

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y TECNOLOGIA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO



## EFECTO DE LA COBERTURA VEGETAL SOBRE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL TERRESTRE: ANÁLISIS MEDIANTE TELEDETECCIÓN Y SIMULACIÓN MICROCLIMÁTICA EN SAN QUINTÍN, B. C.

*T E S I S*

que para obtener el grado de

**MAESTRA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO**

Presenta

**BRENDA YADIRA GONZÁLEZ LÓPEZ**

Directora de Tesis

**DRA. KAREN ESTRELLA MARTÍNEZ TORRES**

Co-Director de Tesis

**DR. JESÚS ABELARDO LICON PORTILLO**

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, 9 DE AGOSTO DE 2024

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y LA TECNOLOGÍA



**MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO**

EFFECTO DE LA COBERTURA VEGETAL SOBRE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL TERRESTRE: ANÁLISIS MEDIANTE TELEDETECCIÓN Y SIMULACIÓN MICROCLIMÁTICA EN SAN QUINTÍN, B. C.

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO PRESENTA

**BRENDA YADIRA GONZÁLEZ LÓPEZ**

Correo electrónico: [brenda.gonzalez10@uabc.edu.mx](mailto:brenda.gonzalez10@uabc.edu.mx)  
Identificador ORCID: 0000-0001-7705-0522

Directora de tesis: Dra. Karen Estrella Martínez Torres  
Identificador ORCID: 0000-0002-6744-8622

Co-Director de tesis: Dr. Jesús Abelardo Licón Portillo  
Identificador ORCID: 0000-0003-2091-1103

Revisor de tesis: Dr. Marcos Eduardo González Trevizo

Revisor de tesis: Dr. Francisco Fernández Melchor

Revisor de tesis: Mtro. Alan García Haro

**Ensenada, B.C. 9 de agosto de 2024**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO**  
**MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO**

**Efecto de la cobertura vegetal sobre la temperatura superficial  
terrestre: análisis mediante teledetección y simulación  
microclimática en San Quintín, B. C.**  
**TESIS**

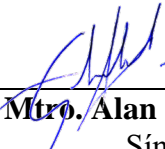
Que para obtener el grado de Maestría en Arquitectura, Urbanismo y Diseño presenta:

**Brenda Yadira González López**


Aprobada por:

  
\_\_\_\_\_  
**Dra. Karen Estrella Martínez Torres**  
Directora de tesis

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Jesús Abelardo Licón Portillo**  
Síno

  
\_\_\_\_\_  
**Mtro. Alan García Haro**  
Síno

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Marcos Eduardo González Trevizo**  
Síno

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Francisco Fernández Melchor**  
Síno

Ensenada, Baja California, México. 31 de julio de 2024



## DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Declaro que la tesis que se presenta contiene material original que no ha sido presentado para la obtención de un grado académico o diploma en esta u otra institución de educación superior. Asimismo, declaro que hasta donde yo sé no contiene material previamente publicado o escrito por otra persona excepto donde se reconoce como tal a través de las citas.

Ensenada, B.C., 31 de julio de 2024

---

**Brenda Yadira González López**

## AVAL DE TERMINACIÓN DE TESIS

Fecha: 31 de julio de 2024

DR. JULIÁN ISRAEL AGUILAR DUQUE  
Director de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
Presente.-

Para dar cumplimiento al artículo 106 del ESTATUTO ESCOLAR DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, en su TÍTULO CUARTO DE LOS TÍTULOS PROFESIONALES, GRADOS ACADÉMICOS Y DIPLOMAS, CAPÍTULO ÚNICO, sobre los requisitos para la obtención del grado de **Maestría en Arquitectura, Urbanismo y Diseño**, como director de tesis en la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento de Arquitectura y Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño Se emite la presente acta que avala que la estudiante:

**BRENDA YADIRA GONZÁLEZ LÓPEZ**

ha concluido su tesis de grado titulada:

**EFFECTO DE LA COBERTURA VEGETAL SOBRE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL  
TERRESTRE: ANÁLISIS MEDIANTE TELEDETECCIÓN Y SIMULACIÓN MICROCLIMÁTICA  
EN SAN QUINTÍN, B. C.**

Lo anterior en virtud de que se realizaron las correcciones y recomendaciones del comité tutorial, por lo que ha sido aprobada para el proceso de presentación de examen de grado.

DIRECTORA DE TESIS

**DRA. KAREN ESTRELLA MARTÍNEZ TORRES**

FIRMA

## **DEDICATORIA**

### **A Dios**

Que me ha guiado y permitido tomar las decisiones correctas y de aprendizaje estando siempre rodeada de apoyo y amor.

### **A mis padres**

Quienes con amor me han apoyado en cada nueva etapa, son mi ejemplo y fortaleza y me demuestran que todo aquello que me proponga es posible con esfuerzo y dedicación.

### **A mi familia, a aquellos que están presentes y a quienes recuerdo con amor**

Que me recuerdan siempre cuáles son los momentos más valiosos de la vida.

## AGRADECIMIENTOS

A **CONAHCYT**, por la oportunidad para desarrollar la presente investigación con la beca otorgada, lo que me permitió desarrollar nuevas habilidades y crecer profesionalmente.

A **mi directora de tesis Dra. Karen Estrella Martínez Torres**, por guiarme en esta investigación, por su paciencia y el tiempo dedicado siempre con la mejor de las actitudes. Gracias por todo el conocimiento compartido y por guiarme a aprender más cada día y motivarme a ir un paso más adelante de las metas planteadas.

A **mi co-director de tesis Dr. Abelardo Licón Portillo y miembros del comité tutorial Mtro. Alan García Haro, Dr. Marcos Eduardo González Trevizo y Dr. Francisco Fernández Melchor**, por sus clases, guía y observaciones a lo largo de este trabajo.

A **el equipo PRISMA**, por todo el conocimiento compartido. Agradezco el encontrarme con personas que comparten el entusiasmo y compromiso de hacer de nuestro entorno un mejor lugar para vivir.

A **mi pareja**, que con su amor y paciencia me alienta en cada momento de dificultad y celebra cada meta cumplida. Gracias por creer en mí y motivarme a crecer en cada aspecto de la vida.

A **mis compañeros de maestría** que aligeraron este trayecto. Compartir con ustedes fue una agradable experiencia de aprendizaje. Gracias por los consejos y observaciones en cada etapa de este trayecto y por las nuevas amistades.

A **mi familia**, por todo el apoyo brindado.

## RESUMEN

En la actualidad, se ha observado un proceso de urbanización en las zonas rurales, asociado a la transformación del uso del suelo y la pérdida de cobertura vegetal, que es reemplazada por superficies impermeables. Lo anterior, afecta los servicios ecosistémicos de regulación, asociados al uso de la vegetación como medio para disminuir la temperatura y que se relaciona al fenómeno de Isla de Calor Urbana (ICU), misma que puede ser estudiada mediante un enfoque del cambio de temperatura superficial, conocido como la Isla Calor Urbana Superficial (SUHI, por sus siglas en inglés). Para el estudio de la SUHI se han utilizado técnicas como sensores remotos y simulaciones microclimáticas que permiten el análisis de la cobertura vegetal y su efecto sobre la Temperatura Superficial Terrestre (TST). La presente investigación tiene como objetivo evaluar distintas configuraciones de cobertura vegetal dentro de un cañón urbano para determinar cuál genera un mayor efecto de enfriamiento (CE, por sus siglas en inglés) sobre la TST, además se analizan los cambios de cobertura vegetal en los últimos cinco años en San Quintín, B.C. y su relación con la TST. Para el análisis de cambios de cobertura vegetal se procesaron datos del satélite Landsat 8-9 dentro del software ArcGIS para la obtención de valores de TST y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (IVDN). La parte experimental se llevó a cabo mediante la simulación de los escenarios propuestos en el software ENVI-met, mismos que fueron validados con datos obtenidos en una campaña de monitoreo en sitio durante el periodo cálido del año. Los resultados obtenidos mostraron un aumento en la TST de entre 6.62 °C y 8.47 °C en el periodo analizado y, una disminución en el rango medio del IVDN que fue del 0.21 al 0.09 determinando así una correlación inversa entre ambos. En cuanto a las configuraciones de cobertura vegetal, para el escenario del cañón urbano sin vegetación al centro (BA), la inclusión de arbolado agrupado intercalado sobre las banquetas logró disminuir la TST hasta 9.19 °C en el horario crítico del día (12 h 00 a 15 h 00), siendo esta la configuración óptima. Por el contrario, para el escenario del cañón con vegetación al centro (BB) la configuración dispersa fue la óptima al reducir la TST hasta 4.99 °C en el horario crítico y logró un CE de hasta 7.56 °C en el periodo cálido del día (8 h 00 a 16 h 00). Los hallazgos demostraron que la configuración de la cobertura vegetal genera diferencias significativas sobre el CE de la TST contrario al efecto sobre la Tair. También resaltaron la importancia de considerar además la temperatura del aire, vientos y morfología urbana, por lo que se recomienda un análisis integral de los factores que intervienen en el ambiente térmico. La presente investigación contribuye a la toma de decisiones sobre integración de arbolado en planeación urbana en una zona en proceso de urbanización.

**Palabras clave:** Isla de calor urbana, Temperatura superficial terrestre, Cobertura vegetal, Sensores remotos, Simulación microclimática.

## ABSTRACT

In rural areas, an urbanization phenomenon has unfolded, marked by shifts in land use and the replacement of vegetation with impermeable surfaces. This transformation impacts the ecological services provided by vegetation, particularly its role in regulating temperatures, thereby exacerbating the Urban Heat Island (UHI) effect, which can be studied through a surface temperature change approach, known as Surface Urban Heat Island (SUHI). Techniques such as remote sensing and microclimatic simulations have facilitated the study of SUHI, allowing for analysis of vegetation cover and its influence on Land Surface Temperature (LST). This research aims to evaluate different vegetation cover configurations within an urban canyon to determine which generates a greater Cooling Effect (CE) on LST, as well as to analyze changes in vegetation cover over the past five years in San Quintín, B. C., and their correlation with LST. Landsat 8-9 satellite data were processed within ArcGIS software to obtain LST and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) values for vegetation cover change analysis. The experimental phase was conducted using simulations of the proposed scenarios in the ENVI-met software, which were validated with data from on-site monitoring campaigns. The results obtained showed an increase in the TST of between 6.62 °C and 8.47 °C in the analyzed period and a decrease in the average range of the IVDN that was from 0.21 to 0.09, thus determining an inverse correlation between both. Regarding vegetation cover configurations, for the urban canyon scenario without vegetation at the center (BA), incorporating clustered-interspersed trees led to a reduction in LST of up to 9.19 °C at critical times of the day (12 h 00 a 15 h 00), this being the optimal configuration. Conversely, for the canyon scenario with vegetation in the center (BB), the scattered configuration was optimal, reducing LST by up to 4.99 °C during critical time and yielding an CE of up to 7.56 °C during the warmest part of the day (8 h 00 a 16 h 00). The findings demonstrated that vegetation cover generates significant differences on the CE of the LST contrary to the effect on the Tair. They also highlighted the importance of considering air temperature, winds, and urban morphology, therefore, a comprehensive analysis of factors affecting the thermal environment is recommended. This research contributes to decision-making regarding the integration of trees in urban planning in an area in the process of urbanization.

**Keywords:** Urban heat island, Land surface temperature, Vegetation coverage, Remote sensing, Microclimatic simulation.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	XI
LISTADO DE ABREVIATURAS .....	XIII
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>1. Planteamiento de la investigación .....</b>	<b>5</b>
1.1. Planteamiento del problema.....	5
1.2. Pregunta de investigación e hipótesis .....	7
1.3. Objetivos de investigación .....	7
1.3.1. Objetivo general.....	7
1.3.2. Objetivos específicos .....	7
1.4. Alcance y limitaciones.....	8
1.4.1. Alcance .....	8
1.4.2. Limitaciones.....	8
1.5. Justificación y motivación .....	9
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Marco teórico referencial.....</b>	<b>12</b>
2.1. Antecedentes .....	13
2.2. Cambio climático y urbanización .....	18
2.2.1. Isla de calor urbana .....	19
2.3. Isla de calor urbana superficial .....	19
2.3.1. Balance radiativo de la tierra .....	20
2.3.2. Deforestación .....	24
2.3.3. Cobertura vegetal .....	24
2.3.4. Uso de suelo / Cobertura de suelo.....	24
2.3.4.1. Índice de vegetación de diferencia normalizada .....	25
2.3.4.2. Índice de vegetación ajustado al suelo.....	26
2.3.4.3. Índice de edificación de diferencia normalizada .....	26
2.3.4.4. Relación entre el LULC y la TST .....	27
2.4. Vulnerabilidad ante el cambio climático .....	28
2.4.1. Indicadores para la evaluación de vulnerabilidad .....	28
2.5. Sensores remotos .....	29
2.5.1. Zonas climáticas locales .....	30
2.5.2. Procesamiento y análisis de imágenes satelitales .....	31
2.5.2.1. Emisividad de la superficie terrestre.....	32
2.5.3. Métodos de recuperación de TST .....	33
2.5.3.1. Algoritmo de canal único.....	34

2.5.3.2.	Algoritmo de ventana única .....	35
2.5.3.3.	Algoritmo de ventana dividida.....	36
2.5.3.4.	Ecuación de transferencia radiativa .....	37
2.5.3.5.	Método de corrección de emisividad .....	37
2.5.3.6.	Comparación de los métodos de recuperación de TST.....	38
2.5.4.	Software de análisis de imágenes satelitales.....	39
2.6.	Estrategias de mitigación de la TST .....	40
2.6.1.	Soluciones basadas en la naturaleza .....	40
2.6.2.	Infraestructura verde .....	41
2.6.3.	Arbolado urbano .....	43
2.6.4.	Parámetros de vegetación .....	44
2.7.	Simulación microclimática .....	45
2.7.1.	Software de simulación microclimática.....	46
2.7.2.	Mediciones de campo .....	48
<b>CAPÍTULO 3. MÉTODO .....</b>		<b>50</b>
<b>3.</b>	<b>Método .....</b>	<b>51</b>
3.1.	Diseño de la investigación .....	51
3.1.1.	Procedimiento metodológico .....	51
3.2.	Diseño del Experimento.....	54
3.2.1.	Objeto y variables de estudio.....	54
3.2.2.	Área de estudio .....	55
3.2.2.1.	Descripción .....	55
3.2.2.2.	Caracterización climática.....	56
3.2.3.	Temporalidad del estudio.....	57
3.2.4.	Unidad de observación.....	57
3.2.4.1.	Criterios de selección.....	57
3.2.5.	Procedimiento de adquisición de datos para la selección de la unidad de observación .....	58
3.2.5.1.	Objetivo.....	59
3.2.5.2.	Periodo representativo de adquisición de datos .....	60
3.2.5.3.	Herramientas y software .....	60
3.2.5.4.	Adquisición de datos: procesamiento de imágenes satelitales.....	61
3.2.5.5.	Adquisición de datos de vulnerabilidad social.....	64
3.2.6.	Análisis de datos de imágenes satelitales y vulnerabilidad social .....	65
3.2.6.1.	Caracterización de la unidad de observación.....	66
3.2.7.	Procedimiento de adquisición de datos climáticos y morfología del sitio.....	67
3.2.7.1.	Objetivo.....	68
3.2.7.2.	Periodo representativo de adquisición de datos climáticos.....	68
3.2.7.3.	Procedimiento de selección del día típico de verano .....	68
3.2.7.4.	Herramientas, equipo, software .....	69
3.2.7.5.	Criterios de colocación de puntos de adquisición de datos.....	70
3.2.7.6.	Prueba piloto .....	71
3.2.7.7.	Adquisición de datos.....	72
3.2.7.8.	Análisis de datos climáticos.....	74

3.2.8.	Procedimiento experimental .....	75
3.2.8.1.	Objetivo.....	76
3.2.8.2.	Diseño de escenarios.....	76
3.2.8.3.	Modelado .....	79
3.2.8.4.	Configuración de los modelos BA y BB (módulo Spaces).....	82
3.2.8.5.	Configuración general y de condiciones meteorológicas (módulo ENVIguide) 86	
3.2.8.6.	Configuración de cañones con propuestas .....	87
3.2.9.	Análisis de datos de escenarios experimentales.....	88
3.2.9.1.	Método estadístico del análisis .....	88
3.2.9.2.	Tratamiento de la información.....	89
3.2.9.3.	Análisis de la información .....	90
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS .....</b>		<b>91</b>
<b>4.</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>92</b>
4.1.	Relación entre la TST y el uso de suelo/cobertura de suelo .....	92
4.1.1.	Cálculo de TST e Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada .....	92
4.1.2.	Selección de la unidad de observación .....	94
4.2.	Efecto de enfriamiento de TST de las configuraciones de arbolado urbano simuladas.....	97
4.2.1.	Caracterización del microclima .....	98
4.2.2.	Validación del modelo base de simulación.....	101
4.2.3.	Resultados de simulaciones con integración de cobertura vegetal .....	103
4.2.3.1.	Escenarios del cañón BA .....	103
4.2.3.2.	Escenarios del cañón BB .....	105
4.2.4.	Efecto de enfriamiento de configuraciones de arbolado.....	108
4.2.4.1.	Escenarios del cañón BA .....	108
4.2.4.2.	Escenarios del cañón BB .....	114
<b>DISCUSIÓN .....</b>		<b>121</b>
<b>CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES .....</b>		<b>126</b>
Variabilidad de TST y su relación con el uso de suelo/cobertura de suelo.....		127
Integración de arbolado urbano como estrategia de mitigación de la TST.....		127
Configuración de arbolado óptima en la reducción de TST .....		128
Futuras investigaciones .....		131
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>133</b>
<b>ANEXOS Y APÉNDICES .....</b>		<b>157</b>
Anexo 1 Clasificación de la infraestructura verde .....		158
Anexo 2 Mapa de vulnerabilidad social.....		159
Apéndice 1 Selección de especie de arbolado.....		160
Apéndice 2 Vegetación incluida en escenarios base de ENVI-met .....		164
Apéndice 3 Mapas de resultado de TST del polígono de análisis.....		166

Apéndice 4 Mapas de resultado del IVDN del polígono de análisis.....	168
Apéndice 5 Base de datos del monitoreo en la unidad de observación (punto E) .....	170
Apéndice 6 Base de datos del monitoreo en la unidad de observación (puntos A y B).174	
Apéndice 7 Resultados de TST de simulaciones del cañón BA .....	179
Apéndice 8 Resultados de Tair de simulaciones del cañón BA.....	180
Apéndice 9 Mapas de isothermas de TST - cañón BA .....	181
Apéndice 10 Resultados de TST de simulaciones del cañón BB.....	184
Apéndice 11 Resultados de Tair de simulaciones del cañón BB .....	185
Apéndice 12 Mapas de isothermas de TST - cañón BB.....	186

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Cambio de la superficie vegetal en San Quintín, B.C.....	6
<b>Figura 2</b> Búsqueda sistemática - Método basado en PSALSAR y ajustado de CEE .....	13
<b>Figura 3</b> Longitudes de onda del espectro electromagnético.....	21
<b>Figura 4</b> Bandas espectrales Landsat .....	22
<b>Figura 5</b> Periodo de tiempo estudiado en investigaciones de variación de TST .....	23
<b>Figura 6</b> Clasificación de Zonas Climáticas Locales.....	31
<b>Figura 7</b> Frecuencia de aplicación de los métodos de recuperación de TST .....	39
<b>Figura 8</b> Clasificación de la infraestructura verde según su escala .....	42
<b>Figura 9</b> Parámetros indicadores de vegetación .....	45
<b>Figura 10</b> Flujo de trabajo de ENVI-met.....	47
<b>Figura 11</b> Precisiones metodológicas de la investigación .....	51
<b>Figura 12</b> Metodología de la investigación .....	52
<b>Figura 13</b> Variables, dimensiones e indicadores .....	54
<b>Figura 14</b> Área de estudio.....	55
<b>Figura 15</b> Metodología de selección de unidad de observación .....	59
<b>Figura 16</b> Método para el cálculo de TST e IVDN .....	62
<b>Figura 17</b> Unidad de observación .....	66
<b>Figura 18</b> Metodología de adquisición de datos climáticos de la unidad de observación ...	67
<b>Figura 19</b> Temperatura de los días típicos mensuales del área de estudio .....	69
<b>Figura 20</b> Mapa de ubicación de los puntos de monitoreo .....	71
<b>Figura 21</b> Instalación de estación meteorológica para la prueba piloto.....	72
<b>Figura 22</b> Croquis de unidad de observación .....	73
<b>Figura 23</b> Instalación de estación meteorológica y registradores de datos.....	74

<b>Figura 24</b> Metodología para la simulación microclimática .....	75
<b>Figura 25</b> Cañones urbanos de la unidad de observación modelados .....	77
<b>Figura 26</b> Diseño de los escenarios BA y BB.....	79
<b>Figura 27</b> Diseño de los escenarios BA-Disp y BB-Disp.....	81
<b>Figura 28</b> Diseño de los escenarios BA-Alin int y BB-Alin int .....	81
<b>Figura 29</b> Diseño de los escenarios BA-Agr int y BB-Agr int .....	82
<b>Figura 30</b> Ubicación y especificaciones de receptores para los modelos BA y BB .....	85
<b>Figura 31</b> Relación entre la TST y el IVDN del polígono del área de estudio analizada....	93
<b>Figura 32</b> Resultados para el IVDN del polígono del área de estudio analizada .....	93
<b>Figura 33</b> TST en el polígono del área de estudio analizada.....	94
<b>Figura 34</b> Áreas de influencia en manzanas con mayor TST promedio.....	95
<b>Figura 35</b> Imágenes termográficas de la unidad de observación .....	96
<b>Figura 36</b> Temperatura del aire monitoreada por la estación meteorológica .....	98
<b>Figura 37</b> Temperatura del aire monitoreada a nivel peatón (A).....	99
<b>Figura 38</b> Temperatura del aire monitoreada a nivel peatón (B).....	100
<b>Figura 39</b> Comparación de temperatura del aire de monitoreo y simulación del escenario BA .....	101
<b>Figura 40</b> Comparación de temperatura del aire de monitoreo y simulación del escenario BB .....	102
<b>Figura 41</b> Mapas de isotermas de TST del cañón BA .....	105
<b>Figura 42</b> Mapas de isotermas de TST del cañón BB .....	107
<b>Figura 43</b> Resultados de temperatura del aire de los receptores del cañón BA.....	109
<b>Figura 44</b> Resultados de temperatura del aire de los receptores del cañón BB.....	114
<b>Figura 45</b> Propuesta de diseño de calle basado en el cañón BA.....	130
<b>Figura 46</b> Propuesta de diseño de calle basado en el cañón BB .....	131

