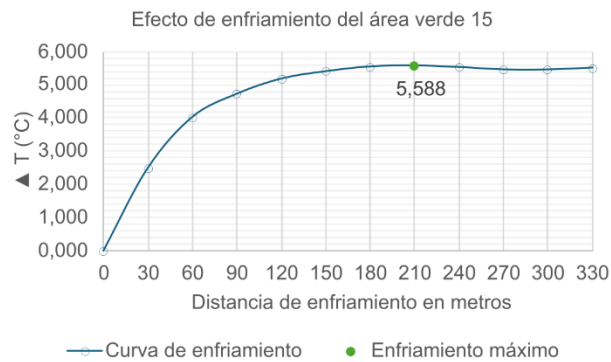
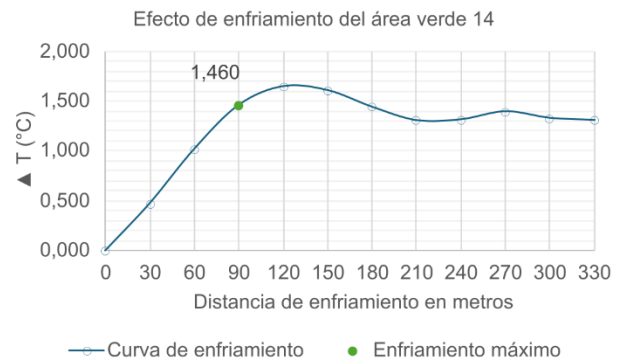
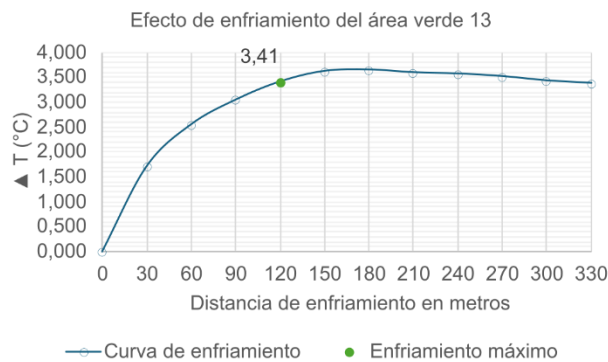
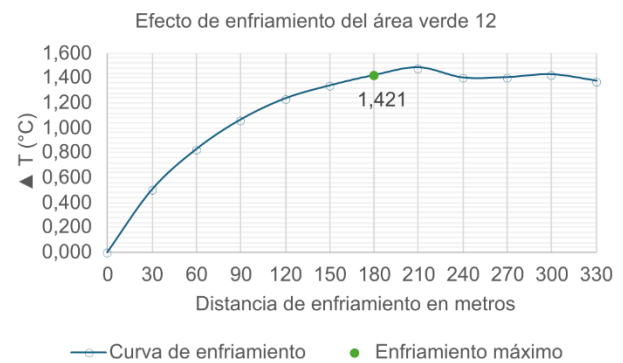
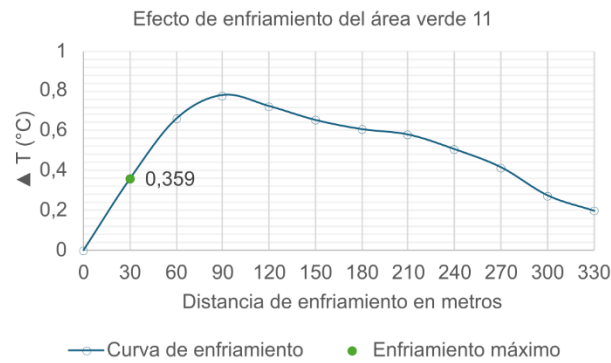
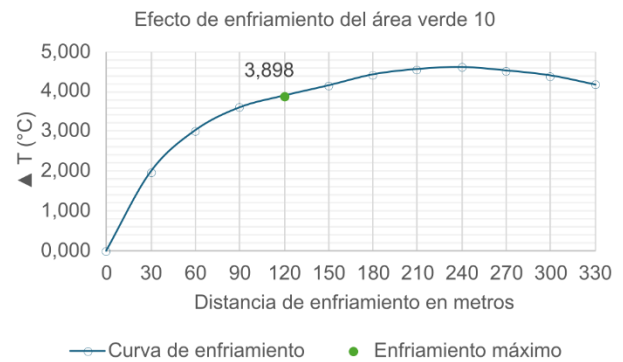
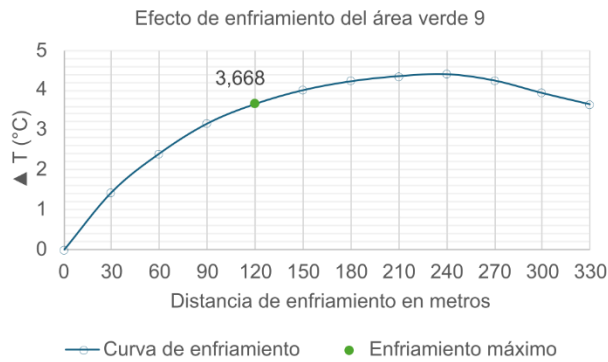


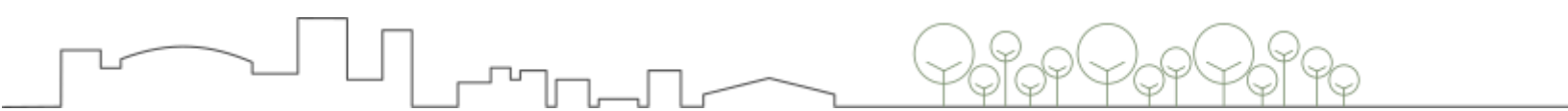
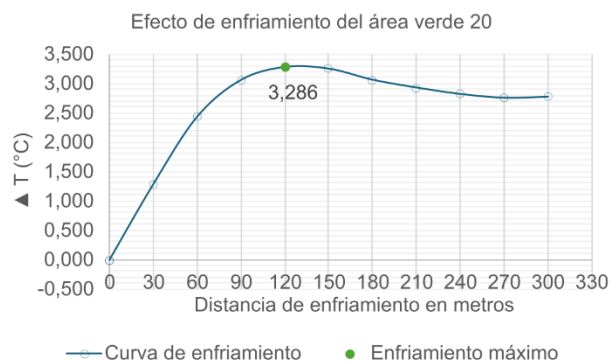
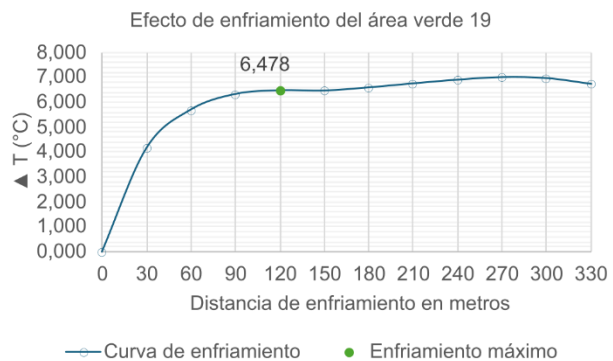
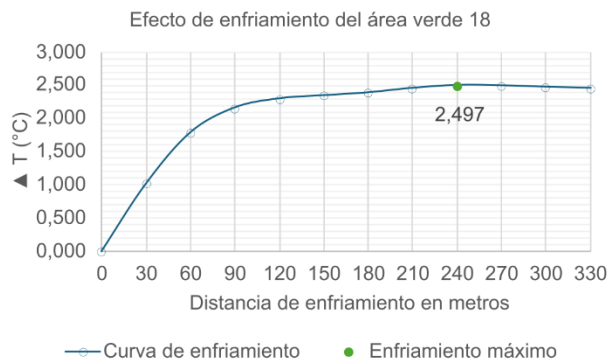
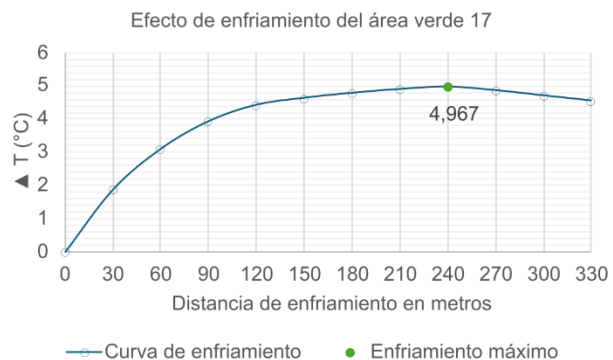
Zona Local	Ubicación Geográfica	Métricas del paisaje influyentes	Temperatura (°C)
13 Zona urbana, distritos San Juan y Concepción, La Unión, Cartago. Área (ha): 23,867	CRTM05 (EPSG:5367) x: 499893.876 y: 1097231.451	Infraestructura: Proporción: 0,946 Fragmentación: 0,109	LST promedio: 43,611
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.92303 Longitud: -84.00097	Diversidad de Simpson: 0,102	▲ ICU: 12,841
14 Zona urbana, distrito Concepción, La Unión, Cartago. Área (ha): 9,211	CRTM05 (EPSG:5367) x: 500530.172 y: 1097835.824	Infraestructura: Proporción: 0,921 Fragmentación: 0,152	LST promedio: 38,482
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.92849 Longitud: -83.99516	Diversidad de Simpson: 0,148	▲ ICU: 7,712
15 Zona urbana, distrito Granadilla, Curridabat, San José. Área (ha): 10,684	CRTM05 (EPSG:5367) x: 498178.333 y: 1098769.628	Infraestructura: Proporción: 0,947 Fragmentación: 0,104	LST promedio: 37,052
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.93694 Longitud: -84.01661	Diversidad de Simpson: 0,101	▲ ICU: 6,282
16 Zona urbana, distrito Sánchez, Curridabat, San José. Área (ha): 40,291	CRTM05 (EPSG:5367) x: 498956.211 y: 1097482.479	Infraestructura: Proporción: 0,294 Fragmentación: 0,992	LST promedio: 33
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.92530 Longitud: -84.00952	Diversidad de Simpson: 0,477	▲ ICU: 2,23
17 Zona urbana, distrito San Ramón, La Unión, Cartago. Área (ha): 28,418	CRTM05 (EPSG:5367) x: 499780.115 y: 1098898.563	Infraestructura: Proporción: 0,506 Fragmentación: 0,898	LST promedio: 33,147
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.93810 Longitud: -84.00200	Diversidad de Simpson: 0,551	▲ ICU: 2,377
18 Zona urbana, distrito San Juan, La Unión, Cartago. Área (ha): 16,337	CRTM05 (EPSG:5367) x: 498954.801 y: 1096184.763	Infraestructura: Proporción: 0,551 Fragmentación: 0,702	LST promedio: 32,83
	WGS84 (EPSG:4326) Latitud: 9.91356 Longitud: -84.00953	Diversidad de Simpson: 0,566	▲ ICU: 2,06