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Antecedentes .....	18
<b>Tabla 2</b> Intercambio de energía en el sistema tierra-atmósfera .....	20
<b>Tabla 3</b> Relación de valores de UTFVI con la SUHI y el índice de evaluación ecológica .....	24
<b>Tabla 4</b> Hallazgos de estudios previos en LULC.....	27
<b>Tabla 5</b> Parámetros para la evaluación de vulnerabilidad .....	28
<b>Tabla 6</b> Sensores remotos para la recuperación de la TST en el tiempo .....	30
<b>Tabla 7</b> Hallazgos mediante software de análisis de imágenes satelitales.....	39
<b>Tabla 8</b> Hallazgos de estrategias de mitigación de la TST .....	41
<b>Tabla 9</b> Hallazgos en el uso de arbolado urbano .....	43
<b>Tabla 10</b> Especificaciones de investigaciones que utilizan simulación mediante ENVI-met .....	46
<b>Tabla 11</b> Definiciones de variables meteorológicas .....	48
<b>Tabla 12</b> Etapas, actividades e instrumentos/herramientas en la investigación.....	53
<b>Tabla 13</b> Precisiones para la generación del archivo climático .....	56
<b>Tabla 14</b> Criterios para la selección de la unidad de observación .....	57
<b>Tabla 15</b> Precisiones de las herramientas y software empleado .....	60
<b>Tabla 16</b> Detalles de las propiedades de las imágenes de satélite .....	61
<b>Tabla 17</b> Condiciones climáticas de imágenes satelitales.....	62
<b>Tabla 18</b> Datos de imágenes satelitales para el cálculo de TST .....	63
<b>Tabla 19</b> Variables para la designación de grados de vulnerabilidad social.....	64
<b>Tabla 20</b> Precisiones del equipo de monitoreo .....	70
<b>Tabla 21</b> Criterios para la selección de arbolado urbano .....	78
<b>Tabla 22</b> Especificaciones de las calles intervenidas de los cañones BA y BB .....	80
<b>Tabla 23</b> Configuración de los modelos BA y BB .....	83

<b>Tabla 24</b>	Especificaciones de suelos y superficies de los modelos BA y BB.....	83
<b>Tabla 25</b>	Especificaciones de materiales en edificaciones de los modelos BA y BB.....	84
<b>Tabla 26</b>	Configuración de la simulación de los modelos BA y BB .....	86
<b>Tabla 27</b>	Especificaciones de la especie Tecoma Stans.....	87
<b>Tabla 28</b>	Descripción de cobertura de suelo de cada escenario.....	88
<b>Tabla 29</b>	Especificaciones de las métricas estadísticas utilizadas para la validación.....	89
<b>Tabla 30</b>	Datos monitoreados por la estación meteorológica en la unidad de observación	97
<b>Tabla 31</b>	Resultados de TSTmin y TSTmax horaria por escenario del cañón BA .....	104
<b>Tabla 32</b>	Resultados de TSTmin y TSTmax horaria por escenario del cañón BB .....	106
<b>Tabla 33</b>	Resultados de TST en el receptor 1 de los escenarios del cañón BA .....	110
<b>Tabla 34</b>	Resultados de TST en el receptor 2 de los escenarios del cañón BA .....	111
<b>Tabla 35</b>	Resultados de TST en el receptor 3 de los escenarios del cañón BA .....	112
<b>Tabla 36</b>	Resultados de TST en el receptor 4 de los escenarios del cañón BA .....	113
<b>Tabla 37</b>	Resultados de TST en el receptor 1 de los escenarios del cañón BB .....	115
<b>Tabla 38</b>	Resultados de TST en el receptor 2 de los escenarios del cañón BB .....	116
<b>Tabla 39</b>	Resultados de TST en el receptor 3 de los escenarios del cañón BB .....	117
<b>Tabla 40</b>	Resultados de TST en el receptor 4 de los escenarios del cañón BB .....	118
<b>Tabla 41</b>	Resumen de resultados de simulaciones microclimáticas .....	120

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1</b> Cálculo de la SUHI .....	20
<b>Ecuación 2</b> Índice de varianza del campo térmico urbano .....	23
<b>Ecuación 3</b> Índice de precisión general .....	25
<b>Ecuación 4</b> Índice de precisión del productor .....	25
<b>Ecuación 5</b> Índice de precisión del usuario.....	25
<b>Ecuación 6</b> Coeficiente Kappa.....	25
<b>Ecuación 7</b> Índice de vegetación de diferencia normalizada .....	26
<b>Ecuación 8</b> Índice de vegetación ajustado al suelo .....	26
<b>Ecuación 9</b> Índice de edificación de diferencia normalizada.....	27
<b>Ecuación 10</b> Radiancia espectral .....	32
<b>Ecuación 11</b> Temperatura de brillo.....	32
<b>Ecuación 12</b> Emisividad de la superficie terrestre .....	33
<b>Ecuación 13</b> Proporción de vegetación.....	33
<b>Ecuación 14</b> Algoritmo de canal único.....	34
<b>Ecuación 15</b> Algoritmo de canal único (E14-2) .....	34
<b>Ecuación 16</b> Algoritmo de canal único (E14-3) .....	34
<b>Ecuación 17</b> Algoritmo de canal único (E14-4) .....	35
<b>Ecuación 18</b> Algoritmo de canal único (E14-5) .....	35
<b>Ecuación 19</b> Algoritmo de ventana única .....	35
<b>Ecuación 20</b> Algoritmo de ventana única (E19-2).....	35
<b>Ecuación 21</b> Algoritmo de canal único.....	36
<b>Ecuación 22</b> Algoritmo de canal único (E21-2) .....	36
<b>Ecuación 23</b> Algoritmo de canal único (E21-3) .....	36

<b>Ecuación 24</b> Algoritmo de canal único (E21-4) .....	36
<b>Ecuación 25</b> Algoritmo de canal único (E21-5) .....	36
<b>Ecuación 26</b> Algoritmo de canal único (E21-6) .....	36
<b>Ecuación 27</b> Algoritmo de canal único (E21-7) .....	37
<b>Ecuación 28</b> Ecuación de transferencia radiativa .....	37
<b>Ecuación 29</b> Ecuación de transferencia radiativa (E28-2).....	37
<b>Ecuación 30</b> Ecuación de transferencia radiativa (E28-3).....	37
<b>Ecuación 31</b> Método de temperatura/emisividad.....	38

## LISTADO DE ABREVIATURAS

Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción
ASTER	Radiómetro Avanzado de Emisión Térmica y Reflexión Espacial	NDBSI	Índice diferencial normalizado de acumulación y suelo desnudo
CE	Efecto de enfriamiento	NIR	Infrarrojo cercano
CFD	dinámica de fluidos computacionales	PV	Proporción de vegetación
EMA	Estación Meteorológica Automática	RED	Luz roja visible
EST	Emisividad de la superficie terrestre	RMSE	Error de raíz cuadrada media
ETR	Ecuación de transferencia radiativa	SBN	Soluciones basadas en la naturaleza
IADNM	Índice de agua de diferencia normalizado modificado	SCA	Algoritmo de canal único
IAI	Índice de área foliar	SIG	Sistema de información geográfica
ICU	Isla de calor urbana	SUHI	Isla de calor urbana superficial
LAD	Índice de densidad foliar	SVF	Factor de vista al cielo
IEDN	Índice de edificación de diferencia normalizada	SWA	Algoritmo de ventana dividida
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía	SWR	Infrarrojo de onda corta
IU	Índice urbano	Tair	Temperatura del aire
IVAS	Índice de vegetación ajustado al suelo	TIR	Región del infrarrojo térmico
IVDN	Índice de vegetación de diferencia normalizada	Trm	Temperatura radiante media
LULC	Uso del suelo / Cobertura del suelo	TST	Temperatura de la superficie terrestre
MAE	Error absoluto medio	UGS	Espacios verdes urbanos
MODIS	Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada	USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
MWA	Algoritmo de ventana única	ZCL	Zonas climáticas locales
NDBal	Índice de desnudez de diferencia normalizado		



## **INTRODUCCIÓN**

---

El efecto de Isla de Calor Urbana (ICU) es un concepto que ha tomado relevancia en las últimas décadas debido a las consecuencias del cambio climático. En la actualidad, la urbanización de las zonas rurales va en incremento y esto trae consigo cambios en la cobertura y uso del suelo, uno de ellos, es la disminución de la cobertura vegetal que es reemplazada por superficies impermeables generando el efecto ICU e Isla de Calor Urbana Superficial (SUHI, por sus siglas en inglés) lo cual disminuye la calidad de vida de las personas por el incremento de la temperatura del aire ( $T_a$ ) y superficial (Alavipanah et al., 2015; Costanzini et al., 2022). La pérdida de cobertura vegetal, también se ha relacionado con la expansión del uso de suelo agrícola, teniendo como consecuencia el incremento de la Temperatura Superficial Terrestre (TST) (Moisa et al., 2022).

En la presente investigación se busca identificar la relación entre los cambios en la cobertura vegetal y los niveles de TST del municipio de San Quintín, B. C, como parte del análisis de un sitio que se encuentra en desarrollo urbano lo que conlleva a modificaciones en el uso de suelo. Para identificar estos cambios se han empleado métodos para la obtención y análisis de datos provenientes de imágenes satelitales en un determinado periodo de tiempo, a partir de ello, distintos autores han determinado la correlación inversa entre el porcentaje de cobertura vegetal y la temperatura superficial (Bachir et al., 2021; Krelaus et al., 2021).

En diversos estudios se ha demostrado que el impacto de la cobertura vegetal como estrategia de enfriamiento contribuye en la disminución de la SUHI. Ferrini et al. (2020) mencionan que “la selección de plantas es uno de los componentes más importantes en un programa efectivamente sustentable para mantener nuestras ciudades saludables y prósperas” (p. 13). En una revisión sobre los estudios de estrategias de mitigación, Taleghani (2018) explica que, para lograr disminuir la temperatura a través de las estrategias, estas deben ser específicas para cada clima. Dado que el clima es un factor que presenta variaciones por las características propias de las regiones, es necesario hacer un estudio detallado. Por lo anterior, esta investigación considera las condiciones físico-geográficas y del microclima para determinar la mejor forma de configurar la cobertura vegetal en el sitio de estudio. Esto, guiado a producir recomendaciones para la implementación de arbolado urbano en los planes de desarrollo que permitan prevenir la formación de la SUHI y aumentos en la TST que producen afectaciones en la salud de los habitantes y de la población vulnerable.

En el presente documento se desarrollan las temáticas relacionadas con el estudio de la Isla de calor urbana superficial en la actualidad, además de la aplicación de la técnica de sensores remotos para el análisis de imágenes satelitales que permiten el cálculo de la TST e indicadores de cobertura vegetal y, de la simulación microclimática para la evaluación de estrategias de mitigación de la isla de calor urbana, específicamente de la configuración del arbolado urbano como parte de la infraestructura verde.

Lo anterior se presenta en un total de cuatro capítulos; 1) Planteamiento de la investigación, en donde se amplían los temas de urbanización, SUHI, pérdida de cobertura vegetal y su relación con el área de estudio, San Quintín; 2) Marco teórico referencial, en el que se desarrolla el proceso de revisión de la literatura y se integran las temáticas relacionadas con la pregunta y objetivos de la investigación que darán sustento a la metodología; 3) Método, en el cual se describen las actividades que conforman el proceso experimental así como los instrumentos y herramientas a utilizar, y, por último; 4) Resultados, aquí se describen los resultados obtenidos de cada una de las actividades del método y que son correspondientes a los objetivos de la investigación planteados, dentro de los cuales se incluye la resolución de la pregunta de investigación al describir la configuración de cobertura vegetal óptima para reducir la TST en el periodo cálido del día. Posterior a esto se presentan la Discusión de los hallazgos y, por último, las Conclusiones de la investigación en donde se determina que la configuración del arbolado urbano influye en la TST logrando aumentarla o disminuirla durante el periodo cálido del día, así como la importancia de considerar los componentes de la morfología urbana y del clima para la inclusión de cobertura vegetal como estrategia de mitigación, además, se incluyen las recomendaciones como producto de los resultados de la investigación para el diseño de calles en el sitio de estudio.



**CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN**

---

## **1. Planteamiento de la investigación**

### **1.1. Planteamiento del problema**

El calentamiento global ha incrementado en los últimos años y el pronóstico indica que se presentará un calentamiento global de 1.5 °C (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2022). Por otra parte, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2021) en un comunicado, menciona que en México durante el año 2020 se presentó un incremento de 1.4 °C en la temperatura promedio, con relación a los últimos 29 años.

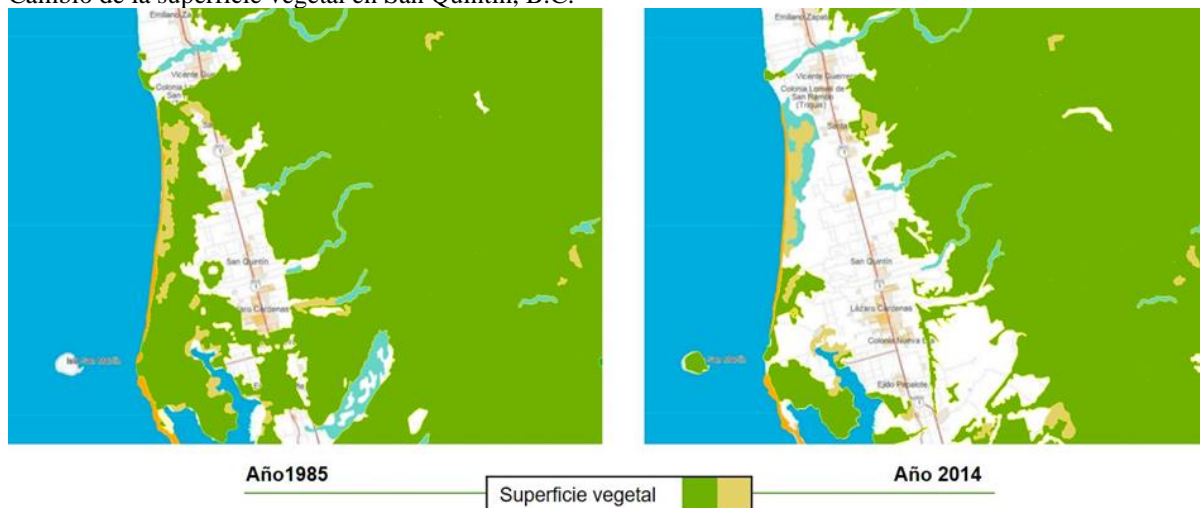
En la actualidad, las localidades rurales tienden a crecer hacia la urbanización como lo explica el proceso de rururbanización, en donde el macroproceso que se desarrolla en las ciudades se presenta en zonas rurales, formando una mezcla entre el espacio agrícola y asentamientos urbanos (Ubilla-Bravo, 2020). Sumado a lo anterior, aproximadamente el 56 % de la población mundial vive en ciudades (Grupo Banco Mundial, 2022), lo que incrementa el grupo poblacional que vive en zonas urbanizadas. Al presentarse un desarrollo poblacional, uno de los cambios evidentes en el paisaje, es la disminución de la superficie vegetal que es reemplazada por edificios y caminos con superficies impermeables, lo cual genera cambios en el ambiente térmico (Burga, 2016), este efecto es conocido como Isla de Calor Urbana (ICU) que, a su vez, es estudiado mediante un enfoque de cambios en la temperatura superficial, conocido como la Isla Calor Urbana Superficial (SUHI). La SUHI es un concepto que ha tomado relevancia en las últimas décadas y se refiere a la diferencia notable de la temperatura superficial del suelo urbano en comparación con la del suelo rural (Saha et al., 2022). La SUHI, genera un aumento en la temperatura superficial, en mayor medida, durante el día, cuando la energía del sol impacta las superficies, contrario a lo que sucede durante las noches y, como consecuencia del efecto anterior, al presentarse sobrecalentamiento en las superficies, este se transfiere a la atmósfera superior incrementando el efecto de ICU (Costanzini et al., 2022).

Este aumento de temperatura es resultado de un desarrollo poblacional que impacta o modifica el paisaje, mediante la sustitución o pérdida de la cobertura vegetal. En San Quintín, la pérdida en la cobertura vegetal debido al crecimiento poblacional se observa a partir del año 1985 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), s/f-a) (Figura 1). Como consecuencia de lo anterior, se ha identificado que la pérdida de cobertura vegetal afecta la captura de carbono y la disminución del calentamiento global (Saha et al., 2022), también, en

diversos estudios se ha relacionado la deforestación con los sitios donde se presentan altos índices de pérdida de calidad ambiental (Hidalgo-García & Arco-Díaz, 2022).

**Figura 1**

Cambio de la superficie vegetal en San Quintín, B.C.



*Nota.* Modificado de [Mapa] de (INEGI, 2022b), <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF00jMwLjQ5MTQ2LGxvbjotMTE2LjAxMjc2LHo6NyxsOmN1c3Y2>.

Por otro lado, las superficies con presencia de vegetación presentan beneficios en la reducción de la temperatura superficial, mediante “la intercepción de la radiación solar por parte del dosel vegetal, lo que conduce a la reducción en ganancia de calor, almacenamiento y emisión de radiación de onda larga por superficies construidas a la sombra” (Tan et al., 2018, p.2). Una de las estrategias a la que se ha recurrido en los últimos años para la mitigación de la SUHI es la implementación de infraestructura verde como parte de las soluciones basadas en la naturaleza (Bartasaghi-koc et al., 2021). Estas últimas generan beneficios en los ámbitos social, económico y ecológico (Vásquez, 2016).

San Quintín está ubicado en el estado de Baja California, México y fue aprobado como el sexto municipio del estado el 27 de febrero de 2020 (Periódico oficial del Estado de Baja California, 2020). Se caracteriza por tener como actividad económica principal la agricultura (INEGI) lo cual posiciona al municipio como un sector vulnerable ante el cambio climático según lo referido por estudios previos, donde se menciona que los sitios que dependen de medios como la agricultura que es sensible al clima tienen una limitada capacidad de adaptación (Žurovec et al., 2017; Das et al., 2020).

## **1.2. Pregunta de investigación e hipótesis**

La pregunta de investigación que se pretende responder en este estudio es ¿cuál es el efecto de enfriamiento de diferentes configuraciones de cobertura vegetal sobre la Temperatura Superficial Terrestre (TST) en San Quintín, B. C. y cuál de ellas es la óptima, considerando las condiciones físico-geográficas y del microclima?

Con base a una revisión de literatura sobre estudios realizados bajo temáticas similares, se plantea la siguiente hipótesis: el efecto de enfriamiento de las configuraciones de cobertura vegetal tendrá un mayor impacto al reducir la TST durante el día al permitir el bloqueo de la radiación solar mientras que, durante la noche estará determinado por el arreglo espacial y su interferencia con el flujo del viento, siendo la configuración de cobertura vegetal agrupada intercalada, dirigida a obtener una mayor superficie sombreada y permitir el paso del viento, la óptima al lograr reducir en mayor medida la TST en San Quintín, B. C.

## **1.3. Objetivos de investigación**

### *1.3.1. Objetivo general*

Evaluar a nivel microescala el efecto de enfriamiento de la configuración de cobertura vegetal sobre la Temperatura Superficial Terrestre (TST) de San Quintín, B. C, a partir de la identificación de la variabilidad espacio-temporal del uso de suelo/cobertura de suelo y su impacto sobre la TST.

### *1.3.2. Objetivos específicos*

- Establecer la relación espacio-temporal entre la TST y el uso de suelo/cobertura de suelo en San Quintín, B. C. a través de la teledetección.
- Determinar el efecto de enfriamiento de TST, a través de la simulación microclimática, de diferentes configuraciones de cobertura vegetal, considerando las características geométricas y los arreglos espaciales (agrupado, intercalado y disperso) del arbolado urbano.

## 1.4. Alcance y limitaciones

### 1.4.1. Alcance

El alcance del estudio está dirigido a evaluar la TST de San Quintín en los últimos 5 años (2018-2023) para la determinación del sitio de estudio, en donde, mediante simulaciones microclimáticas a través del modelo de microclima no hidrostático tridimensional, ENVI-met, que permite la simulación de interacciones superficie-planta-aire, se evaluarán distintas configuraciones de cobertura vegetal con la finalidad de identificar aquella con el mejor efecto de enfriamiento.

### 1.4.2. Limitaciones

Las limitaciones presentes en la investigación se enfocan en la temporalidad del estudio, así como el uso de equipo para el monitoreo en sitio y herramientas en las simulaciones microclimáticas. A continuación, se enlistan las especificaciones:

- En cuanto a los puntos de adquisición de datos, una limitante fue la pérdida de datos en uno de los puntos debido al robo del equipo durante la campaña de monitoreo.
- Limitaciones en el software: si bien el programa ENVI-met permite la creación de modelos sin limitación en sus dimensiones, debido a la capacidad del equipo de cómputo a utilizar para la simulación y el tiempo que ésta requeriría para desarrollarse, se redujo el tamaño de la unidad de observación a analizar.

En el caso del modelado de arbolado dentro de la herramienta ALBERO, las dimensiones de ancho de copa de los árboles están limitadas debido a la unidad mínima de 1 m y a la necesidad de generar el espacio de una unidad al centro de éstos, y un equilibrio hacia los lados, impidiendo tener anchos de copa en números pares.

Respecto al ingreso de las condiciones meteorológicas dentro del módulo ENVI-guide, el programa no permite ingresar valores para la velocidad del viento menores a 0.5 m/s ni mayores a 4 m/s debido a que esto podría generar inestabilidad durante la simulación, por lo que esta variable no fue posible incluirla dentro del modo *Full Forcing* que ofrece el programa.

## 1.5. Justificación y motivación

El incremento en la temperatura debido al efecto de ICU y SUHI ha provocado la constante búsqueda de estrategias para combatirlo ya que afecta a las poblaciones y es parte de un problema global. Las consecuencias de este incremento provocan que la población vulnerable se encuentre en un riesgo mayor lo que se traduce en un problema de salud pública (Degirmenci et al., 2021). En la investigación desarrollada por Muñoz, expone los resultados de un estudio sobre el cambio climático en Baja California y explica que este ha repercutido en los sectores agrícolas (incluyendo San Quintín) y de salud. En el estudio Muñoz explica que “es imprescindible empezar a planear ahora considerando los impactos futuros del cambio climático” (como se citó en CONAHCYT, s.f.).

La presencia de vegetación en las ciudades “además de reducir la temperatura... también puede mejorar la calidad del aire, promover la biodiversidad urbana y estimular el bienestar tanto mental como fisiológico” (Wong et al., 2021, p. 178). El estudio previo de la vegetación, la elección de las especies y diseño de áreas verdes son factores relevantes cuando es utilizada como un servicio ecosistémico (Janhäll, 2015). Si bien ya existen estrategias del uso de infraestructura verde, es necesaria una investigación a nivel local que permita una selección o adecuación óptima de la misma, como explica Lai et al. (2019), “se debe considerar el clima local, la viabilidad de diferentes estrategias y el comportamiento y la percepción de los ocupantes” (p. 350).