Apéndice D. Curvas de enfriamiento

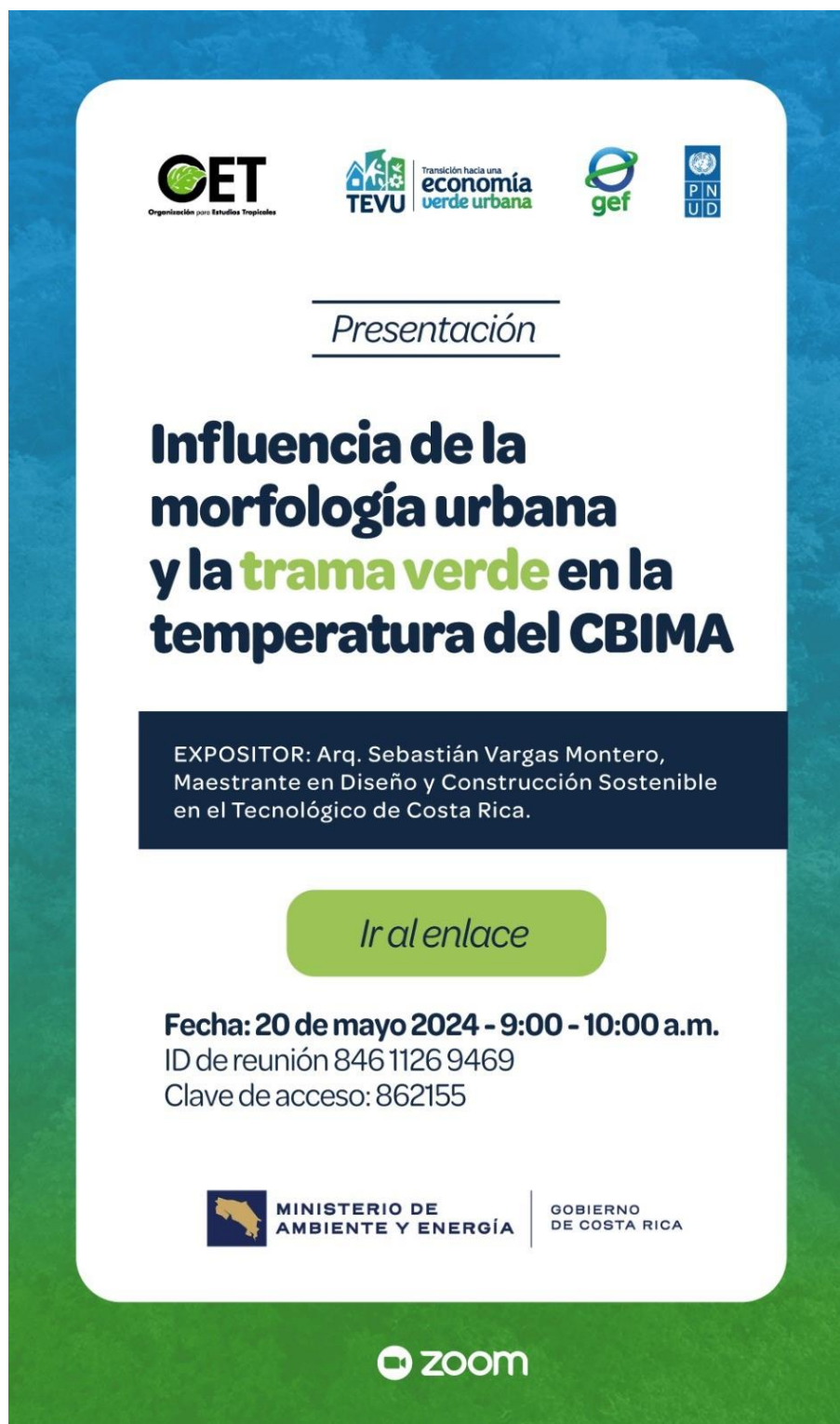






Apéndice E. Estrategia de socialización y divulgación de los resultados

Invitación a la presentación realizada como parte de la estrategia:



The poster features a blue and green background with a white central area. At the top, there are logos for OET (Organización para Estudios Tropicales), TEVU (Transición hacia una economía verde urbana), gef, and PNUD. The title 'Presentación' is underlined. The main title is 'Influencia de la morfología urbana y la trama verde en la temperatura del CBIMA'. Below this, a dark blue box contains the exhibitor's name: 'EXPOSITOR: Arq. Sebastián Vargas Montero, Maestrante en Diseño y Construcción Sostenible en el Tecnológico de Costa Rica.' A green button with the text 'Ir al enlace' is positioned below. The date and time are 'Fecha: 20 de mayo 2024 - 9:00 - 10:00 a.m.', with meeting ID '846 1126 9469' and access key '862155'. At the bottom, logos for the 'MINISTERIO DE AMBIENTE Y ENERGÍA' and 'GOBIERNO DE COSTA RICA' are shown, along with the Zoom logo.

OET
Organización para Estudios Tropicales

TEVU | Transición hacia una
economía
verde urbana

gef

PNUD

Presentación

Influencia de la morfología urbana y la trama verde en la temperatura del CBIMA

EXPOSITOR: Arq. Sebastián Vargas Montero,
Maestrante en Diseño y Construcción Sostenible
en el Tecnológico de Costa Rica.

Ir al enlace

Fecha: 20 de mayo 2024 - 9:00 - 10:00 a.m.
ID de reunión 846 1126 9469
Clave de acceso: 862155

 **MINISTERIO DE AMBIENTE Y ENERGÍA** | **GOBIERNO DE COSTA RICA**





Imágenes de la reunión virtual realizada con representantes municipales y miembros de la unidad técnica del Proyecto TEVU:

The screenshot displays a virtual meeting interface. On the left, a map titled "Ubicación y delimitación del área de estudio : Microcuenca de río María Aguilar (CBIMA)." shows the study area with various geographical features and a legend. The legend includes: Límite microcuenca CBIMA (red outline), Zona urbana Plan GAM (dotted line), Gran Área Metropolitana (grey area), Costa Rica (white area), Cantones CBIMA (orange, blue, green, brown, and light green areas), Alajuela, Curridabat, La Unión, Montes de Oca, and San José. The map also shows coordinates and a scale. On the right, a list of participants is visible, including names like Helber Guillén, Ingrid Sandoval, Oscar Benavides, Paula Carasola, Fabrice Ballester, mhoffmaister, Susana Alfaro, alberto.urena, Gerardo Hernández, Enyula, Marlon Alfaro, Paola González, Ana Alicia Rojas..., Julio Varela, Kathia Alfaro-A..., Susana Alfaro, Kelly Mena, Emilia Jiménez..., Cristian, read.ai meeting..., and Karen Bermúdez. The meeting is hosted by TEVU OET. Logos for MDS and TEC (Tecnológico de Costa Rica) are also present.

The screenshot shows a virtual meeting chat and participant list. The chat window on the left displays messages from participants: Gerardo Hernández (9:00) says "¡Buenos días!", mhoffmaister (9:00) says "Buenos Días", Kathia Alfaro-Arias, TEVU (9:01) says "Buen día :)", and read.ai meeting notes (9:02) provides a summary of the meeting. The participant list on the right shows 30 participants, including Enyula, TEVU OET (Anfitrión, yo), Juan Sebastián Vargas, Fabrice Ballester Jiménez, alberto.urena, Ana Alicia Rojas Cordero, Cristian, Daniela Villalta, David Vega Bonilla, and Emilia Jimenez Jimenez. The meeting is titled "Influencia de la morfología urbana..." and the chat is in Spanish.