La Organización de las Naciones Unidas (ONU, s.f) señala en el número tres de los objetivos de desarrollo sostenible promover la salud mental y el bienestar, en el número once, la implementación de planes de mitigación del cambio climático y, en el número trece, la alerta temprana de este último. Mediante este estudio, se contribuirá al cumplimiento de los objetivos anteriores y a su vez, al Plan Municipal de Desarrollo Urbano del Municipio de San Quintín (Periódico Oficial del Estado de Baja California, 2024) que establece como estrategia promover el desarrollo urbano sustentable y la calidad de vida en San Quintín mediante la actualización de los instrumentos de planeación y normatividad para este fin, también, se apoyará al Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático del CONAHCYT (2022) al contribuir con la identificación de impactos y medidas de mitigación del efecto SUHI y con ello, promover el bienestar de las personas y disminuir proteger los ecosistemas. El producto de esta investigación

será un elemento de apoyo para desarrolladores urbanos, arquitectos y personas interesadas en el tema, como contribución a la alerta temprana y prevención del efecto SUHI y las consecuencias que este genera en el medio ambiente y población.



**CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL**

## 2. Marco teórico referencial

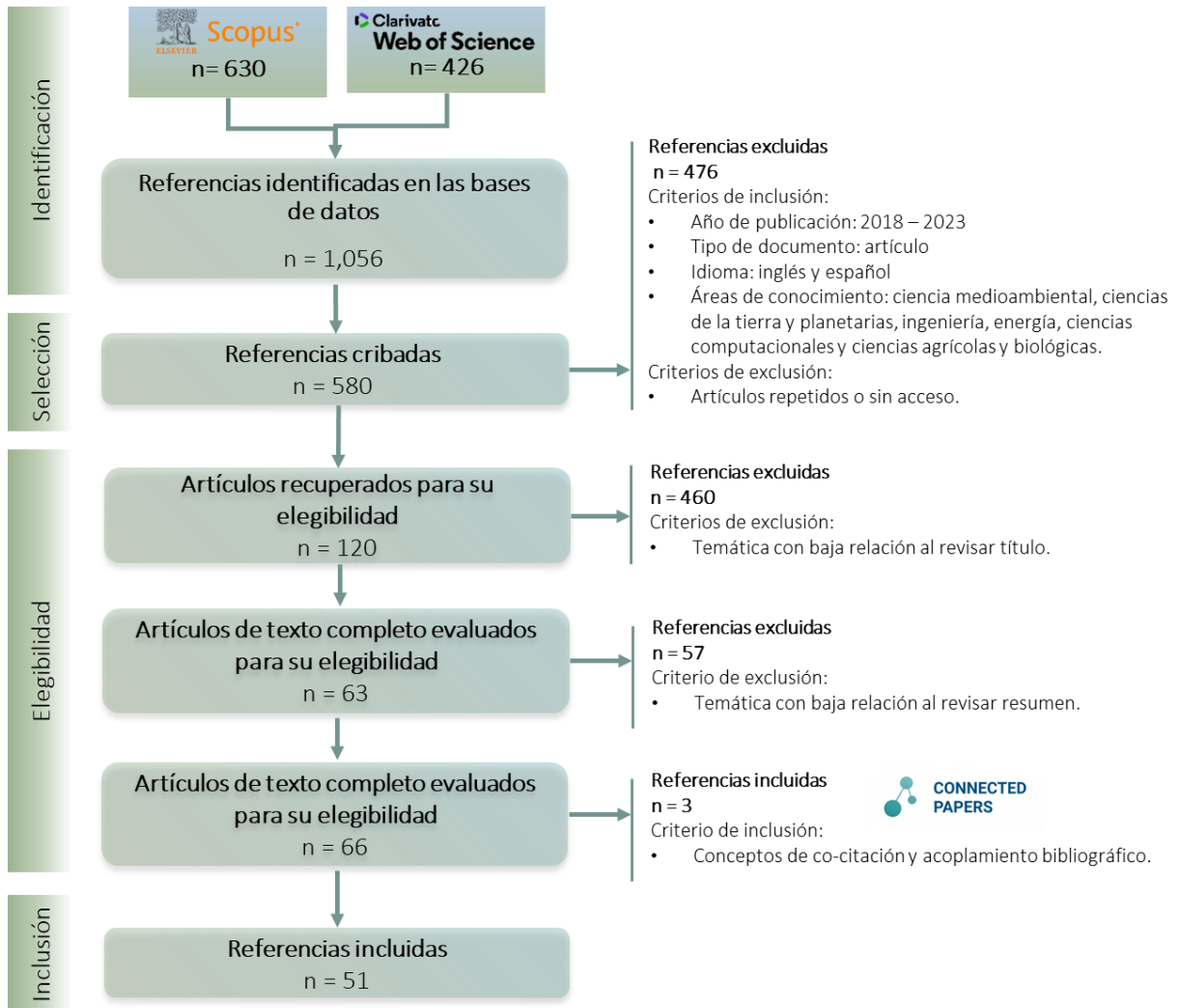
Previo al desarrollo del marco teórico referencial, se llevó a cabo una búsqueda sistemática en dos bases de datos con el propósito de identificar la literatura adecuada para la conformación del marco teórico. El método utilizado para la búsqueda fue el PSALSAR, siendo éste un método de producción replicable, científico y transparente que está conformado por seis pasos básicos que integran las etapas de protocolo, búsqueda, evaluación, síntesis, análisis e informe (de ahí sus siglas en el idioma inglés), lo anterior con el objetivo de mejorar la comprensión sobre los conocimientos científicos existentes, tanto cuantitativos como cualitativos (Mengist et al., 2020). A este método se le realizó una adaptación el método CEE (Colaboración para la evidencia ambiental) al incluir entre el paso de protocolo y búsqueda, la etapa de alcance de revisión, en donde se realizó una búsqueda a manera de prueba con palabras clave con el propósito de recuperar artículos relevantes y definir el tiempo que llevaría realizar la revisión (Collaboration for Environmental Evidence, 2013).

Se realizaron un total de 4 búsquedas tanto en base de datos Scopus como *Web of Science*, dado que las bases de datos utilizan el idioma inglés, las búsquedas fueron en ese idioma. Los conceptos integrados en cada búsqueda se presentan a continuación, cabe mencionar que el concepto de temperatura superficial terrestre estuvo presente en cada una de las búsquedas debido a que es el objeto de estudio y tema central de la investigación:

- a) (“land surface temperature” OR SUHI) AND “Urban trees”
- b) (“land surface temperature” OR SUHI) AND (simulation AND microclimate)
- c) (“land surface temperature” OR SUHI) AND (LCZ OR “Local climate zone”)
- d) (“land surface temperature” OR SUHI) AND (Landsat AND TIRS)

En la Figura 2 se muestra el resultado de las búsquedas, así como los criterios de inclusión y de exclusión que se utilizaron. Dentro de los criterios de inclusión se integró una búsqueda en *Connected Papers* para identificar artículos que tuvieran una alta relación con el tema de estudio a desarrollar. Se llegó a un total de 51 artículos que formaron parte de la revisión de la literatura para el marco teórico. En los siguientes subtemas se desarrollan los conceptos que conforman los ejes temáticos de la investigación.

**Figura 2**  
Búsqueda sistemática - Método basado en PSALSAR y ajustado de CEE



## 2.1. Antecedentes

El calentamiento global ha ido en aumento en las últimas décadas y el pronóstico muestra tendencia de incremento de la temperatura global en los próximos años, lo que trae consigo eventos de estrés térmico extremo (Teshnehdel et al., 2020). Uno de los factores que contribuye al fenómeno anterior, es la creciente y rápida urbanización. Con el desarrollo de las ciudades, la superficie construida está aumentando y la superficie vegetal disminuyendo. El tipo de material con el que se reemplaza la vegetación con frecuencia es pavimento, el cual “absorbe grandes cantidades de radiación solar en el verano, lo que resulta en altas temperaturas superficiales”

(Cao et al., 2015, p. 716). Lo anterior es conocido como el efecto SUHI. Este efecto, ha sido estudiado mediante metodologías que contienen técnicas de teledetección para la obtención de imágenes satelitales que muestran datos sobre la superficie terrestre, tales como índices de cobertura de suelo y temperatura, entre otros. Alavipanah et al. (2015) mencionan que esta técnica de teledetección “proporciona no solo información detallada sobre la cobertura del suelo/uso del suelo, sino también la observación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST) con un muestreo más completo y uniforme” (p. 4691).

Debido a la creciente preocupación por el aumento de condiciones de la SUHI, se han realizado diversos estudios sobre la relación de distintas estrategias de mitigación y la temperatura superficial. El uso de la vegetación como elemento mitigante de la SUHI ha sido una de las estrategias a la cual se ha recurrido con frecuencia, así como el estudio de su relación en cuanto al porcentaje en la superficie y la temperatura superficial mediante el uso de teledetección satelital. Liu et al. (2021) mencionan que el mecanismo de enfriamiento por provisión de sombra mediante la vegetación urbana se ha identificado como una estrategia de mitigación efectiva. En los párrafos siguientes se presentan algunos estudios que fueron realizados y tienen relación con las temáticas planteadas previamente.

Un estudio en la ciudad de Kathmandu, Nepal, con clasificación climática Köppen Cwa (templado con invierno seco y verano caluroso), realizado por Karunaratne et al. (2022), en la que se evaluó la relación entre el Uso del suelo y Cobertura del suelo (Land cover/Land use) y la formación de la temperatura de la superficie terrestre. El estudio se llevó a cabo en tres distritos dentro de la ciudad con la finalidad de analizar la superficie terrestre de cada zona. Para la investigación, se utilizaron imágenes satelitales de los años 2000, 2013 y 2020 mediante los satélites Landsat 5 y Landsat 8, además, se utilizó información del Radiómetro Avanzado de Emisión Térmica y Reflexión Espacial (ASTER). Analizando las variables de radiación absoluta, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (IVDN), el Índice de Agua de Diferencia Normalizado Modificado (IADNM), el Índice de Suelo Desnudo de Diferencia Normalizado (NDBal, por sus siglas en inglés), la elevación y la TST de las zonas de estudio, los autores concluyeron que los valores de TST serán mayores en la zona centro de la ciudad, a diferencia de las periferias, donde el valor de TST disminuye, también, se relacionó el resultado anterior con los espacios verdes mencionando que, estos se concentraban con mayor densidad en la periferia, contrario a la zona centro donde la densidad era menor.

Otra investigación realizada en la ciudad de Guangzhou, China por Y. Wang et al. (2021) identificó a través de Zonas Climáticas Locales (ZCL), los sitios que presentaron mayores condiciones de SUHI dentro de la ciudad, para después, desarrollar acciones de mitigación enfocadas en mejorar el ambiente térmico de las ciudades, esto, a través de simulaciones en el software ENVI-met, donde se evaluaron escenarios con la integración de infraestructura verde. Los tipos de usos de suelo analizados fueron zonas comerciales, industriales, agrícolas, residenciales y zonas naturales. Las variables consideradas para la investigación fueron la temperatura del aire, la humedad relativa, Índice de Densidad Foliar (LAD, por sus siglas en inglés), TST y la SUHI. Para la recolección de datos, se utilizó una estación meteorológica de la ciudad, así como imágenes satelitales del satélite Landsat 8 (sensor ASTER) con un porcentaje de nubosidad menor al 10 %. Como parte de la obtención de la TST, se utilizaron valores de radiancia espectral que fueron traducidos en temperatura de brillo para finalmente determinar el valor de TST. Por otro lado, para determinar el valor de la SUHI, se restó el valor de TST a cada píxel del valor medio de un tipo de ZCL tradicional no urbanizado. Como resultado de la investigación los autores afirman que al aumentar un 10 % la cobertura vegetal a través de arboledas y árboles de calle se obtienen los mejores niveles de mitigación del sobrecalentamiento.

Los autores Moisa et al. (2022) realizaron el análisis para identificar la relación entre la TST y algunos índices de cobertura de suelo (IVDN, NDBal, y el IADNM) en Gida Kiremu, Limu y el distrito de Amuru en Etiopía occidental, donde la agricultura y ganadería son las actividades económicas predominantes. El periodo de estudio analizado fue de 30 años mediante tres imágenes satelitales provenientes de los satélites Landsat 5, 7 y 8 con una resolución espacial de 30 m. Los programas informáticos utilizados fueron ArcGIS y ERDAS imagine. Para el cálculo de la TST emplearon el método de algoritmo de ventana única para los años 1990 y 2003 y el algoritmo de ventana dividida para el año 2020. A través del procedimiento anterior, los autores concluyeron que hubo un incremento de 5 °C en la TST como consecuencia de la disminución de la cubierta vegetal y del aumento de suelos desnudos durante los períodos de estudio.

Un estudio llevado a cabo por los autores Hashim et al. (2022), en la ciudad de Baghdad la cual se caracteriza por tener una clasificación climática Köppen BWh (cálido desértico) y una topografía relativamente plana, tuvo como objetivo evaluar los cambios en la TST y la ICU

durante el periodo de 1984 a 2020, considerando índices de uso de suelo/cobertura de suelo (LULC, por sus siglas en inglés) como el IVDN y el Índice de Edificación de Diferencia Normalizada (IEDN). Los datos de imágenes satelitales utilizados provinieron de la colección Landsat 5 y 8 así como de datos MODIS para el cálculo de la TST mediante Google Earth Engine y ArcGIS. El estudio reveló un aumento de 6.8 °C en la temperatura máxima promedio durante el periodo analizado, localizándose las temperaturas más altas en las zonas residenciales y áridas (46.7 °C y 52.7 °C). También se identificó un aumento de la urbanización y áreas baldías, contrario a las áreas verdes. Dentro de las conclusiones los autores mencionan la necesidad de la comprensión de la relación de la TST con el LULC como parte de las estrategias para el desarrollo de la resiliencia climática en el sitio de estudio.

Hidalgo-García & Arco-Díaz (2022), realizaron un estudio con el objetivo de evaluar el efecto de la TST, Índice Urbano (IU), IEDN, IVDN y la Proporción de Vegetación (PV) sobre la SUHI y el nivel de confort térmico. El sitio de estudio se localizó en Granada, España, con un clima Bsk (semiárido frío) y Csa (mediterráneo), según la clasificación climática Köppen. En esta investigación, también se analizó el LULC. La investigación se realizó mediante ocho casos de estudio base, mediante imágenes satelitales de la ciudad de Granada, España, entre los años 1985 y 2020. Los satélites utilizados fueron el Landsat 5, 7 y 8 y se utilizó un sistema de información geográfica, Quantum GIS (o QGIS), versión 3.10.5. Los resultados demostraron aumentos en la TST de 2.2 °C y en la SUHI de 0.6 °C. Los autores concluyeron que, el LULC está relacionado con el cambio en los niveles de IEDN e IU, ya que en el caso de estudio se observa el aumento de la cobertura del suelo edificada, a diferencia de la cobertura de vegetación en la superficie, así como de cuerpos de agua y tierras dedicadas a los cultivos que se ven reducidos.

Por otra parte, Krelaus et al. (2021) investigaron por medio de imágenes satelitales el estatus de la intensidad del efecto de enfriamiento superficial en diez parques urbanos ubicados en Renania del Norte-Westfalia (NRW) así como el respectivo rango de enfriamiento en cada caso basado en implementación de los mismos como un tipo de infraestructura verde denominada isla fría de parque. Las variables utilizadas para la investigación fueron la TST y el IVDN y los datos de estas fueron obtenidos mediante imágenes de los satélites Landsat 8 y TERRA. A partir del análisis de los patrones obtenidos de la TST en el periodo de estudio 2018

– 2019, se concluyó que, se presentó “un efecto de enfriamiento de la superficie de 1 K a 5 K y, por lo tanto, la existencia de una isla fría de parque” (p. 209).

Un estudio en Nanjing, China tuvo como objetivo comprender los impactos del patrón del paisaje y la estructura vertical de la copa de los árboles en la variación espacial de la TST. Entre los datos recolectados a través de sensores remotos, estuvieron los recuperados del sensor ASTER y del Espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) con una resolución espacial de 90 m. Las métricas del patrón de paisaje fueron definidas mediante el software Fragstats; densidad del parche, densidad de borde, índice medio de forma de parche e índice de cohesión del parche. Mediante el análisis de modelos de regresión múltiple y correlación de Pearson determinaron que la relación positiva más fuerte entre el índice de cohesión del parche y la TST (0.072) sugirió que una disminución en el grado de conectividad de la copa de los árboles podría producir un efecto de enfriamiento (J. Chen et al., 2020).

Lemoine-Rodríguez et al. (2022) por otra parte, evaluaron la relación entre el tamaño y la forma de los espacios verdes urbanos con la finalidad de mitigar el calor urbano presentando en la ciudad de México, así como el efecto de enfriamiento generado por la infraestructura verde, esta último mediante el análisis del porcentaje de Cobertura de Árboles (Tc). Los climas comprendidos en el estudio fueron el Cfb (subtropical de montaña) y Cfa (subtropical húmedo) según la clasificación climática Köppen. La parte experimental se llevó a cabo mediante una recopilación de datos obtenidos a través del satélite Landsat 8 de los sensores OLI/TIRS y el análisis mediante índices como el IVDN, Área de Parche (PA, por sus siglas en inglés) y el Índice de Forma (SI, por sus siglas en inglés). La recuperación del valor de temperatura superficial fue a través del sensor TIRS. Entre los resultados obtenidos, los autores afirman que los espacios verdes >2 ha mitigaron el calor a -2 °C y el rango de enfriamiento estuvo influenciado por el tamaño de los espacios verdes  $\geq 2.8$  ha y Tc >21 % a 50 m.

En la Tabla 1 se enlistan otras investigaciones realizadas, describiendo los objetivos de investigación, así como la descripción de la metodología y/o herramientas que utilizaron y los resultados obtenidos.

**Tabla 1**  
Antecedentes

Autor y año	Objetivo de la investigación	Instrumentos y software	Resultados
Thom et al., (2016)	Cuantificar los efectos que genera la cubierta de dosel de árboles sobre la Temperatura Radiante Media (Trm).	Estación meteorológica. Software: ArcGIS. Software: SOLWEIG.	Árboles agrupados intercalados con áreas abiertas lograron reducir entre -4.8 °C y 5.1 °C la Trm.
Pramanik & Punia, (2019)	Evaluar los efectos refrescantes de diferentes tipos de vegetación urbana a nivel local y de parque	Software: ArcGIS, Fragstats y QGIS Imágenes satelitales: Landsat 8, sensor TIRS y Sentinel-2.	El porcentaje de clase de cobertura terrestre, el índice de parche más grande, el área media y la cohesión se relacionaron negativamente con la TST, mientras que la densidad de parche, el índice de forma del paisaje, el índice de forma medio y la distancia euclidiana media se relacionaron positivamente con la TST.
Yu et al., (2020)	Cuantificar la variación espacial y temporal de la sombra de los árboles y examinar su efecto sobre la TST.	Software: ArcGIS Imágenes satelitales: Landsat 5, sensor TM.	Además de la disposición espacial de los árboles y la superficie impermeable, la altura relativa de los árboles con respecto a los edificios también puede alterar el efecto refrescante de la sombra de los árboles.
Bachir et al., (2021)	Evaluar la amplitud de la ICU y simular escenarios de configuraciones de vegetación para mitigar el aumento de la temperatura superficial en la ciudad.	Estación meteorológica. Termómetro infrarrojo. Software: ENVI-met	La introducción de árboles en los tres modelos simulados resultó en una reducción de TST de -3 °C a -4 °C.
X. Wang et al., (2021)	Evaluar cómo varían estacionalmente los efectos refrescantes de los espacios verdes urbanos y qué papel juega la diversidad de especies de árboles para sustentar el efecto de enfriamiento.	Software: i-Tree Eco. Imágenes satelitales: Landsat 8, sensor TIRS y Landsat 7 sensor ETM+.	Cuando la cobertura de árboles se mantiene constante, la diversidad de la comunidad de árboles dentro de los espacios verdes puede tener un efecto significativo en la magnitud del efecto de enfriamiento.

## 2.2. Cambio climático y urbanización

El crecimiento acelerado de las ciudades incrementa los cambios generados por el cambio climático (Jabbar & Yusoff, 2022). Lo anterior, afecta “el equilibrio energético de los edificios, la difusión de la contaminación, la ventilación urbana y la temperatura radiante media” (Unal Cilek & Uslu, 2022, p. 2), por lo que es necesario generar cambios dirigidos a disminuir las modificaciones sobre las condiciones climáticas que conllevan a fenómenos como olas de

calor y alteraciones sobre los niveles de precipitación que pueden provocar sequías o inundaciones (Goodess et al., 2021).

### *2.2.1. Isla de calor urbana*

El término de ICU fue utilizado por primera vez por el autor Luck Howard, un meteorólogo que, mediante un estudio en la ciudad de Londres monitoreó el clima durante cuarenta años (Taleghani, 2018). El efecto de ICU hace referencia a la presencia de un nivel de temperatura mayor en áreas urbanizadas a diferencia de las áreas rurales donde, la temperatura es menor y es causado principalmente por los edificios y superficies impermeables que se concentran en las ciudades, lo que repercute en las condiciones térmicas de los sitios (Hayes et al., 2022).

Entre los factores que contribuyen a la formación de la ICU están los cambios en el confort térmico humano, la disminución de la cubierta vegetal y la generación de microclimas en las ciudades (Cheela et al., 2021). También entre las causas de la ICU se encuentran la morfología y geometría urbana, las propiedades térmicas de los materiales de las ciudades, la disposición de los mismos y su capacidad de almacenamiento de calor (Almeida et al., 2022).

Existe una categorización de dos tipos de isla de calor urbana, el primero ICU, enfocado en la temperatura del aire y por lo tanto su medición es a través de estaciones meteorológicas y estudios de campo y el segundo, SUHI, que se centra en la temperatura de la superficie y los datos de su análisis se obtienen de medios aéreos o satelitales (Derdouri et al., 2021). Por otro lado, los autores Stewart & Mills (2018) realizaron una categorización de la ICU que integra en primer lugar, la ICU de nivel límite (BUHI, por sus siglas en inglés), ICU a nivel del dosel (CUHI, por sus siglas en inglés), ICU de superficie (SUHI) y el sustrato de ICU (GUHI, por sus siglas en inglés).

## **2.3. Isla de calor urbana superficial**

La SUHI hace referencia a la diferencia en las mediciones de temperatura radiativa de los sitios urbanos y rurales (Zhou et al., 2019; Deilami et al., 2018) y también aborda la variabilidad temporal (Almeida et al., 2022). Una de las fórmulas utilizadas para el cálculo de la SUHI es la siguiente (Almeida et al., 2022):

### Ecuación 1

Cálculo de la SUHI

$$SUHI_{Int} = TST_{L8(LCZ)} - \overline{TST_{L8(RCD)}}$$

donde,  $SUHI_{Int}$  es el valor de intensidad del  $TST_{L8}$  en cada punto,  $TST_{L8(LCZ)}$  es el valor  $TST_{L8}$  extraído del búfer en cada sensor,  $TST_{L8(RCD)}$  se refiere a la media de los valores  $TST_{L8}$  de los sensores RCD (áreas rurales).

#### 2.3.1. Balance radiativo de la tierra

Una parte de la energía emitida por el sol llega a la atmósfera y superficie terrestre en forma de calor y, en del estudio de la climatología la energía dentro del sistema tierra-atmósfera es la de mayor importancia (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2024; Oke, 2002).. En la Tabla 2 se presentan las definiciones de los modos de transferencia de energía que se pueden presentar en este sistema.

**Tabla 2**

Intercambio de energía en el sistema tierra-atmósfera

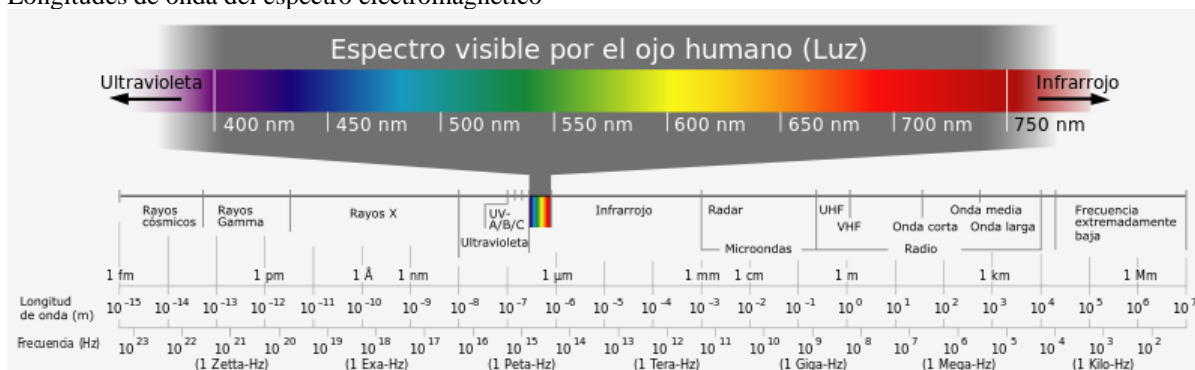
Concepto	Definición
Conducción	Proceso mediante el cual el calor se transmite dentro de una sustancia mediante la colisión de moléculas que se mueven rápidamente y depende de las propiedades térmicas del sustrato. Suele ser un modo de transferencia eficaz en sólidos, menos importante en líquidos y menos importante en gases.
Convección	Implica el intercambio vertical de masas de aire y sólo puede ocurrir en líquidos y gases. Si la adición o resta de energía a un cuerpo se percibe como un aumento o disminución de su temperatura, entonces se denomina calor sensible. Por otro lado, para permitir que una sustancia cambie de líquido a una temperatura determinada a vapor a la misma temperatura, se requiere la adición de calor latente que no se percibe.
Radiación	Es la transferencia de energía térmica a través del espacio mediante radiación electromagnética. Todos los cuerpos que poseen energía emiten radiación. La parte de la radiación solar entrante que se refleja y dispersa, junto con la que se refleja múltiples veces entre la superficie y la atmósfera (retrodispersada), da como resultado una radiación difusa de onda corta. La porción de la radiación solar entrante que llega a la superficie de la tierra, sin ser absorbida ni difundida, se denomina radiación de onda corta de haz directo (S).

*Nota.* Elaborado a partir de información consultada en “*The Transfer of Heat Energy*” por NOAA (2024) y en “*Boundary Layer Climates*” por Oke (2002).

El espectro electromagnético (Figura 3) describe todos los tipos de luz mismas que viajan en ondas de distintas frecuencias y longitudes; cuanto mayor frecuencia, mayor energía transporta, en cuanto a la longitud de onda, está inversamente relacionada con la frecuencia (HUBBLESITE, 2022). La energía emitida por el sol se transporta en forma de radiación de

onda corta y la emitida por la Tierra en forma de ondas largas (National Aeronautics and Space Administration Science Mission Directorate, 2010b).

**Figura 3**  
Longitudes de onda del espectro electromagnético



*Nota.* Adaptado de “El espectro electromagnético” por Tomé (2016).

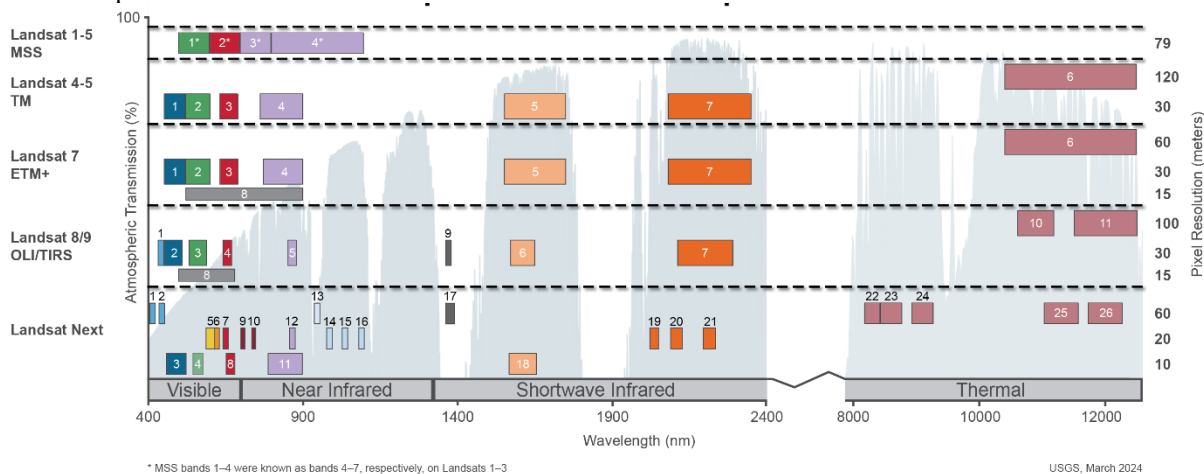
De la energía que impacta la superficie terrestre, proveniente del sol, “aproximadamente el 30 % es reflejada al espacio (Albedo), el 50 % es absorbida en la superficie y el 20 % restante es absorbida por la atmósfera” (Santamaría, 2010, p. 150). La TST está determinada por “el balance entre la energía proveniente del sol, principalmente a longitudes de onda de luz visible y ultravioleta, y la energía infrarroja emitida por la superficie terrestre y la atmósfera” (Santamaría, 2010, p. 154). Sin embargo, no toda la energía emitida por el sol llega a la tierra y viceversa si no que, solo una parte logra pasar por lugares denominados ventanas atmosféricas refiriéndose estas a un rango de longitudes de onda en las que la atmósfera permite el paso de radiación electromagnética permitiendo así la captura de datos por sensores de imágenes espaciales (NOAA, 2023; ScienceDirect, s/f).

Dentro del espectro electromagnético, la radiación infrarroja se divide en distintas regiones; el infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) que va de los 750 a los 1400 nm, el infrarrojo de longitud de onda corta (SWIR, por sus siglas en inglés) que va de los 1.4 a 3 micrones (μm), el infrarrojo de onda media que oscila entre los 3 y 8 μm (MWIR, por sus siglas en inglés), el infrarrojo de longitud de onda larga (LWIR, por sus siglas en inglés) que va los 8 a los 15 μm y, el infrarrojo lejano (FIR, por sus siglas en inglés) que va de los 15 μm a 1 mm (Paschotta, s/f).

La radiación infrarroja puede ser detectada a través de satélites para el estudio de los cambios de temperatura en la superficie terrestre, esta región del espectro es denominada

infrarrojo térmico (TIR, por sus siglas en inglés) (National Aeronautics and Space Administration Science Mission Directorate, 2010a). Las ventanas atmosféricas térmicas están definidas convencionalmente por las longitudes de onda de los 3 a los 5  $\mu\text{m}$  conocidas como ventanas del infrarrojo térmico de onda media (MWIR) y de los 8 a los 14  $\mu\text{m}$  definidas como ventanas del infrarrojo térmico de onda larga (LWIR, por sus siglas en inglés) (Ji et al., 2018). En estas ventanas, los satélites pueden capturar información a través de las distintas bandas delimitadas por rangos de longitudes de onda, por ejemplo, en la Figura 4 se integran las distintas bandas espectrales de la serie de satélites Landsat que van del espectro visible al infrarrojo térmico.

**Figura 4**  
Bandas espectrales Landsat



*Nota.* Adaptado de “*Spectral Bandpasses for all Landsat Sensors*” por Landsat Missions (2024).

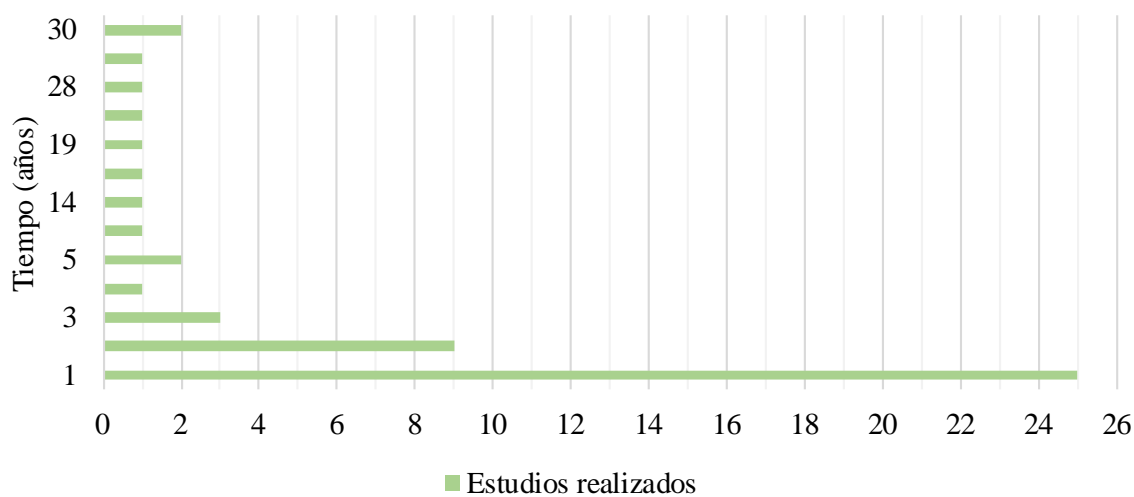
Abordado el tema de la transferencia de calor dentro en la dinámica térmica de las ciudades, el concepto de emitancia térmica hace referencia a “la emisión radiante de calor de un objeto específico en forma de radiación infrarroja o térmica y se refiere a la eficiencia con la que se enfría una superficie” (Al-Obaidi et al., 2014, p. 289) por lo que la región infrarroja se vuelve de suma importancia en el estudio del ambiente térmico urbano.

La TST “impulsa el intercambio de calor entre la superficie y la atmósfera” (Vanhellemont, 2020, p. 390) por lo que, es utilizada para estudiar distintos procesos climáticos y ecológicos. La TST, entre otros parámetros afecta el “balance de energía de la superficie, los climas regionales, los flujos de calor y los intercambios de energía” (Sekertekin & Bonafoni, 2020, p. 2). Diversos estudios han calculado la variación de la TST durante distintos periodos

de tiempo, que van desde 1 a 30 años (Figura 5), algunos con el objetivo de evaluar los cambios espacio-temporales de uso de suelo/cobertura de suelo y su relación con la TST (Peng et al., 2018; Tepanosyan et al., 2020). Lo anterior, a través de la normalización de la TST identificada en los distintos periodos, así como del uso de distintos índices de uso de suelo/cobertura de suelo.

**Figura 5**

Periodo de tiempo estudiado en investigaciones de variación de TST



*Nota.* Elaborado a partir de los resultados de la revisión sistemática de la literatura.

Para evaluar el efecto de la SUHI en el confort térmico de las zonas urbanas se ha utilizado el Índice de Varianza del Campo Térmico Urbano (UTFVI, por sus siglas en inglés), mismo que es calculado con datos obtenidos de sensores remotos o aerotransportados mediante la Ecuación 2 (Tepanosyan et al., 2020).

**Ecuación 2**

Índice de varianza del campo térmico urbano

$$UTFVI = \frac{T_s - T_{mean}}{T_{mean}}$$

donde:  $T_s$  es el valor de TST del píxel y  $T_{mean}$  es la TST media.

Una vez obtenido el valor de UTFVI se asigna el índice de evaluación ecológica, así como el estado de la SUHI correspondiente, comprendiendo 6 clasificaciones para cada uno que van desde <0 hasta >0.020 como se observa en la Tabla 3.

**Tabla 3**

Relación de valores de UTFVI con la SUHI y el índice de evaluación ecológica

UTFVI	SUHI	Índice de evaluación ecológica
<0	Ninguno	Excelente
0.000 - 0.005	Débil	Bueno
0.005 - 0.010	Medio	Normal
0.010 - 0.015	Fuerte	Malo
0.015 - 0.020	Más fuerte	Peor
>0.020	El más fuerte	Lo peor

*Nota.* Adaptado de “*Studying spatial-temporal changes and relationship of land cover and surface Urban Heat Island derived through remote sensing in Yerevan, Armenia*” (p. 3) por Tepanosyan et al. (2020).

### 2.3.2. Deforestación

La deforestación, afecta “el balance energético y el impacto en el clima local a través de cambios en las tasas de evapotranspiración” (Houspanossian et al., 2017, p. 119). Entre las causas principales de la deforestación están “la expansión agrícola en las tierras forestales y la explotación ilegal de las áreas de bosques naturales” (Hasnat, 2021, p. 2). Diversos estudios han estudiado los efectos de la deforestación sobre la TST relacionados con el incremento de urbanización, por ejemplo, en un estudio realizado en Malasia, en donde hubo una tasa del 0.16 % de crecimiento urbano anual se generó un aumento de 2 °C en la TST (Aik et al., 2020).

### 2.3.3. Cobertura vegetal

La Cobertura Vegetal Fraccional (CVF) puede componerse por “áreas con vegetación, áreas sin vegetación y mezcla de áreas con y sin vegetación” (Omar & Kumar, 2021, p. 3). La cobertura vegetal está relacionada con la TST; de acuerdo con el tipo de cobertura que se presenta en la superficie, corresponderá un tipo de medición de la TST, lo anterior debido a la visibilidad que tendrán los sensores satelitales de la superficie (Omar & Kumar, 2021).

### 2.3.4. Uso de suelo / Cobertura de suelo

La primera aparición del término LULC fue para describir los paisajes urbanos (Y. Wang et al., 2021). Los cambios presentes en el LULC son consecuencia de “actividades antropogénicas que alteran las características físicas de la superficie de la tierra y cambios

abruptos de temperatura en una región en particular” (Tariq et al., 2020, p. 2). Por lo anterior, en las investigaciones guiadas al estudio de la TST se integra el estudio de LULC.

Para el estudio de los cambios tanto espaciales como temporales de LULC, se utilizan Sistemas de Información Geográfica (SIG) y sensores remotos y, a través de distintos índices se calculan estas variaciones; entre los más comunes están el IVDN y el IEDN (Kamali et al., 2021). Para verificar la precisión de las clasificaciones de LULC y determinar la calidad de la información, se utilizan índices como el de precisión general (Ecuación 3), índice de precisión del productor (Ecuación 4), índice de precisión de usuario (Ecuación 5) y el coeficiente Kappa (Ecuación 6).

**Ecuación 3**

Índice de precisión general

$$\text{Precisión general} = \frac{\text{No. total de píxeles correctamente clasificados (diagonal)}}{\text{No. total de píxeles de referencia}} \times 1000$$

**Ecuación 4**

Índice de precisión del productor

$$\text{Precisión del productor} = \frac{\text{No. de píxeles correctamente clasificados en cada categoría}}{\text{No. total de píxeles de referencia en esa categoría}} \times 1000$$

**Ecuación 5**

Índice de precisión del usuario

$$\text{Precisión del usuario} = \frac{\text{No. de píxeles correctamente clasificados en cada categoría}}{\text{No. total de píxeles clasificados en esa categoría}} \times 1000$$

**Ecuación 6**

Coficiente Kappa

$$\text{Coficiente de Kappa} = \frac{(\text{TP} \times \text{TPC}) - \sum(\text{Columna Total} \times \text{Total de filas})}{\text{TP}^2 - \sum(\text{Columna Total} \times \text{Total de filas})}$$

donde: TP es el Total de píxeles y TCP es el Total de píxeles corregidos.

*2.3.4.1. Índice de vegetación de diferencia normalizada*

El IVDN se compone de la relación de dos regiones espectrales, la luz roja visible (RED) e infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) y su valor está relacionado con el contenido de vegetación; un valor alto de IVDN representa áreas que reflejan en mayor medida el espectro del NIR y por el contrario en menor medida la luz roja, lo anterior corresponde a la presencia de vegetación densa y saludable (INEGI, s/f-d). Este índice fue utilizado por Gallo et al. (1993)

para evaluar la influencia del entorno urbano sobre la TST a partir de los datos del Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR, por sus siglas en inglés) del satélite NOAA-11 y en donde se cuantificó por primera vez una relación inversa entre estos dos parámetros (Halper et al., 2012). En la Ecuación 7 se presenta la fórmula para el cálculo de este índice (Rehman et al., 2021).

#### **Ecuación 7**

Índice de vegetación de diferencia normalizada

$$IVDN = \left( \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \right)$$

Los valores del IVDN van de -1 al +1; cuando el valor es -1 el tipo de superficie se conforma por agua; los valores cercanos al 0 representan superficies áridas, con presencia de rocas o nieve; entre el 0.2 y 0.5 se encuentran áreas cubiertas de pastizales y vegetación escasa; por último, los valores cercanos al 1 indican áreas con vegetación densa (Omar & Kumar, 2021).

#### *2.3.4.2. Índice de vegetación ajustado al suelo*

El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (IVAS) (Ecuación 8) surge como una modificación al IVDN al minimizar los efectos del brillo de la superficie del suelo en regiones donde la cobertura vegetal está por debajo del 15 % (Omar & Kumar, 2021).

#### **Ecuación 8**

Índice de vegetación ajustado al suelo

$$IVAS = \left( \frac{(NIR - RED)(1 + L)}{(NIR + RED + L)} \right)$$

donde: el valor de L hace referencia al factor de corrección de brillo del suelo, con un valor de 0.5 en casi todos los tipos de cobertura de suelo.

#### *2.3.4.3. Índice de edificación de diferencia normalizada*

El IEDN (Ecuación 9) es utilizado para identificar la distribución espacial y expansión del área edificada a través del Infrarrojo de Onda Corta (SWR, por sus siglas en inglés) ya que este tipo de superficies refleja menos en el NIR; al igual que el IVDN el valor de EDN va de -1 a +1, siendo los valores negativos superficies con agua, los valores cercano al 0 vegetación, y valores cercanos al +1 representan áreas urbanas (Omar & Kumar, 2021; Tepanosyan et al., 2020).

### Ecuación 9

Índice de edificación de diferencia normalizada

$$IEDN = \left( \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \right)$$

#### 2.3.4.4. Relación entre el LULC y la TST

Respecto a la relación que se ha definido entre el LULC y la TST, diversos autores han encontrado que las superficies urbanizadas están relacionadas positivamente con la TST, contrario a las superficies verdes y cuerpos de agua, con las cuales mantiene una correlación negativa (Ejiagha et al., 2020; Hou & Estoque, 2020). Las superficies urbanizadas suelen poseer un alto porcentaje de superficies impermeables que almacenan calor al captar la radiación solar durante el día, sumado a lo anterior, los sitios con una morfología urbana compacta y edificios altos disminuyen el factor de vista al cielo, incrementando así la temperatura (Camilloni & Vera, 2003; Konarska et al., 2016) por lo que este tipo de LULC está relacionado con altas TST. Por otro lado, las superficies con vegetación y cuerpos de agua al ser excelentes absorbentes de la radiación contribuyen al equilibrio de los flujos de energía y calor (Derdouri et al., 2021). Entre las formas en que la vegetación ayuda a reducir el calor en las ciudades están el proceso de evapotranspiración, el reflejo la radiación solar debido al mayor albedo y bloqueando la radiación mediante la provisión de sombra (Taleghani, 2018). Las superficies con bajo albedo absorben bien la radiación, pero a menos que posean canales para una rápida disipación del calor, provocará una temperatura superficial alta (Oke, 2002). En la Tabla 4 se integran investigaciones previas que utilizaron el análisis de LULC como parte del estudio de la TST.

**Tabla 4**

Hallazgos de estudios previos en LULC

Autor y año	Objetivo	Resultados
Tariq et al., (2020)	Analizar las tendencias espacio-temporales de la temperatura entre diferentes LULC.	Los valores de IVDN observados fueron de -0.64 a 0.48 con la temperatura más baja de 24 °C y la más alta de 48 °C.
Rahaman et al., (2021)	Realizar un análisis espacial y temporal para evaluar los cambios en los espacios verdes urbanos.	El estudio encontró una correlación negativa entre TST-IVDN y TST-LAI.
Zhao et al., (2020)	Evaluar las contribuciones térmicas de múltiples tipos de cobertura de suelo urbano desde las perspectivas de composición y configuración.	Los cuerpos de agua, pastizales y árboles urbanos tienen diferentes efectos de enfriamiento de TST local en ~-0.72 °C, ~-0.60 °C y ~-0.57 °C, respectivamente.

## 2.4. Vulnerabilidad ante el cambio climático

Las consecuencias del cambio climático no se presentan con la misma intensidad en todos los sitios del mundo ni impactan al mismo grado a las distintas poblaciones. Un ejemplo de lo anterior, son los sitios en donde la actividad económica principal es la agricultura, ya que el aumento de temperatura afecta negativamente el desarrollo de esta actividad, debido a los cambios en los niveles de precipitación, entre otros eventos climáticos (Das et al., 2020), provocando una diferencia entre la vulnerabilidad de estas regiones comparada con otras. Debido a las distinciones en el impacto que genera el cambio climático en las diversas regiones, se han propuesto parámetros para evaluar el nivel de vulnerabilidad ante esta situación.

### 2.4.1. Indicadores para la evaluación de vulnerabilidad

Como parte del estudio de vulnerabilidad en los sitios de estudio, diversos autores han propuesto parámetros que sirven para indicar el nivel en que las poblaciones son capaces de hacer frente a las consecuencias del cambio climático. En la Tabla 5 se integran algunos de estos indicadores entre los que se destacan temas relacionados a la actividad económica y el perfil demográfico, así como a la capacidad de adaptación.

**Tabla 5**  
Parámetros para la evaluación de vulnerabilidad

Autor y año	Concepto	Indicador
Kumari & Kitchley, (2024)	Exposición	TST media Valor del índice de calor
	Sensibilidad	Densidad del hogar IVDN Densidad de población Sección socialmente más débil Proporción femenina Proporción grupo de edad/niños Tasa de analfabetismo
Szagri et al., (2023)	Sensibilidad/Vulnerabilidad	Edad Sexo Ingresos/Pobreza Desempleo/empleo Otros socioeconómicos Educación Barrera del idioma Inmigrante Carrera Aislamiento social Condición de salud (enfermedades, discapacidad, seguro) Datos de salud y mortalidad

Continúa tabla

Autor y año	Concepto	Indicador
Szagri et al., (2023)	Capacidad de adaptación	Aire acondicionado
		Infraestructura médica
		Otras características de la vivienda
	Perfil demográfico	Densidad de población
		Tamaño medio del hogar
		Población infantil
	Estatus socioeconómico	Pobreza
		Población rural
Das et al., (2020)	Actividad de subsistencia	Dependencia agrícola
		Trabajadores eventuales (que trabajan menos de 6 meses al año)
		No trabajadores (dependientes)
	Infraestructura	Centros de atención médica
	Instalaciones básicas	Institutos educativos
		Saneamiento
	Estrategias de medios de vida agrícolas	Irrigación

## 2.5. Sensores remotos

Según los objetivos y escalas espaciales de las investigaciones, se han utilizado diversos métodos para la recolección de datos de TST, entre los cuales están la teledetección, helicópteros, vehículos aéreos no tripulados, torres y edificios meteorológicos (Cheung et al., 2021), siendo la teledetección la técnica más avanzada (Rahaman et al., 2021).

La teledetección térmica “es una de las ramas de la teledetección que se ocupa de la adquisición, el procesamiento y la interpretación de datos adquiridos principalmente en la Región del Infrarrojo Térmico (TIR) del espectro electromagnético” (Sekertekin & Bonafoni, 2020, p. 2). En cuanto al desarrollo de satélites utilizados como herramientas a través de las cuales se recuperan datos en la teledetección, “los satélites de microondas pasivos (PMW) se han desarrollado rápidamente debido a su capacidad para penetrar las nubes, aunque los datos PWM tienen una resolución espacial y una precisión de recuperación TST más bajas en comparación con los datos infrarrojos térmicos” (Wang et al., 2022, p. 2). Mediante la teledetección los datos TIR se utilizan para analizar la TST en estudios espacio-temporales de grandes coberturas desde escalas locales y globales (Hasnat, 2021). En la Tabla 6 se presentan algunos satélites que han sido lanzados con el paso del tiempo. Yu et al. (2020) mencionan que la familia de satélites Landsat es una de las más populares en cuanto al uso de datos TIR debido a la cobertura temporal que registra desde 1978.

**Tabla 6**

Sensores remotos para la recuperación de la TST en el tiempo

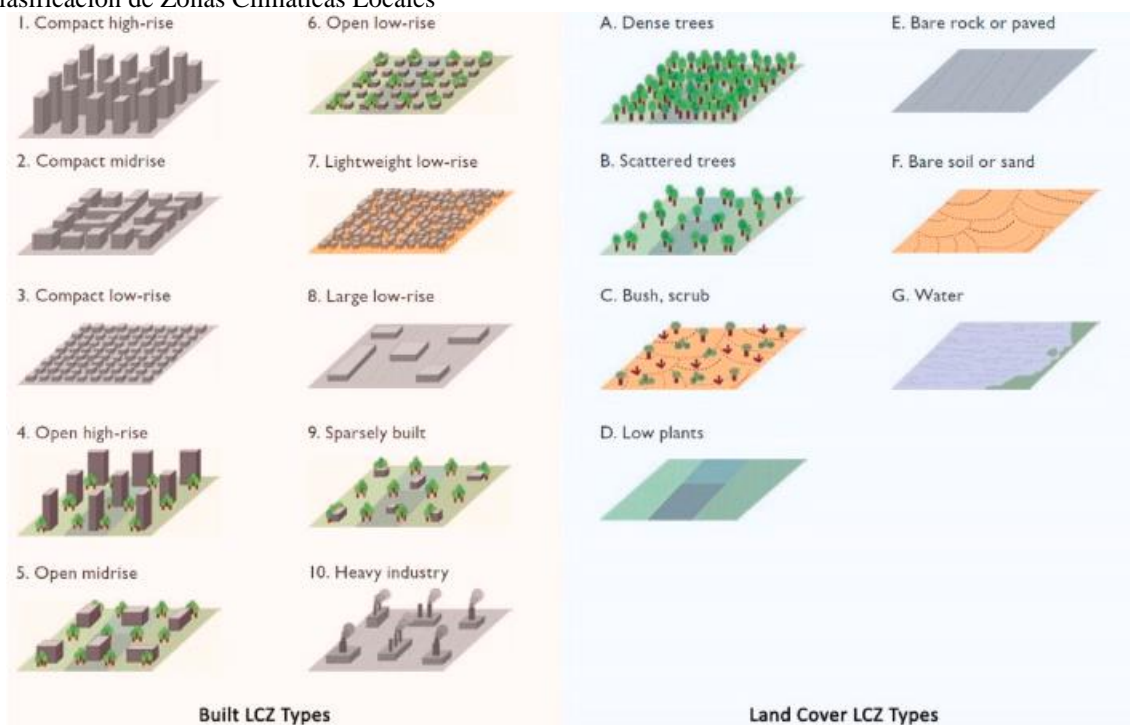
Nombre	Año	Periodo de retorno	Sensor	Resolución espacial	Referencia
Landsat 3	1978	18 días	Multiespectral Scanner (MSS)	-	
Landsat 4	1982 - 1993	16 días	Thematic Mapper (TM)	-	
Landsat 5	1984 - 2012	16 días	Thematic Mapper (TM)	-	
Landsat 7	1999 - 2022	16 días	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	-	Rehman et al., 2021; Costanzini et al., 2022; U.S. Geological Survey, 2023.
Landsat 8	2013 - Actual	16 días	Operational Land Imager (OLI)	30 m	
			Sensor infrarrojo térmico (TIRS)	100 m	
Landsat 9	2022 - Actual	16 días	Operational Land Imager 2 (OLI-2)	30 a 15 m	
		16 días	Sensor infrarrojo térmico (TIRS-2)	100 m	
Terra	1999 - Actual	1 a 2 días	Espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS)	250 a 1000 m	Omar & Kumar, 2021; Zhou et al., 2019.
			Radiómetro Avanzado de Emisión Térmica y Reflexión Espacial (ASTER)		
Sentinel 2A	2015	5 días	Instrumento Multiespectral (MSI)	10 a 60 m	Pramanik & Punia, 2019; Onáčillová et al., 2022; European Space Agency, s/f.
ECOSTRESS	2018 – Actual	1 a 7 días	-	70 m	Chang et al., 2021.

*Nota.* Información consultada en las referencias incluidas en la Tabla.

### 2.5.1. Zonas climáticas locales

Las ZCL son “una clasificación relacionada con el clima de estructuras urbanas homogéneas y tipos de cobertura del suelo” (X. Zhou et al., 2020, p. 1) y, una de las clasificaciones más utilizadas es la de los autores Stewart & Oke en 2012 (Badaro-Saliba et al., 2021; Unal Cilek & Cilek, 2021), misma que puede observarse en la Figura 6. A diferencia del término de LULC, las ZCL además de clasificar los sitios en cuanto al tipo de cobertura del suelo, la morfología urbana y las actividades humanas, consideran además la diferencia de temperatura (Y. Chen et al., 2020). Se trata de una innovación dentro del área de estudio del clima urbano permitiendo realizar comparativas entre distintas urbes relacionadas por criterios morfológicos estandarizados (Zhou et al., 2020).

**Figura 6**  
Clasificación de Zonas Climáticas Locales



Nota. Adaptado de “A systematic review of GIS-based local climate zone mapping studies” (p. 3) por Quan & Bansal (2021).

Entre los métodos para realizar el mapeo de ZCL está el basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) que requiere como datos de entrada la morfología 3D de los edificios, bases de datos de carreteras, así como valores de reflectancia obtenidos a través de la teledetección (Y. Chen et al., 2020). Por otro lado, un método de bajo costo y rápido de implementar para la clasificación de ZCL es la teledetección de código abierto (Y. Wang et al., 2021). Este último, llamado WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tools), únicamente requiere datos de teledetección disponibles en plataformas de acceso abierto (Y. Chen et al., 2020).

La integración del empleo de ZCL y herramientas de simulación puede facilitar la identificación de la distribución y configuración de la infraestructura verde urbana que mejor se adapte al sitio como parte de la planificación urbana (Y. Wang et al., 2021).

### 2.5.2. Procesamiento y análisis de imágenes satelitales

El procesamiento “es una técnica que realiza ciertas operaciones en imágenes satelitales para extraer información, que incluye corrección radiométrica, geométrica y atmosférica,

mejora de imágenes, clasificación de imágenes, extracción de características, filtrado y co-registro” (Arunachalam et al., 2022, p. 2). En la calibración radiométrica se lleva a cabo el “proceso de convertir números digitales (DN) registrados por sensores satelitales en radiación, reflectancia o temperatura de brillo (en el sensor)” (Arunachalam et al., 2022, p. 2) entendiendo DN como el píxel inicial de una imagen satelital.

Por otro lado, como parte del procesamiento de imágenes satelitales para la obtención de la TST, se calcula la temperatura de brillo, en donde se requiere información de las bandas térmicas de Landsat. Las fórmulas para su cálculo se presentan en la Ecuación 10 y Ecuación 11 (Rehman et al., 2021).

**Ecuación 10**

Radiancia espectral

$$L\lambda = ML * Qcal + AL$$

donde:  $L\lambda$  es la radiancia espectral,  $ML$  es el factor de escala multiplicativo de radiancia para la banda,  $Qcal$  son los valores de los píxeles (DN) y  $AL$  es el factor de escala adicional de radiancia para la banda.

**Ecuación 11**

Temperatura de brillo

$$TBs = \frac{K2}{\ln \left( \left( \frac{K1}{L\lambda} \right) + 1 \right)} - 273.15$$

donde:  $TBs$  es la temperatura de brillo del satélite en grados Kelvin,  $K1$  y  $K2$  son constantes y el valor -273.15 se utiliza para convertir las unidades a grados Celsius.

*2.5.2.1. Emisividad de la superficie terrestre*

El concepto de Emisividad de la Superficie Terrestre (EST), expresada en  $W / (m^2k^2)$ , hace referencia a “la radiación emitida por una superficie y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura” (Vanhellemont, 2020, p. 391). Y se trata de “un factor proporcional que escala la radiancia para predecir la radiancia emitida, y EST es la eficiencia de transmitir energía térmica a través de la superficie hacia la atmósfera” (Rahaman et al., 2021, p. 6486).

Para la recuperación de la emisividad de la superficie se han empleado diversos métodos como lo son el uso de “índices espectrales térmicos, método residual alfa, método de emisividad

normalizada, método de relación espectral, método IVDN, método de separación de emisividad por temperatura y estimación basada en clasificación” (Omar & Kumar, 2021, p. 3).

El modelo LSE de Sobrino es uno de los métodos de mayor rendimiento y uso para el cálculo de este parámetro y se basa en el IVDN (Sekertekin & Bonafoni, 2020; Rehman et al., 2021; Xu et al., 2022). A continuación, se muestran la Ecuación 12 y Ecuación 13 para realizar el cálculo de la EST a través del modelo LSE (Xu et al., 2022).

**Ecuación 12**

Emisividad de la superficie terrestre

$$\varepsilon = \begin{cases} 0.979 - 0.035\rho_R & \text{IVDN} < 0.2 \\ 0.986 + 0.004P_V & 0.2 \leq \text{IVDN} \leq 0.5 \\ 0.99 & \text{IVDN} > 0.5 \end{cases}$$

donde:  $\varepsilon$  es la emisividad de la superficie terrestre;  $\rho_R$  es el valor de reflectancia de la banda roja;  $P_V$  es el valor de la proporción de vegetación; IVDN<sub>min</sub> e IVDN<sub>max</sub> tienen un valor de 0,5 y 0,2, respectivamente, en una situación global.

**Ecuación 13**

Proporción de vegetación

$$P_V = \left( \frac{\text{IVDN} - \text{IVDN}_{\min}}{\text{IVDN}_{\max} - \text{IVDN}_{\min}} \right)^2$$

*2.5.3. Métodos de recuperación de TST*

La recuperación de la TST en un proceso en el que se consideran diversos factores para determinar su precisión, como lo son “los efectos atmosféricos, los parámetros del sensor, es decir, rango espectral y ángulo de visión, y parámetros de superficie como emisividad y geometría” (Sekertekin & Bonafoni, 2020, p. 2).

A partir de datos obtenidos mediante la teledetección remota se han empleado distintos métodos de recuperación de TST como lo son; la ecuación de transferencia radiativa, algoritmo de canal único, de ventana única, de ventana dividida y separación de temperatura/emisividad (Xu et al., 2022; Ru et al., 2022). La diferenciación entre los métodos antes mencionados se basa en los datos de entrada requeridos para la fórmula matemática (Sekertekin & Bonafoni, 2020).

La radiación de la parte superior de la atmósfera, conocida como TOA (por sus siglas en inglés) es “una medida adimensional que proporciona la relación entre la radiación reflejada y la radiación solar incidente en la superficie terrestre” (Omar & Kumar, 2021, p. 2). Esta radiancia se compone por la radiación liberada por la superficie terrestre, la radiación ascendente de la atmósfera y la radiancia descendente del cielo (Omar & Kumar, 2021). La corrección de la radiación espectral atmosférica es un procedimiento que debe realizarse al momento de recuperar la TST a través de la teledetección ya que influye en la precisión del cálculo (Rehman et al., 2021; Tepanosyan et al., 2021).

### 2.5.3.1. Algoritmo de canal único

El método de Algoritmo de Canal Único (SCA<sup>1</sup>, por sus siglas en inglés), desarrollado por los autores Jiménez-Muñoz & Sobrino (2003) se calcula mediante la Ecuación 14 y se utilizan las ecuaciones complementarias (de la Ecuación 15 a la Ecuación 18) para obtener los distintos parámetros incluidos en la Ecuación 14 (Sekertekin & Bonafoni, 2020).

#### **Ecuación 14**

Algoritmo de canal único

$$T_s = \gamma \left[ \frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta$$

donde:  $\varepsilon$  es la EST,  $L_{sen}$  es la radiancia en el sensor de la banda térmica,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  y  $\psi_3$  son funciones atmosféricas, y  $\gamma$ ,  $\delta$  son dos parámetros obtenidos en la Ecuación 15 y Ecuación 16 respectivamente.

#### **Ecuación 15**

Algoritmo de canal único (E14-2)

$$\gamma \approx \frac{T^2}{b_\gamma L_{sen}}$$

#### **Ecuación 16**

Algoritmo de canal único (E14-3)

$$\delta \approx T - \frac{T^2}{b_\gamma}$$

donde:  $b_\gamma = c_2/\lambda_i$  con  $c_2 = 14,387.7 \mu m * K$  y  $\lambda_i$  es la longitud de onda de la banda efectiva para la banda i, que se define como la Ecuación 17.

<sup>1</sup>Single Channel Algoritim

**Ecuación 17**

Algoritmo de canal único (E14-4)

$$\lambda_i = \frac{\int_{\lambda_{1,i}}^{\lambda_{2,i}} \lambda f_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{1,i}}^{\lambda_{2,i}} f_i(\lambda) d\lambda}$$

donde:  $f_i(\lambda)$  es la función de respuesta espectral para la banda correspondiente,  $\lambda_{1,i}$  y  $\lambda_{2,i}$  son los límites inferior y superior de  $f_i(\lambda)$  respectivamente.

**Ecuación 18**

Algoritmo de canal único (E14-5)

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau}; \psi_2 = -L_\lambda^\downarrow - \frac{L_\lambda^\uparrow}{\tau}; \psi_3 = L_\lambda^\downarrow$$

donde:  $L_\lambda^\uparrow$  ( $W * m^{-2} * sr^{-1} * \mu m^{-1}$ ) es el afloramiento o radiancia de trayectoria atmosférica,  $L_\lambda^\downarrow$  ( $W * m^{-2} * sr^{-1} * \mu m^{-1}$ ) es el descenso o radiación del cielo.

**2.5.3.2. Algoritmo de ventana única**

El Algoritmo de Ventana Única (MWA<sup>1</sup>, por sus siglas en inglés) es un método creado por los autores Qin et al. (2001) recupera los datos de una sola banda térmica (de ahí su nombre) y utiliza principalmente los parámetros de; EST, transmitancia atmosférica y temperatura atmosférica media efectiva para la recuperación de TST, este último parámetro es utilizado únicamente en éste método (Sekertekin & Bonafoni, 2020). Las ecuaciones para la estimación de TST son:

**Ecuación 19**

Algoritmo de ventana única

$$Ts = \{a * (1 - C - D) + [b * (1 - C - D) + C + D] * T - D * T_a\} / C$$

donde:  $Ts$  es el valor de TST en Kelvin,  $T$  es la temperatura de brillo del sensor en Kelvin,  $T_a$  es la temperatura atmosférica media efectiva en Kelvin,  $a$  y  $b$  son las constantes del algoritmo,  $C$  y  $D$  son los parámetros del algoritmo calculados usando EST y la transmitancia.

**Ecuación 20**

Algoritmo de ventana única (E19-2)

$$a = -67.355351, \quad b = 0.458606, \quad C = \varepsilon x \tau, \quad D = (1 - \tau)[1 + (1 - \varepsilon) - \tau]$$

donde:  $\tau$  es la transmitancia atmosférica y  $\varepsilon$  representa EST.

<sup>1</sup>Mono Window Algoritim

### 2.5.3.3. Algoritmo de ventana dividida

El Algoritmo de Ventana Dividida (SWA<sup>1</sup>, por sus siglas en inglés) se aplica únicamente a los datos obtenidos de Landsat 8 OLI/TIRS ya que utiliza dos bandas TIR (Sekertekin & Bonafoni, 2020). Para este método, “no se requieren perfiles atmosféricos precisos, y la precisión de recuperación de TST es insensible a las incertidumbres en las propiedades ópticas de los absorbentes atmosféricos” (Rongali et al., 2018, p. 3). Las ecuaciones que se utilizan para el desarrollo del SWA se presentan a continuación (Sekertekin & Bonafoni, 2020):

#### Ecuación 21

Algoritmo de canal único

$$T_s = T_{10} + B_1(T_{10} - T_{11}) + B_0$$

donde:  $T_{10}$  y  $T_{11}$  se calculan mediante el rango de temperatura de brillo para la banda 10 y 11 respectivamente, como se explica en Sekertekin & Bonafoni (2020).

#### Ecuación 22

Algoritmo de canal único (E21-2)

$$B_0 = \frac{C_{11}(1 - A_{10} - C_{10})L_{10} - C_{10}(1 - A_{11} - C_{11})L_{11}}{C_{11}A_{10} - C_{10}A_{11}}$$

#### Ecuación 23

Algoritmo de canal único (E21-3)

$$B_1 = \frac{C_{10}}{C_{11}A_{10} - C_{10}A_{11}}$$

#### Ecuación 24

Algoritmo de canal único (E21-4)

$$A_{10} = \varepsilon_{10}\tau_{10}$$

donde:  $\varepsilon_{10}$  representa la EST para la Banda 10 y  $\tau_{10}$  representa la transmitancia atmosférica para la Banda 10.

#### Ecuación 25

Algoritmo de canal único (E21-5)

$$A_{11} = \varepsilon_{11}\tau_{11}$$

donde:  $\varepsilon_{11}$  representa la EST para la Banda 11 y  $\tau_{11}$  representa la transmitancia atmosférica para la Banda 11.

#### Ecuación 26

Algoritmo de canal único (E21-6)

$$C_{10} = (1 - \tau_{10})(1 + (1 - \varepsilon_{10})\tau_{10})$$

<sup>1</sup>Split Window Algorithm

**Ecuación 27**

Algoritmo de canal único (E21-7)

$$C_{11} = (1 - \tau_{11})(1 + (1 - \varepsilon_{11})\tau_{11})$$

**2.5.3.4. Ecuación de transferencia radiativa.**

Para el desarrollo del método de Ecuación de Transferencia Radiativa (ETR) se utiliza la banda TIR y la inversión de la ecuación ETR, como se muestra en la Ecuación 28 y complementarias; Ecuación 29 y Ecuación 30 (Sekertekin & Bonafoni, 2020).

**Ecuación 28**

Ecuación de transferencia radiativa

$$L_{\lambda}^{sen} = [\varepsilon B_{\lambda}(T_s) + (1 - \varepsilon)L_{\lambda}^{\downarrow}] \tau + L_{\lambda}^{\uparrow}$$

donde:  $L_{\lambda}^{sen}$  ( $W * m^{-2} * sr^{-1} * \mu m^{-1}$ ) es la radiancia registrada en el sensor de la banda térmica relacionada,  $B_{\lambda}$  ( $W * m^{-2} * sr^{-1} * \mu m^{-1}$ ) es el resplandor del cuerpo negro. La radiación de cuerpo negro ( $B_{\lambda}$ ) a una temperatura de  $T_s$  se puede obtener mediante la Ecuación 29:

**Ecuación 29**

Ecuación de transferencia radiativa (E28-2)

$$B_{\lambda}(T_s) = \frac{L_{\lambda}^{sen} - L_{\lambda}^{\uparrow} - \tau(1 - \varepsilon)L_{\lambda}^{\downarrow}}{\tau\varepsilon}$$

**Ecuación 30**

Ecuación de transferencia radiativa (E28-3)

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left( \frac{K_1}{\frac{L_{\lambda}^{sen} - L_{\lambda}^{\uparrow} - \tau(1 - \varepsilon)L_{\lambda}^{\downarrow}}{\tau\varepsilon} + 1} \right)}$$

donde:  $K_1$  ( $Watts/(m^2 * srad * \mu m)$ ) y  $K_2$  (Kelvin) son constantes de calibración para los datos de Landsat.

**2.5.3.5. Método de corrección de emisividad**

En este método a partir del cálculo previo de la temperatura de brillo del satélite y de la EST se desarrolla la Ecuación 31 para encontrar el valor de TST (Rahaman et al., 2021).

### Ecuación 31

Método de temperatura/emisividad

$$TST_c = \frac{TB}{1} + w * \left(\frac{TB}{p}\right) * \ln(e)$$

donde:  $LST_c$  es la temperatura superficial terrestre en grados Celsius;  $TB$  es la temperatura de brillo del satélite; 1 es factor constante;  $w$  es la longitud de onda de la radiación emitida (11,5  $\mu\text{m}$ );  $p$  es  $h * c/s$  ( $1.468 * 10^{-2}$  m K) o valor constante de  $p = 14,380$ ;  $\ln$  es número de registro;  $e$  es emisividad.

#### 2.5.3.6. Comparación de los métodos de recuperación de TST

Dentro del proceso de validación de TST para la técnica de sensores remotos, se han utilizado la comparación entre la TST de sensores remotos y la TST obtenida de mediciones en sitio; la comparación entre la TST de sensores remotos, mediciones en sitio y de *aircraft*; y la comparación entre la TST de sensores remotos, mediciones en sitio y de vehículos aéreos no tripulados (Tepanosyan et al., 2020).

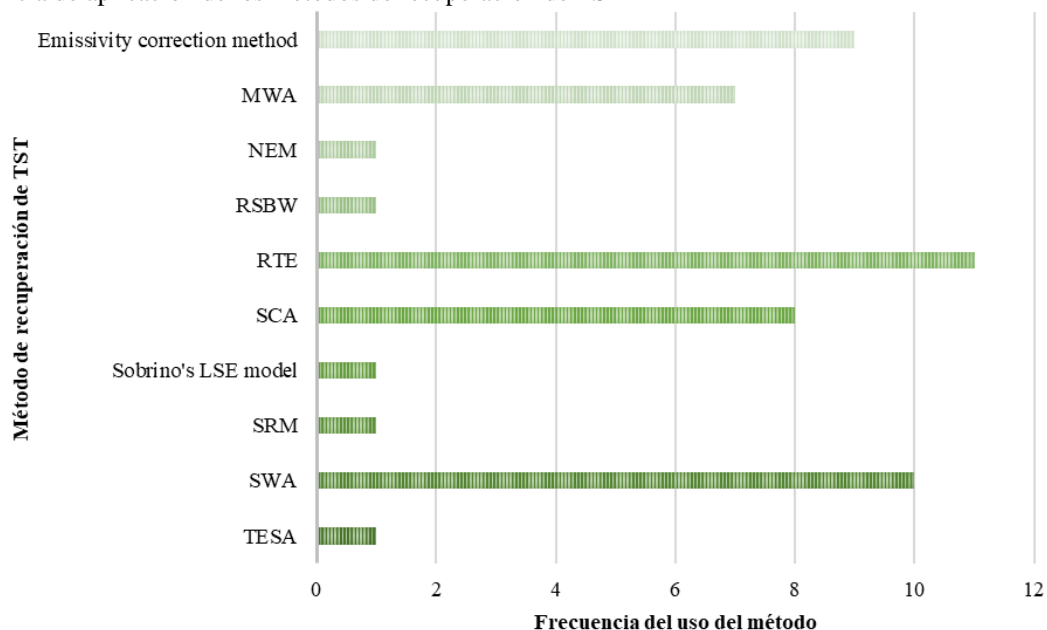
Los autores Sekertekin & Bonafoni (2020) realizaron una comparación entre los métodos para el cálculo de TST antes mencionados. Los resultados obtenidos divididos por la fuente de datos mostraron que, para Landsat 5 el mejor método fue ETR con un error de raíz cuadrada media (RMSE) de 2.35 K; para Landsat 7 MWA obtuvo los mejores resultados con un RMSE de 2.24 K; para Landsat 8, igualmente MWA fue el mejor con un RMSE de 2.52 K.

Por otro lado, los autores Rongali et al., (2018) compararon los métodos de MWA Y SWA obteniendo como resultado una precisión muy similar entre ambos, sin embargo, concluyeron que el SWA captura mejores condiciones de campo debido al uso de dos bandas espectrales. En otro estudio donde se comparó el método de ETR y SWA, se concluyó que la ETR que utiliza la banda 10 obtuvo la mayor precisión con un error cuadrático medio entre 1.03 °C y 1.51 °C mientras que, el error cuadrático medio para la ETR que utiliza la banda 11 y el SWA fue mayor a 2 °C (Ali et al., 2022). Por último, en un estudio donde fue utilizado el método de corrección de emisividad, la diferencia media entre la temperatura del aire observada y la TST calculada fue de 2.54 °C, siendo la TST mayor (Hu et al., 2021).

Con base a lo anterior, se puede concluir que el método ETR fue el más efectivo para la recuperación de TST, aunque es importante resaltar que en los estudios de comparación no se evaluaron los métodos de SCA y de corrección de emisividad. En cuanto a la frecuencia del uso

de los métodos para el cálculo de la TST (Figura 7), en la revisión de la literatura se identificó que la mayoría de los autores utilizaron la ETR con un total de 11 estudios, seguido del SWA y el método de corrección de emisividad con 10 y 9 estudios respectivamente.

**Figura 7**  
Frecuencia de aplicación de los métodos de recuperación de TST



*Nota.* Elaborado a partir de los resultados de la revisión sistemática de la literatura.

#### 2.5.4. Software de análisis de imágenes satelitales

En la Tabla 7 se presentan algunos programas informáticos utilizados anteriormente para el análisis de imágenes satelitales, algunos de estos programas han sido; ENVI, QGIS, ArcGIS, C++, Python, Visual Basic y ERDAS Imagine (Sekertekin & Bonafoni, 2020).

**Tabla 7**  
Hallazgos mediante software de análisis de imágenes satelitales

Autor y año	Objetivo	Software	Resultados
Omar & Kumar, (2021)	Descubrir la relación entre la TST y la abundancia de vegetación	ArcGIS	Se encontró una correlación lineal negativa entre IVAS y TST y una tendencia de correlación lineal positiva entre IEDN y TST.
Khoshnoodmotlagh et al., (2021)	Extraer mapas de cobertura terrestre y TST en un rango de 29 años y explorar la relación entre ZCL y TST.	ENVI	A excepción de las construcciones que incluyen áreas compactas de gran altura, compactas de mediana altura y áreas industriales pesadas todos los demás tipos de cobertura terrestre tendieron a disminuir la TST.

Continúa tabla

Autor y año	Objetivo	Software	Resultados
J. Wang et al., (2023)	Evaluar cómo afecta el porcentaje de cobertura de UTC a la TST directamente e indirectamente a través de la alteración de la configuración espacial.	ERDAS Imagine	El aumento en el tamaño medio del parche podría conducir a la disminución de la densidad del borde y, por lo tanto, indirectamente dar como resultado la disminución de TST.
Auntarin et al., (2021)	Usar un algoritmo de ventana dividida para la recuperación de la temperatura de la superficie terrestre a través de datos Landsat-8 OLI/TIRS.	QGIS	El valor de la TST analizado por los datos del satélite se comparó con la temperatura diaria medida por la estación y se encontró un error del 4.07 %.
Y. Wang et al., (2021)	Buscar las estrategias de infraestructura verde urbana más efectivas para mejorar el posible problema de sobrecalentamiento.	WUDAPT	Aumentar la cobertura verde al 10 % mediante la adición de árboles en la calle y en la arboleda podría ser la mejor estrategia de adaptación para mejorar el sobrecalentamiento.

A través de la revisión sistemática, el software geoespacial ArcGIS resultó ser uno de los más utilizados para procesar y analizar datos geográficos. Este programa “proporciona funcionalidad en el almacenamiento y la gestión de datos ráster, el procesamiento de imágenes, la visualización de imágenes y el servicio de imágenes a través de la web” (Arunachalam et al., 2022, p. 2). El sistema de lenguaje de programación utilizado en este programa es ModelBuilder lo que permite la automatización de un método de recuperación de TST (Sekertekin & Bonafoni, 2020).

## 2.6. Estrategias de mitigación de la TST

Diversas estrategias de mitigación han surgido como medidas para disminuir los efectos del cambio en la temperatura tanto del aire como de las superficies. Estas, pueden inferir de manera directa al modificar las condiciones de contorno como cargas convectivas y radiativas o, de manera indirecta al modificar condiciones ambientales alrededor de los edificios e individuos (Hayes et al., 2022).

### 2.6.1. Soluciones basadas en la naturaleza

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) definidas por Arauz & Marzo (2021), representan las medidas de mitigación de las emisiones de carbono a través de “el secuestro y el almacenamiento de carbono en entornos naturales tales como bosques, humedales, turberas, marismas y lechos marinos” (p. 27) y se clasifican en; masas forestales, tierras agrícolas y pastizales y por último, en humedales y masas de agua. La presencia de vegetación, como parte

de las SBN, “reduce la radiación solar que incide sobre el suelo al absorber la radiación solar de la superficie y reduce la evaporación al aumentar la humedad del aire circundante a través de la sombra del dosel, lo que conduce a una disminución de la temperatura ambiental” (Qi et al., 2022).

### 2.6.2. Infraestructura verde

Una de las estrategias de mitigación de la TST, es la infraestructura verde; “una red multifuncional de espacios verdes, urbanos y rurales, nuevos o ya existentes, capaces de prestar un amplio abanico de beneficios ambientales y calidad de vida a la comunidad” (Aguilera et al., 2018, p. 315). En este concepto se integra la vegetación de áreas naturales y también de aquellas diseñadas, como lo son árboles de calle, parques, techos verdes y jardines (Balany et al., 2020). En la Tabla 8 se integran algunos estudios en los que se ha implementado el uso de infraestructura verde como parte de las estrategias de mitigación de la SUHI.

**Tabla 8**  
Hallazgos de estrategias de mitigación de la TST

Autor y año	Objetivo	Tipo de infraestructura verde	Resultados
Barbierato et al., (2019)	Proporcionar una metodología transferible útil para analizar el efecto del arbolado urbano en la reducción de la temperatura superficial, particularmente en espacios públicos.	Árboles urbanos	El valor medio de la avenida con árboles y la avenida sin árboles fue de 31.1 °C y 37.1 °C respectivamente. La presencia del follaje de los árboles proporciona una reducción del valor medio de la temperatura de unos 7 °C.
Hu et al., (2021)	Evaluar la relación entre la TST y la composición y configuración de los espacios verdes mediante el uso de diferentes modelos de regresión, incluidos modelos que toman en cuenta la autocorrelación espacial.	Césped	Las densidades de borde de árboles y césped tienen efectos opuestos, lo que sugiere que los árboles deben plantarse en grupos más pequeños, mientras que el césped debe plantarse en parches más grandes y continuos para alcanzar el máximo enfriamiento TST.
Li et al., (2022)	Examinar la idoneidad de la clasificación de ZCL para estudios térmicos urbanos en condiciones microclimáticas variables.	Cobertura vegetal	La TST en árboles densos presenta una correlación negativa con el Índice de Vegetación Mejorada para todas las ciudades, mientras que TST en árboles dispersos y plantas bajas muestra una correlación variable.
Sun et al., (2021)	Medir y clasificar las eficiencias relativas de refrigeración de los parques urbanos.	Parque	El tamaño del parque y el IVDN fueron los factores dominantes para la eficiencia del enfriamiento del parque. Los parques con un área >5 ha mostraron un mejor desempeño de enfriamiento en promedio.

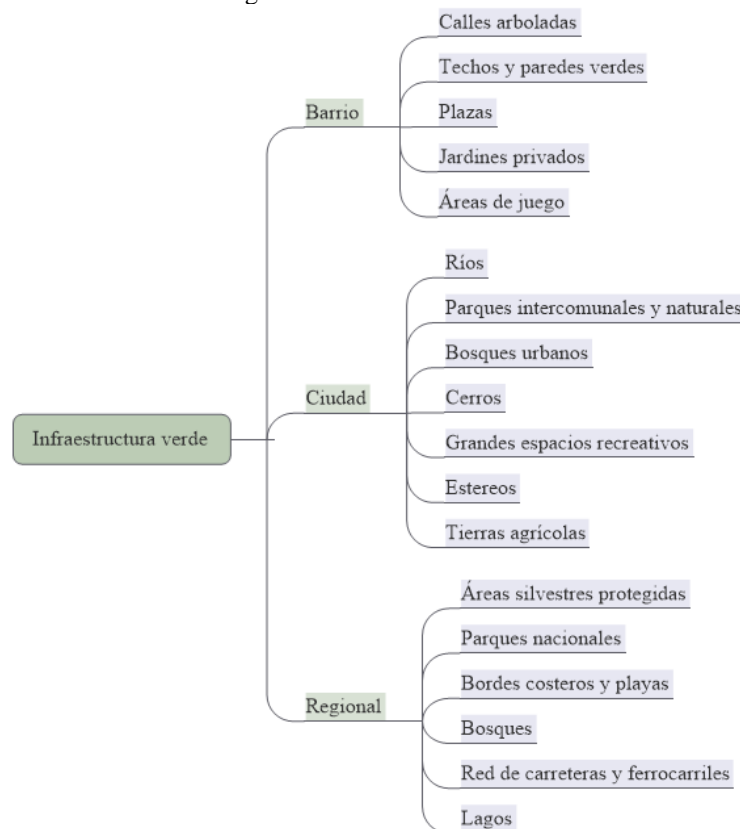
Continúa tabla

Autor y año	Objetivo	Tipo de infraestructura verde	Resultados
Tan et al., (2021)	Comparar las diferencias en los factores del paisaje con una influencia dominante en el efecto de enfriamiento y sus impactos cuantitativos en el efecto de enfriamiento de los espacios verdes y azules urbanos.	Espacios verdes urbanos	Los espacios verdes con formas simples y alta fragmentación pueden tener un fuerte efecto de enfriamiento, mientras que los espacios verdes con formas más complejas pueden enfriar áreas más grandes.

Los autores Bartesaghi-Koc et al. (2019) realizaron una clasificación de 34 tipos de infraestructura verde, en donde, basados en datos obtenidos por detección y medición de la luz (LiDAR) se agruparon por tipo de vegetación; sin vegetación, pastos, arbustos y árboles; y basados en imágenes espectrales se agruparon por tipo de superficies de suelo; impermeable, mixta, permeable y acuática (ver Anexo 1). Por otro lado, Vásquez (2016) clasifica la infraestructura verde según su escala, a nivel de barrio, ciudad y regional (Figura 8).

**Figura 8**

Clasificación de la infraestructura verde según su escala



*Nota.* Elaborado a partir de información consultada en “Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile” por Vásquez (2016).

### 2.6.3. Arbolado urbano

Los espacios verdes urbanos han demostrado resultados positivos en la disminución de la TST; el patrón espacial de su distribución impacta en el ambiente térmico urbano y por lo tanto, en los valores de mitigación de la UHI (Xu et al., 2022). A través del proceso de evapotranspiración, principalmente, y la provisión de sombra, los árboles urbanos han demostrado disminuir en mayor medida la TST en comparación con el césped y agua (Hu et al., 2021). La identificación de arbolado urbano en las zonas de estudio se ha realizado a través de mediciones en sitio, bases de datos de otras investigaciones y mediante la teledetección (Zhao et al., 2023), utilizando los índices de LULC presentados anteriormente.

La manera en que se calcula el efecto de enfriamiento de los espacios verdes urbanos es mediante la diferencia entre el valor de TST de estos espacios y el del área construida (X. Wang et al., 2021), por otro lado, Yang et al. (2022) definen la eficiencia de enfriamiento como la disminución de la TST por cada 1 % de incremento de la cobertura vegetal. En la Tabla 9 se integran hallazgos significativos en cuanto a la disminución de la TST a través de arbolado urbano.

**Tabla 9**  
Hallazgos en el uso de arbolado urbano

Autor y año	Objetivo	Composición	Configuración	Resultados
Thom et al., 2016	Cuantificar los cambios en la temperatura radiante media a partir del aumento de la cubierta arbórea en cinco formas urbanas diferentes.	-	Orientación. Árboles agrupados. Disposición intercalada.	La naturaleza distribuida de los árboles agregados ayudó a proporcionar beneficios en todo el dominio más amplio, en contraste con lo que podría esperarse de árboles densamente plantados concentrados en un área como un parque.
Fan et al., (2019)	Explorar los factores potencialmente influyentes que pueden afectar el Valor umbral de eficiencia utilizando un análisis de paisaje de múltiples escalas.	Porcentaje de paisaje.	Densidad de borde. Índice de parche más grande. Distancia euclidiana media del vecino más cercano. Dimensión fractal media. Distancia euclidiana media del vecino más cercano.	Si la ciudad tiene parches que tienen una temperatura de fondo baja y una cubierta vegetal deficiente, un tamaño de parche de 0.60 ha a 0.62 ha será óptimo.

Continúa tabla

Autor y año	Objetivo	Composición	Configuración	Resultados
Bartasaghi-Koc et al., (2020)	Estimar los efectos de enfriamiento de la infraestructura verde en función de las características morfológicas y espaciales.	Arbolado, césped y arbustos.	Árboles agrupados, dispersos y alineados.	Los árboles en hileras o pequeños grupos rodeados de pastos y arbustos irrigados brindan un enfriamiento constante independientemente de la hora y la estación (0.5 °C a 6.0 °C).
He et al., (2021)	Identificar la configuración espacial que influye en la tasa de enfriamiento de los árboles entre dos áreas metropolitanas.	Fracción de cubierta de árboles.	Tamaño medio del parche. Densidad de borde. Índice de parche más grande.	Una mayor velocidad del viento amplifica la transpiración y aumenta el efecto de enfriamiento total de los árboles urbanos.

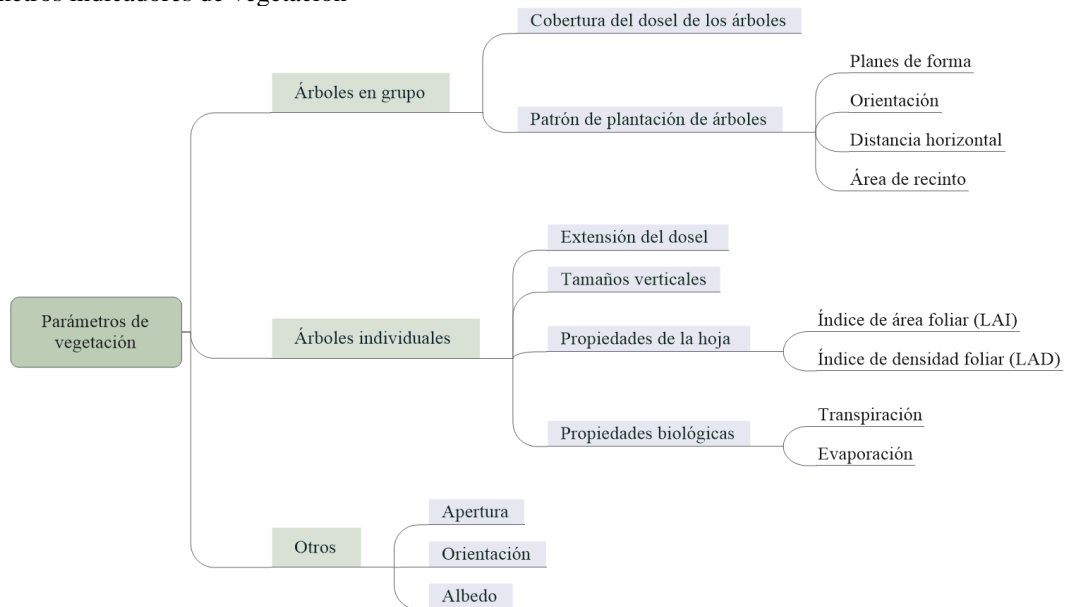
El efecto de enfriamiento del arbolado no solo es determinado por las propiedades de los árboles, sino que, involucra su composición, configuración y las variables climáticas del sitio (Zhao et al., 2020), por lo que en los dos siguientes subtemas se describen.

#### 2.6.4. *Parámetros de vegetación*

Como parte del estudio de las áreas verdes, se emplean los conceptos de composición y configuración para describir la manera en que se presenta la cobertura vegetal. Por un lado, “la composición representa la variedad y abundancia de un paisaje, mientras que la configuración se enfoca en las características geométricas y los arreglos espaciales de los parches dentro de un paisaje” (Zhao et al., 2020, p. 2). Lo anterior podría traducirse con lo propuesto por los autores Bartasaghi-Koc et al. (2020) como cobertura de árboles para la composición y arreglo de los árboles como configuración.

Dentro de la configuración de vegetación, el diseño de plantación de árboles dentro de un área de estudio ha sido clasificada anteriormente como agrupado, disperso y alineado (Bartasaghi-Koc et al., 2020). Algunos otros atributos dentro del diseño de plantación son la orientación de la plantación y los intervalos entre elementos (Liu et al., 2021). Los autores Zhang et al., (2022) clasifican algunos parámetros que caracterizan la vegetación (Figura 9), como patrón de plantación, en el que incluyen los planes de forma, orientación, distancia horizontal y área de recinto, también dentro de los parámetros de propiedades de la hoja, se representan el Índice de Área Foliar (LAI, por sus siglas en inglés) y el Índice de Densidad Foliar (LAD, por sus siglas en inglés). El LAI representa “el área estimada de hojas sobre unidad de tierra ( $m^2/m^2$ )” (Rahaman et al., 2021, p. 6487).

**Figura 9**  
Parámetros indicadores de vegetación



*Nota.* Elaborado a partir de información consultada en “A clustering review of vegetation-indicating parameters in urban thermal environment studies towards various factors” por J. Zhang et al. (2022).

Los parámetros presentados anteriormente, permiten realizar distintos arreglos de vegetación que tendrán diversas propiedades y que, a su vez, generarán ya sea un impacto negativo o positivo en la TST cuando es utilizada como estrategia de mitigación. Un ejemplo de lo anterior es lo que plantean los autores Thom et al. (2016) al mencionar que, “los árboles deben organizarse en grupos siempre que sea posible para maximizar el potencial de sombreado durante el día y permitir la ventilación de la superficie durante la noche” (p. 241), esto sería posible mediante el incremento de la distancia horizontal entre los grupos de árboles, es decir, generando un intercalado. En la Tabla 9 se presentan parámetros que algunos autores han utilizado como parte de la composición y configuración de vegetación.

## 2.7. Simulación microclimática

Para evaluar la eficiencia de las estrategias que involucran el uso de vegetación, en el sitio de estudio, se ha utilizado la técnica de simulación numérica mediante la Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD, por sus siglas en inglés) (Feng et al., 2021; Ouyang et al., 2020) y Modelos de Balance de Energía (EBM, por sus siglas en inglés) (Liu et al., 2021). Una diferencia entre este tipo de simulaciones es que, el EBM no permite estudiar la formación de fenómenos atmosféricos o el flujo de calor sensible y latente (Lai et al., 2019), por lo que suelen

ser más utilizadas las simulaciones CFD para los estudios que analizan el impacto de la vegetación sobre las condiciones climáticas.

En los estudios donde se incluye el uso de simulaciones microclimáticas, se relacionan distintas variables relacionadas a la morfología urbana del sitio, como lo son “el factor de vista del cielo (SVF, por sus siglas en inglés), la relación de aspecto (alto/ancho), la altura de los árboles y los edificios, la estructura o estratificación de la vegetación, la orientación, la altitud y la distancia desde la costa” (Bartesaghi-koc et al., 2021, p. 111566), esto con el objetivo de estudiar sus efectos sobre parámetros del microclima, como la temperatura tanto del aire, de superficie y la radiante media, la humedad y velocidad del viento, entre otros (Bachir et al., 2021; Del Rio et al., 2020).

### 2.7.1. Software de simulación microclimática

Las relaciones planteadas en el apartado anterior, que tienen lugar en las simulaciones microclimáticas, se pueden llevar a cabo mediante programas informáticos basados en CFD, entre estos programas se encuentran BEP-Tree (Krayenhoff et al., 2020), TUF-3D (Nice et al., 2018) y ENVI-met (Y. Wang et al., 2021). El programa que resultó ser el más utilizado en la revisión de la literatura para las simulaciones que estudian el microclima urbano, fue ENVI-met (Tabla 10), definido por Tumini & Higuera-García (2013) como uno de los programas con mayor alcance, quienes además mencionan, está compuesto por tres modelos; de superficie, atmosférico y de vegetación.

**Tabla 10**

Especificaciones de investigaciones que utilizan simulación mediante ENVI-met

Autor y año	Objetivo	Escenas	Periodo de simulación	Fuente de datos climáticos	Variables climáticas	Resultados
Fischer et al., (2022)	Evaluar las estrategias de mitigación del estrés térmico.	2	48 h	Medición de campo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Temperatura del aire</li> <li>▪ Humedad relativa</li> </ul>	Alrededor del 66% del área del dominio mostró reducción en la temperatura en el rango de 2.5 °C a 7.5 °C.
Unal Cilek & Uslu, (2022)	Determinar las características adecuadas de los espacios verdes urbanos (EVU) en diferentes clases de ZCL.	3	3 h	Estación meteorológica del área.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Temperatura del aire</li> <li>▪ Humedad relativa</li> <li>▪ Velocidad y dirección del viento</li> <li>▪ Humedad específica</li> </ul>	Los EVU se caracterizaron por áreas más grandes, de forma rectangular, orientados N-S o NW-SE adyacentes a ZCL de poca altura o; tamaños de área pequeños, de todas las formas y orientaciones adyacentes y ubicadas al este, de clases de ZCL de gran altura.

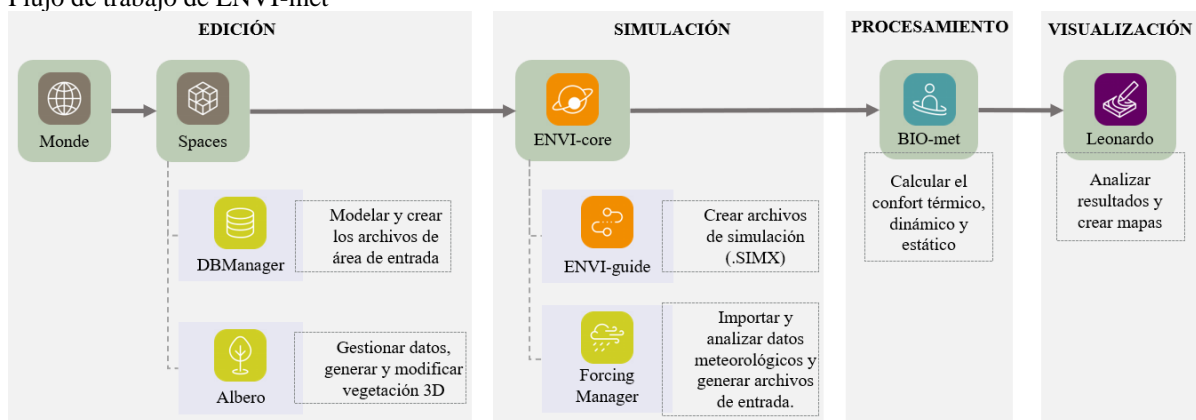
Continúa tabla

Autor y año	Objetivo	Escenas	Periodo de simulación	Fuente de datos climáticos	Variables climáticas	Resultados
Acero et al. (2021)	Evaluar el impacto de la geometría urbana en el confort térmico exterior.	21	24 h	Estación meteorológica del área	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura del aire</li> <li>Humedad relativa</li> <li>Velocidad y dirección del viento</li> <li>Cobertura de nubes</li> <li>Temperatura del suelo</li> </ul>	Los mejores niveles de confort térmico exterior se observan en calles con relaciones de aspecto altas (2.5 a 3) y en calles orientadas de norte a sur. En una perspectiva anual, las calles orientadas NE-SW muestran el peor desempeño.
Mohammad et al. (2021)	Evaluar el confort térmico al aire libre.	6	26 h	Medición de campo y estaciones meteorológicas del área.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura del aire</li> <li>Humedad relativa</li> <li>Velocidad del viento</li> </ul>	El escenario con 50% de arbolado fue el más efectivo al disminuir la temperatura del aire en 0.97 °C en el día y 0.71 °C en la noche.

ENVI-met es un software de simulación microclimática 3D que permite relacionar la morfología urbana y edificios para generar simulaciones de las condiciones climáticas generadas a partir de los dos primeros parámetros (ENVI-met GmbH, 2023). En la Figura 10 se integra la explicación sobre el funcionamiento del simulador numérico.

**Figura 10**

Flujo de trabajo de ENVI-met



*Nota.* Diagrama con las etapas del flujo de trabajo del software ENVI-met. Elaborado a partir de información consultada en “ENVI-met Applications Homepage” por ENVI-met (2023).

En cuanto a la duración de las simulaciones, los autores Unal Cilek & Cilek (2021) mencionan que “los períodos de simulación de 24 h a 48 h proporcionan resultados climáticos de mayor precisión” (p. 14). Lo anterior coincide con los procedimientos experimentales de

estudios que han tenido simulaciones de 24 h (Costanzini et al., 2022; Guo et al., 2022; Lachapelle et al., 2022) y 48 h (M. Zhang et al., 2022; Fischer et al., 2022)

### 2.7.2. Mediciones de campo

Las mediciones de campo son un método tradicional utilizado para la recuperación de información de los parámetros indicadores de vegetación y variables meteorológicas mediante herramientas profesionales con el objetivo de realizar el análisis del efecto de la cobertura vegetal sobre las condiciones térmicas (J. Zhang et al., 2022). También son utilizadas para realizar la validación de la recuperación de TST a través de sensores remotos (Aik et al., 2020; García-Santos et al., 2018; M. Wang et al., 2023) y la validación de la simulación microclimática (Forouzandeh, 2018; Crank et al., 2020; Teshnehdel et al., 2020).

Se entiende como clima a aquel que “caracteriza las condiciones climáticas promedio para un lugar en particular durante un largo período de tiempo” (World Meteorological Organization (WMO), 2022). Tales condiciones se definen por las variables meteorológicas de temperatura del ambiente, presión atmosférica, radiación solar, humedad, precipitación y viento, cuyas definiciones se amplían en la Tabla 11.

**Tabla 11**  
Definiciones de variables meteorológicas


Variable	Definición
Temperatura del ambiente ( $T_a$ )	Temperatura registrada en un termómetro expuesto al aire o al abrigo meteorológico para no exponerlo a la radiación solar directa
Presión atmosférica	Es la fuerza ejercida por el aire sobre una unidad de área. Se ejerce uniformemente y en todas direcciones y es expresada en milibares, hectopascales, pulgadas o milímetros de mercurio (mm/Hg).
Radiación solar	Esta es la energía electromagnética emitida por el sol. La radiación solar que incide sobre la parte superior de la atmósfera terrestre se denomina radiación solar extraterrestre; el 97% de la cual se limita al rango espectral de 290 a 3 000 nm se denomina radiación solar (onda corta).
Humedad relativa	Relación entre la cantidad de vapor de agua que contiene el aire y el máximo que puede contener a una cierta temperatura; se expresa en porcentaje de saturación y es medida a través de un higrómetro.
Precipitación	Hidrometeoro constituido por un conjunto de partículas acuosas, líquidas o sólidas, cristalizadas o amorfas, que caen de una nube o de un conjunto de nubes y que alcanzan el suelo.
Velocidad de viento	Promedio del movimiento del aire durante un periodo de tiempo preestablecido (km/h).
Dirección de viento	Es la dirección desde la cual sopla el viento, puede ser expresada en grados a partir del norte geográfico.

*Nota.* Elaborado a partir de información consultada en “Glosario Técnico” por SMN, (s/f-b) y en “*Guide to Instruments and Methods of Observation*” por WMO, (2021).

En México, existe un sistema de sensores que mide las variables antes mencionadas llamado Estación Meteorológica Automática (EMA), este sistema tiene como objetivo medir y registrar las variables para después transmitir la información a una base de datos (Servicio Meteorológico Nacional (SMN), s/f-a). También entre los factores influyentes en el clima de los sitios están los parámetros físicos del espacio, en los que se incluyen los materiales de la superficie y la morfología urbana.

Para el desarrollo de las campañas de monitoreo, se ha recurrido con anterioridad a la Norma ISO 7726 relacionada al uso de instrumentos de medición de parámetros climáticos (Jamei et al., 2019; Crank et al., 2020). En cuanto al monitoreo de la temperatura del aire, dentro de la norma se indica en primer lugar, la protección del sensor de los cuerpos adyacentes mediante pantallas protectoras, también precisa, que debe generarse un tiempo de espera para el inicio de obtención de datos válidos del monitoreo desde que se instala el equipo, esto debido a que el equipo requiere un período para alcanzar el equilibrio (ISO 7726, 1998).

Por otro lado, la Norma Mexicana NMX-AA-166/2-SCFI-2015 (Secretaría de economía, 2015), especifica que, para las variables de temperatura del aire y humedad relativa, los instrumentos de medición deben estar situados de 1.25 m a 2.00 m por encima del nivel del suelo. En el caso de la medición de dirección y velocidad del viento, indica que el instrumento debe colocarse a 10 m sobre el nivel del suelo en un sitio llano y libre de obstáculos. Entre las mediciones de campo realizadas en estudios anteriores, se han identificado distintas alturas para recuperar las variables meteorológicas, por ejemplo, se ha utilizado una altura de 1.5 m para recuperar la  $T_a$ , la Humedad relativa y la velocidad del viento (Ma et al., 2019; Teshnehdel et al., 2020) y 4 m de altura para la radiación solar (Duan et al., 2019).

The page features a background image of palm leaves. A semi-transparent green rectangular area is centered over the image, and a solid black horizontal line crosses the page through the middle of this green area. The text 'CAPÍTULO 3. MÉTODO' is centered within the green area.

## **CAPÍTULO 3. MÉTODO**

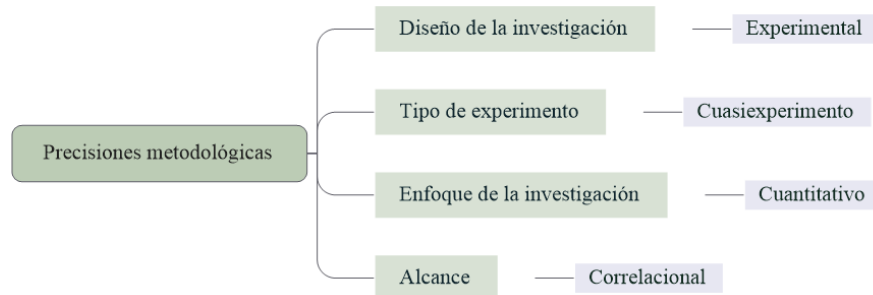
### 3. Método

#### 3.1. Diseño de la investigación

El enfoque del diseño de la presente investigación se define como cuantitativo, definido por los autores Hernández et al. (2014) como aquel que “utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin establecer pautas de comportamiento y probar teorías” (p. 4). Siguiendo las definiciones de los autores Hernández et al. (2014), se establece que el tipo de investigación es experimental de grado cuasiexperimental, ya que, mediante una situación de control, en este caso simulación microclimática, se manipula la variable independiente (cobertura vegetal) para analizar los efectos que tendrá sobre la variable dependiente (TST). Por último, el alcance de la investigación es de tipo correlacional, al evaluar la relación que hay entre la variable dependiente e independiente. En la Figura 11 se integran las precisiones antes mencionadas.

**Figura 11**

Precisiones metodológicas de la investigación

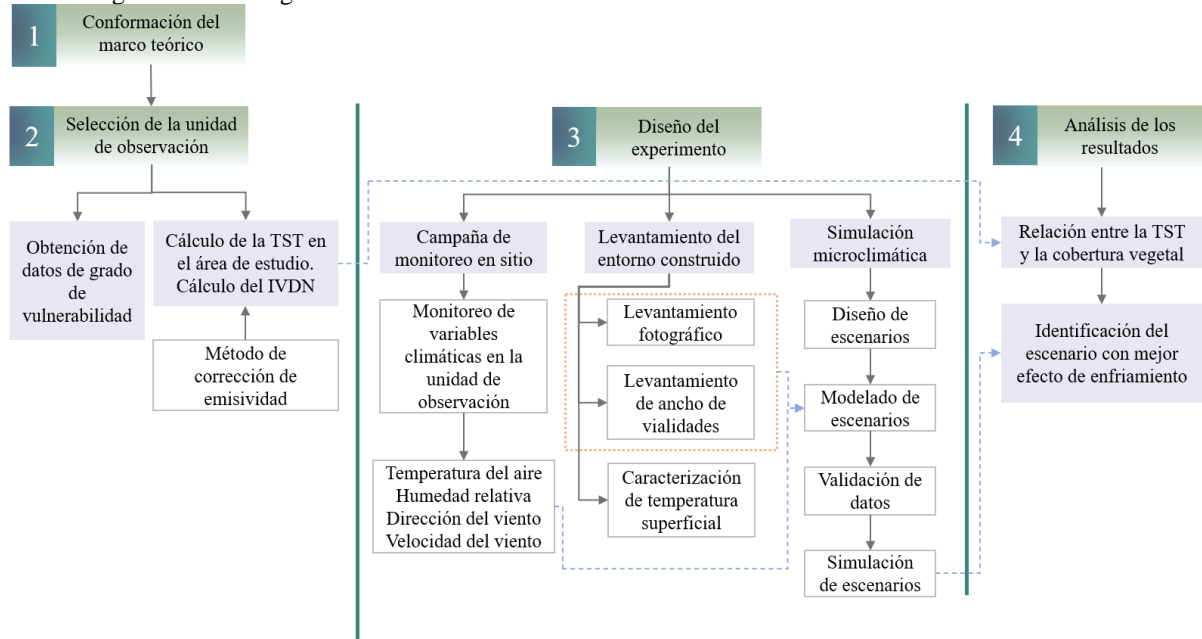


*Nota.* Elaborado a partir de información consultada en “Metodología de la investigación” por Hernández et al. (2014).

##### 3.1.1. Procedimiento metodológico

La metodología del presente estudio (Figura 12) consta de una primera etapa en la que se integra la conformación del marco teórico en base al cual se determinan las siguientes etapas de la investigación. En la segunda etapa, de selección de la unidad de observación, se utiliza la técnica de sensores remotos para la caracterización térmica del área de estudio en donde se aplica el método de corrección de emisividad para el cálculo de TST e IVDN y, posteriormente, se identifica el sitio de estudio que corresponde a los puntos de mayor TST en el último año (2023) y vulnerabilidad social, así como la posibilidad de intervención en el sitio.

**Figura 12**  
Metodología de la investigación



*Nota.* Diagrama general de la metodología de la investigación que incluye las actividades a desarrollar dentro de las cuatro etapas que la conforman.

Dentro de esta etapa también se analizan los cambios de LULC en el área de estudio mediante el IVDN con el objetivo de establecer cómo se ha relacionado la variable de cobertura vegetal con la TST en los últimos cinco años (2018-2023).

Posteriormente, en la etapa de diseño del experimento, se inicia con la campaña de monitoreo de las condiciones climáticas tanto de la unidad de observación como a nivel peatón. Después se desarrolla el levantamiento del entorno construido de la unidad de observación mediante la toma de fotografías en sitio, medición de ancho de vialidades y caracterización de la temperatura superficial. Finalmente, en esta etapa se integra el proceso de la simulación microclimática CFD que va desde el diseño y modelado de los escenarios hasta la validación de los datos de simulación mediante la comparación con los datos monitoreados en sitio.

Por último, en la etapa de análisis de los resultados a través del análisis estadístico se da respuesta a la pregunta de investigación planteada al identificar la configuración de cobertura vegetal que tiene un mayor impacto en la reducción de la TST. Las precisiones para el desarrollo de las etapas mencionadas se describen en la Tabla 12 en donde se integra una descripción de las actividades a realizar en cada etapa, así como los instrumentos y/o herramientas a utilizar para cada actividad.

**Tabla 12**

Etapas, actividades e instrumentos/herramientas en la investigación

<b>Etapas</b>	<b>Actividades</b>	<b>Método</b>	<b>Instrumentos/ Herramientas</b>
Marco teórico	<ul style="list-style-type: none"> <li>Revisión de la literatura</li> <li>Definición de la metodología</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Método PSALSAR con adaptación al método CEE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bases de datos, Scopus y Web of Science</li> <li>Microsoft Excel</li> <li>Gestor de referencias Mendeley</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Obtención de imágenes satelitales</li> <li>Cálculo de la TST en el área de estudio</li> <li>Cálculo del IVDN</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>USGS Earth Explorer</li> <li>Software ArcGIS – ArcMap 10.8</li> </ul>
Selección de la unidad de observación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Generación de mapa con áreas de influencia</li> <li>Identificación de la posibilidad de intervención</li> <li>Establecimiento de la relación entre el LULC y la TST</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Método de corrección de emisividad</li> <li>Análisis estadístico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Software de datos geoespaciales Google Earth Pro</li> <li>Hoja de cálculo</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Levantamiento del entorno construido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Levantamiento fotográfico</li> <li>Medición de vialidades</li> <li>Toma de TS en el sitio</li> <li>Modelado 3D de la unidad de observación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cámara Sony DSC H300</li> <li>Teléfono móvil</li> <li>Flexómetro</li> <li>Cámara termográfica compacta FLIR C5</li> <li>Software de datos geoespaciales Google Earth Pro</li> <li>Software Sketchup Pro</li> <li>Software Meteororm V7.1.3.19872</li> </ul>
Diseño del experimento	<ul style="list-style-type: none"> <li>Campaña de monitoreo en sitio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recolección de datos climáticos del área</li> <li>Monitoreo de condiciones climáticas en el área</li> <li>Monitoreo de condiciones climáticas a nivel de peatón</li> <li>Diseño de escenarios; selección de especie de arbolado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estación meteorológica inalámbrica Vantage Pro2 Davis 6152.</li> <li>Registrador de datos HOBO 11 modelo U12-012</li> <li>Software Sketchup</li> <li>Plataforma EnclicoVida</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Simulación microclimática</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Simulación de escenarios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laptop Dell G15 5520</li> <li>Laptop Dell G7 7588</li> <li>Estación de trabajo HP Z440</li> <li>HP ProDesk 400 G6</li> <li>Software ENVI-met V5.6.1</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Validación de datos: cálculo de R<sup>2</sup>, RMSE, MAE e índice d.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Microsoft Excel</li> </ul>

Continúa tabla

Etapa	Actividades	Método	Instrumentos/ Herramientas
Análisis de resultados	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desarrollo de los resultados asociados a cada objetivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estadística descriptiva y correlacional</li> <li>Mapas de resultados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Microsoft Excel</li> <li>Software ENVI-met V5.6.1</li> </ul>

*Nota.* CEE (Colaboración para la evidencia ambiental), RMSE (Raíz del error cuadrático medio), MAE (Error absoluto medio). TS = temperatura superficial.

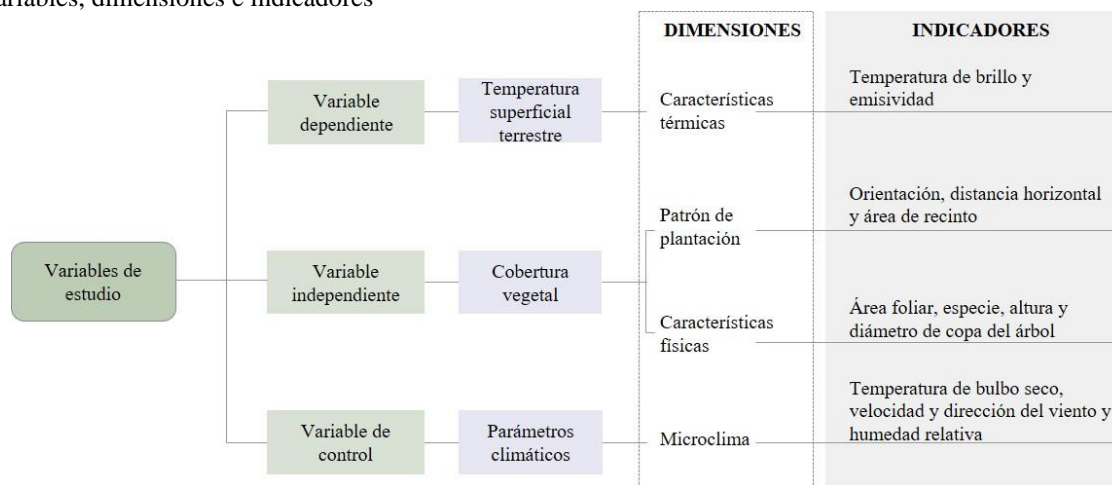
## 3.2. Diseño del Experimento

### 3.2.1. Objeto y variables de estudio

Como objeto de estudio se analiza el efecto de enfriamiento de la cobertura vegetal para lo cual se establece como variable dependiente la TST y como variable independiente la cobertura vegetal. También se integran los parámetros climáticos como una tercera variable de control para el proceso de simulación. Para cada una de las variables se han definido las dimensiones que hacen referencia a los factores que obtienen y miden las variables y, a su vez, se integran los indicadores que son aquellos elementos concretos que expresan la realidad medible de las variables (Arias, 2012) y que determinan el método para la recolección de datos, estas dimensiones e indicadores se muestran en la Figura 13.

**Figura 13**

Variables, dimensiones e indicadores



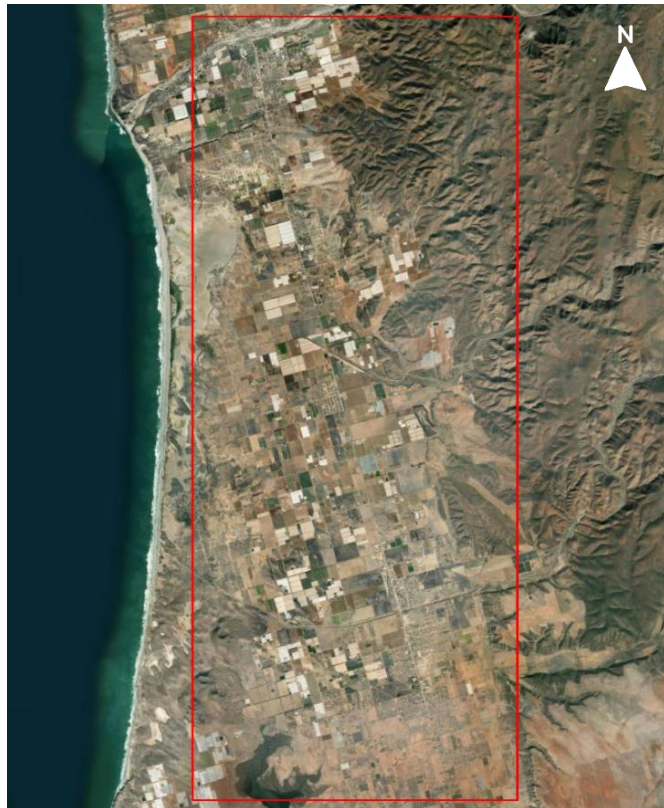
*Nota.* Diagrama de las variables de estudio que conforman la investigación e indicadores para la recolección de datos de las mismas.

### 3.2.2. Área de estudio

#### 3.2.2.1. Descripción

El área de estudio comprende las dos localidades con mayor población del municipio de San Quintín, Baja California, México; Lázaro Cárdenas, con 18,829 habitantes y Vicente Guerrero con 13,876 habitantes, según el Censo de Población y Vivienda del año 2020 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2021). El polígono analizado se delimita al extremo superior por la latitud  $30^{\circ} 44.843' N$ , el extremo inferior latitud  $30^{\circ} 29.627' N$  y por la longitud  $115^{\circ} 53.821' W$  en el límite derecho y  $116^{\circ} 0.892' W$  en el límite izquierdo dentro del sistema de coordenadas UTM WGS84 11N. En el polígono ortogonal se caracterizó de esta manera debido a la naturalidad dispersa de las localidades analizadas y comprende un área de  $327.11 \text{ km}^2$  (Figura 14) lo que posiciona al análisis del área como un estudio a nivel mesoescala según lo definido por los autores Goodess et al. (2021).

**Figura 14**  
Área de estudio



*Nota.* Polígono del área de estudio generado a partir del software ArcGIS correspondiente al año 2023.

San Quintín, B.C. presenta un tipo de clima BWh (desértico cálido) dentro de la clasificación climática Köppen-Geiger (Peel et al., 2007) y, por otro lado, dentro de la clasificación climática de INEGI (2022a), se posiciona dentro de un clima BWkw (muy seco templado) y BWhw (muy seco semicálido). El municipio tiene como actividad económica principal la agricultura y el área de estudio mantiene cercanía al mar, a una distancia de 10 km al oeste del área urbanizada.

### 3.2.2.2. Caracterización climática

A 5.75 km al este del área de estudio se ubica una estación meteorológica a cargo del Servicio Meteorológico Nacional, de la cual, se consultaron las normales climatológicas generadas para el periodo del año 1981 al 2010 (Servicio Meteorológico Nacional (SMN), s/f-c, acceso el 21 de abril de 2022). Las normales indicaron una temperatura máxima anual de 24 °C, siendo septiembre el mes más cálido con 27.6 °C seguido de octubre y agosto con 26.9 °C y 26.8 °C respectivamente. En cuanto a la temperatura media, el mes más cálido es agosto con 21.5 °C y la temperatura media anual es de 17.2 °C. Por otro lado, la temporada de lluvias se presenta entre el mes de septiembre y marzo con lluvias máximas mensuales que van de 42.0 mm a 167.5 mm y, la precipitación normal máxima anual es de 133.3 mm.

Para determinar la caracterización climática típica del área de estudio se realizó el análisis de un archivo climático generado en el software Meteonorm V7.1.3.19872 con los valores horarios para el sitio de estudio. Meteonorm es un programa de interpolación de datos que utiliza bases de datos climáticos globales para generar resultados estocásticamente en años típicos (METEOTEST Genossenschaft, 2020). En la Tabla 13 se indican las precisiones para la generación del archivo dentro del software.

**Tabla 13**  
Precisiones para la generación del archivo climático

Coordenadas	Altitud	Zona horaria	Situación*	Periodo de temperatura
30.526 °N Lat -115.93 °E Lon	28 m.s.n.m	-8 UTC	Valle prealpino	2000-2009

*Nota.* La tabla muestra los datos ingresados en el software Meteonorm que describen el área de estudio de San Quintín. \*La situación hace referencia a la condición del terreno que impacta la interpolación de datos para las variables de temperatura, humedad y velocidad del viento.

A partir de los datos generados en Meteororm y los analizados del SMN, se identificó la temporada cálida para San Quintín, esto con la finalidad de llevar a cabo la etapa experimental en este periodo, lo anterior, debido a su relación con la problemática de sobrecalentamiento abordada en la investigación.

### 3.2.3. Temporalidad del estudio

Como resultado del análisis desarrollado en el subtema anterior, el periodo asignado para realizar el análisis de cambios de LULC y TST, así como la etapa experimental que incluye la adquisición de datos climáticos y desarrollo de simulaciones microclimáticas, comprende los meses de agosto-octubre, identificado como el periodo más cálido, comprendiendo la estación de verano y otoño.

### 3.2.4. Unidad de observación

El proceso de selección de unidad de observación incluye el análisis del área de estudio para la determinación del sitio con los valores más altos en los criterios de selección, mismos que se presentan en el siguiente subtema. A partir de los resultados obtenidos, se prosigue con la recolección de datos de la morfología urbana y variables climáticas para la caracterización de la unidad de observación seleccionada.

#### 3.2.4.1. Criterios de selección

Mediante la revisión de la literatura de casos análogos, se determinaron los criterios de selección considerados para delimitar la unidad de observación (Tabla 14). El primer criterio hace referencia al registro de un nivel elevado de TST, en relación con su entorno, mismo que se identifica a través de imágenes satelitales disponibles para el área analizada.

**Tabla 14**  
Criterios para la selección de la unidad de observación

Criterio	Prioridad	Especificaciones	Valores
TST	1	Cálculo de TST por manzana	TST en °C
Vulnerabilidad social	2	Análisis por AGEB	Grado de vulnerabilidad Ambiente edificado
Posibilidad de intervención	3	Análisis de disponibilidad de superficies permeables en las calles.	Positivo o negativo

*Nota.* La prioridad de los criterios, en un rango del 1 al 3, determina el orden en que éstos fueron aplicados para la selección de la unidad de observación, donde 1 es la prioridad mayor.

El segundo criterio incluye el análisis del grado de vulnerabilidad social (así definido en el Periódico Oficial del Estado de Baja California, 2024) de la población en el área de estudio con la finalidad de determinar aquellas manzanas que, sumando el criterio anterior, se mantienen con un riesgo mayor ante las consecuencias del cambio climático por aumento de temperatura, entre las variables para la designación del grado de vulnerabilidad se consideraron aspectos como la edad, género, acceso a servicios públicos en viviendas, escolaridad y salud con datos obtenidos del primer instrumento de planeación urbana para el municipio de San Quintín; el Plan de Municipal de Desarrollo Urbano de San Quintín (Periódico Oficial del Estado de Baja California, 2024). Para este criterio, se consideró la exclusión de manzanas que presentaron un menor ambiente edificado, relacionado con la presencia de población en las manzanas.

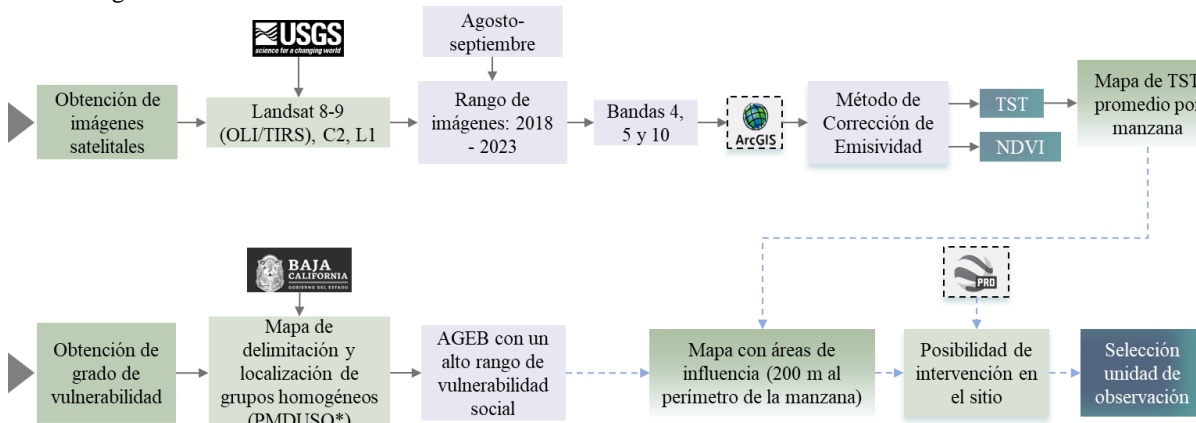
Por último, se integra el criterio de posibilidad de intervención. Una vez relacionados los dos criterios anteriores, la decisión final de selección estuvo determinada por la posibilidad de integrar propuestas de cobertura vegetal en el sitio.

### *3.2.5. Procedimiento de adquisición de datos para la selección de la unidad de observación*

El procedimiento guiado a resolver el primer criterio de selección de unidad de observación (Figura 15), incluye en primer lugar, la adquisición de imágenes del satélite Landsat 8-9 (OLI/TIRS), C2 (colección 2), L1 (nivel 1), del área de estudio. La elección de este satélite estuvo definida por la disponibilidad de imágenes para el área de estudio, tanto espacial como temporal, además de la resolución espacial, y su uso recurrente en la literatura consultada. Por otro lado, se optó por el nivel 1 de la colección debido a que éste permite realizar el cálculo de la TST mediante los métodos establecidos en el marco teórico referencial, siendo el método de corrección de emisividad el seleccionado para este fin. Las precisiones para el desarrollo del cálculo de TST e IVDN se amplían en los siguientes subtemas.

**Figura 15**

Metodología de selección de unidad de observación



*Nota.* Diagrama de la metodología de la investigación que incluye las actividades a desarrollar para el cálculo de TST e IVDN, así como del mapa con áreas de influencia para la selección de la unidad de observación. \*Plan de Municipal de Desarrollo Urbano de San Quintín (Periódico Oficial del Estado de Baja California, 2024).

Respecto a la obtención de datos de grados de vulnerabilidad para la determinación del criterio de selección 2, los datos son obtenidos del Plan de Municipal de Desarrollo Urbano de San Quintín (Periódico Oficial del Estado de Baja California, 2024), en donde se presentan los valores de vulnerabilidad por AGEB. Una vez generado el mapa de TST y analizar los grados de vulnerabilidad por AGEB, se genera un mapa de áreas de influencia a partir del cálculo de TST para determinar las áreas con un mayor grado de vulnerabilidad que serían beneficiadas con la implementación de las estrategias de mitigación. Por último, mediante la consulta de Google Earth Pro se identifican aquellas áreas con posibilidad de intervención para la implementación de arbolado en el espacio público.

### 3.2.5.1. Objetivo

En esta primera etapa de adquisición de datos se tiene como objetivo seleccionar la unidad de observación, y, además, se aborda el primer objetivo específico de la investigación, que determina establecer la relación espacio temporal entre la TST y el LULC en San Quintín, B.C. a través de la teledetección, lo anterior, guiado a comprender cómo los cambios en la cobertura vegetal han repercutido en la TST en los últimos años.

### 3.2.5.2. Periodo representativo de adquisición de datos

El periodo para el análisis espacio-temporal de los cambios de LULC y TST incluye los meses de agosto y septiembre, mismos que son representativos de la temporada cálida. En el caso del tiempo a analizar, este se estableció de 5 años, comprendidos entre el año 2018 y 2023.

### 3.2.5.3. Herramientas y software

Para la primera sección de adquisición de datos se accedió a la página web *EarthExplorer* del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), en donde es posible visualizar, explorar y descargar metadatos provenientes del USGS. El procesamiento de este primer conjunto de datos se desarrolló dentro del software ArcGIS en el componente de programas de procesamiento geoespacial; ArcMap.

En la segunda sección de adquisición de datos de grado de vulnerabilidad se accedió al documento Plan de Municipal de Desarrollo Urbano de San Quintín (Periódico Oficial del Estado de Baja California, 2024) en donde como parte del diagnóstico del municipio, se integra la clasificación de grupos homogéneos para determinar el grado de vulnerabilidad por AGEB. Las zonas con mayor vulnerabilidad se identificaron a través del mapa territorial publicado en el documento. Las precisiones de las herramientas y programas antes mencionados se presentan en la Tabla 15.

**Tabla 15**  
Precisiones de las herramientas y software empleado

Nombre	Imagen	Versión
USGS <i>Earth Explorer</i>		Fecha de acceso: 11/08/2023
Plan de Municipal de Desarrollo Urbano de San Quintín		Abreviada: mayo 2024
Google Earth Pro		Actualización: 2021
Software ArcGIS Desktop 10.8 - ArcMap		10.70.10450
Microsoft Excel 2019 MSO		2212

### 3.2.5.4. Adquisición de datos: procesamiento de imágenes satelitales

#### a) Proceso de descarga

Las imágenes satelitales de Landsat fueron obtenidas del sitio *EarthExplorer* del USGS (s/f) el día 11 de agosto de 2023 de Landsat Colección 2 Nivel-1, los datos de las imágenes se muestran en la Tabla 16.

**Tabla 16**

Detalles de las propiedades de las imágenes de satélite

Satélite	Sensor	Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora	Calidad*	Resolución espacial (m)	Cobertura de nubes
Landsat 8	OLI-TIRS	01/08/2018	06:16:12 p. m.	9	30	36.64
Landsat 8	OLI-TIRS	05/09/2019	06:17:07 p. m.	9	30	5.96
Landsat 8	OLI-TIRS	22/08/2020	06:16:59 p. m.	9	30	0.62
Landsat 8	OLI-TIRS	25/08/2021	06:17:06 p. m.	9	30	0.85
Landsat 9	OLI-TIRS	20/08/2022	06:17:07 p. m.	9	30	23.18
Landsat 9	OLI-TIRS	07/08/2023	06:16:39 p. m.	9	30	0.17

*Nota.* Elaborado a partir de información de los archivos obtenidos de la página web *EarthExplorer* del USGS (s/f). La calidad 9 hace referencia a una calidad de imagen “buena”.

La discrepancia de tiempo de adquisición entre las imágenes obtenidas es de menos de un minuto, lo que permite una comparación de los datos a través de los años. En cuanto a la calidad de las imágenes, es buena, con un valor de nueve en una escala de 0 a 10 según los datos publicados en USGS (Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, 2021).

Por otro lado, se consultaron las condiciones climáticas correspondientes a la fecha de cada imagen recuperadas a través de una EMA cercana al área de estudio (Tabla 17). Tales condiciones se analizan con la finalidad de que las variables climáticas presenten valores similares en todas las imágenes y de esta manera, poder presentar una comparación entre los datos obtenidos para TST e IVDN en los cinco años. Un ejemplo de incumplimiento de lo anterior es que la presencia de niveles altos de lluvia en la fecha de alguna de las imágenes podría producir resultados atípicos en la comparación de las dos variables estudiadas.

**Tabla 17**

Condiciones climáticas de imágenes satelitales

Datos de la estación	Fecha (dd/mm/aaaa)	Temp_aire (°C)	Humedad relativa (%)	Precipitación (mm)	Vel_viento (m/s)	Dir_viento (°)
Estación: SANQUINTIN	01/08/2018	22.7	82	0	10.4	311
Estado: Baja California	05/09/2019	22.8	81	0	6.9	310
Municipio: Ensenada	22/08/2020	25.3	71	0	8.1	215
Latitud (N): 30.53166667	25/08/2021	21.5	79	0	12.1	324
Longitud (O): -115.8375	20/08/2022	21.2	76	0	7.3	306
Altitud: 32 m s. n. m.	07/08/2023	24.2	70	0	15.5	313

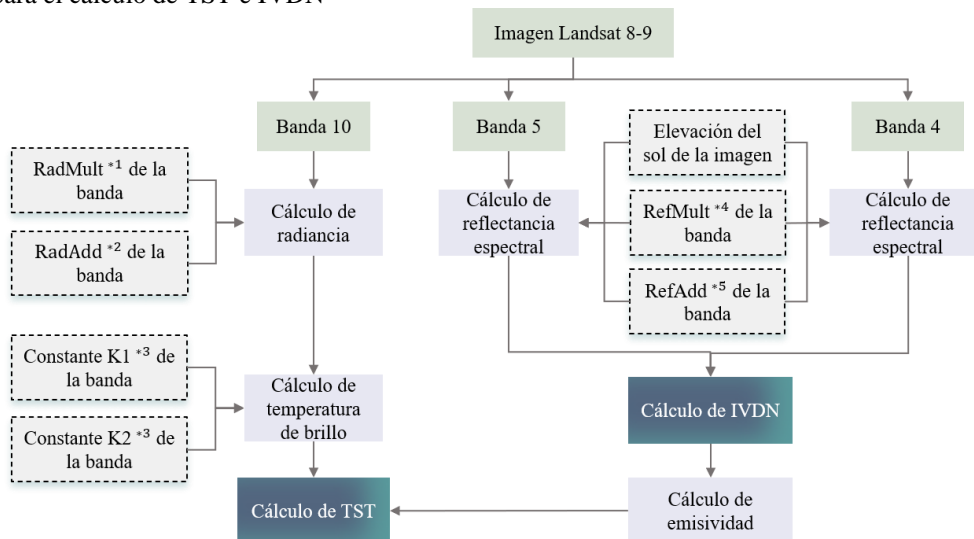
*Nota.* m s. n. m. = metros sobre el nivel del mar. Temp\_aire = temperatura del aire. Vel\_viento = velocidad del viento. Dir\_viento = dirección del viento.

### b) Cálculo de Temperatura Superficial Terrestre e Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

Derivado de la revisión de la literatura se seleccionó el método de corrección de emisividad para el cálculo de la TST, siendo este método uno de los más utilizados en los últimos cinco años. En la Figura 16 se muestra un diagrama con el procedimiento del método seguido dentro del componente ArcMap del software ArcGIS, dicha estructura del método fue la misma para cada una de las seis imágenes utilizadas.

**Figura 16**

Método para el cálculo de TST e IVDN



*Nota.* Metodología utilizada para la recuperación de la TST e IVDN en el software ArcGIS basada en el método de corrección de emisividad. \*1Factor de escala multiplicativo de radiancia. \*2Factor de escala del aditivo de radiancia. \*3Constante de conversión térmica. \*4Factor de escala multiplicativo de reflectancia. \*5Factor de escala del aditivo de reflectancia.

Las fórmulas aplicadas para cada uno de los pasos del método de cálculo de TST están especificadas en el apartado 2.5.2 del presente documento. Se utilizó la banda térmica 10 de Landsat para la recuperación de la TST debido a que la banda 11 no es recomendada por el USGS debido a la incertidumbre de calibración. En cuanto a los datos para las constantes de conversión térmica K1 y K2, la elevación del sol, el factor de escala multiplicativo de reflectancia y el factor de escala del aditivo de reflectancia de cada imagen, fueron recuperados del archivo de metadatos obtenido en el proceso de descarga del sitio *EarthExplorer* del USGS y se presentan en la Tabla 18.

**Tabla 18**  
Datos de imágenes satelitales para el cálculo de TST

	01/08/2018	05/09/2019	22/08/2020	25/08/2021	20/08/2022	07/08/2023
Elevación del sol	65.03569518	58.83408318	61.7011648	61.16555018	62.16881526	64.29407549
K1_Banda 10	774.8853	774.8853	774.8853	774.8853	799.0284	799.0284
K2_Banda 10	1321.0789	1321.0789	1321.0789	1321.0789	1329.2405	1329.2405
RadMult Banda 10	0.0003342	0.0003342	0.0003342	0.0003342	0.0003800	0.0003800
RadAdd Banda 10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
RefMult Banda 5	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002
RefAdd Banda 5	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
RefMult Banda 4	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002
RefAdd Banda 4	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1

### c) Cálculo de TST promedio

Para el análisis de los datos obtenidos del cálculo de TST, se recuperó el archivo con división por manzanas para San Quintín desde el sitio de Marco Geoestadístico de INEGI (<https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>). En cuanto a los datos de TST, se utilizó el año 2023 para la selección de la unidad de observación, por lo que el siguiente proceso a describir hace referencia a la TST de este año.

Dentro de ArcMap, a partir de los polígonos generados por manzana de INEGI, mediante la herramienta “*Zonal statics as Table*” se generó la tabla de atributos con los valores de TST por manzanas. Dentro de este proceso, se precisó dentro de la opción de “*Environment Setting*” – “*Processing Extent*”, agregar de nuevo el resultado de TST, con la finalidad de que el promedio de TST de la manzana se calcule incluyendo los píxeles que ingresen con más del 50% de su totalidad dentro del polígono. Debido a la escala del píxel para las imágenes Landsat

utilizadas (30 m x 30 m), podría haber manzanas menores a esta dimensión que no obtuvieron valores.

Para visualización del proceso anterior se generó un mapa mediante la unión de la tabla de atributos generada y la división por manzanas a través de la herramienta *joins*. En la simbología de la capa generada se seleccionó la opción de *mean* para visualizar el valor promedio por manzana.

### 3.2.5.5. Adquisición de datos de vulnerabilidad social

Los datos de grado de vulnerabilidad social respecto a la población del municipio, fueron obtenidos mediante el diagnóstico generado para el Plan de Municipal de Desarrollo Urbano de San Quintín, en el cual se consideraron quince variables del Censo de Población y Vivienda 2020 de INEGI (Tabla 19).

**Tabla 19**  
Variables para la designación de grados de vulnerabilidad social

Variable	Descripción
POBTOT20	Población total 2020
POB0_14	Población de 0 a 14 años
POB65_MAS	Población de 65 años y más
VPH_AEASP	Viviendas particulares habitadas que no se abastecen del servicio público de agua
VPH_NODREN	Viviendas particulares habitadas que no disponen de drenaje
PRESOE15	Población de 5 años y más residente en otra entidad en marzo de 2015
P6A11_NOA P12A14NOA	Población de 6 a 14 años que no asiste a la escuela
P15YM_SE	Población de 15 años y más sin escolaridad
PSINDER	Población sin afiliación a servicios de salud
PCON_DISC	Población con discapacidad
P5_HLI_NHE	Personas de 5 años y más que hablan alguna lengua indígena y además no hablan español.
HOGJEF_F	Hogares censales con persona de referencia mujer
GRADEPEND	Tasa de dependencia demográfica
GRAPROES	Grado promedio de escolaridad

*Nota.* Adaptado y modificado de “Plan de Municipal de Desarrollo Urbano de San Quintín” por Periódico Oficial del Estado de Baja California (2024).

Mediante este documento, se recuperó la categorización de grado de vulnerabilidad para cada AGEB urbana (ver en Anexo 2), siendo estas clasificadas en “Muy baja”, “Baja” y “Media”. Una vez identificadas las AGEB con vulnerabilidad “Media” se identificaron las

correspondencias con los valores más altos de TST obtenidos por manzana, como se amplía en el siguiente subtema.

### *3.2.6. Análisis de datos de imágenes satelitales y vulnerabilidad social*

El análisis de los datos obtenidos para seleccionar la unidad de observación, integró en primer lugar, la obtención de imágenes satelitales de Google Earth Pro para realizar un filtro de manzanas descartando aquellas con niveles altos de TST que no tuvieran construcciones alrededor, esto debido a que el segundo criterio de selección de la unidad de observación, indica la presencia de población y en particular, de población vulnerable.

Después, se realizó un análisis para identificar en el mapa de vulnerabilidad social de San Quintín (ver en Anexo 2) aquellas manzanas comprendidas dentro de las AGEB urbanas con un grado de vulnerabilidad media (siendo éste el más alto), mismas que se posicionan cercanas a la vialidad principal y representan la mayoría de las AGEB en el mapa. También se ubicaron éstas AGEB en el mapa de TST promedio por manzana ya desarrollado y se identificaron aquellas con un alto nivel de TST.

Dentro del mapa antes mencionado, se generaron áreas de influencia alrededor de las manzanas que tuvieran un alto nivel de TST, que se mantuvieron después del primer filtro de manzanas y que presentaron un grado de vulnerabilidad media. Estas áreas de influencia mantienen una distancia perpendicular de 200 m desde el perímetro de las manzanas. A partir de los nuevos polígonos generados, se seleccionaron las manzanas de las cuales más del 50 % de su superficie estuvo dentro del área del polígono, conformando estas, las manzanas del área de influencia.

Al análisis anterior, se sumó la identificación de la disponibilidad de espacio en las áreas de influencia para realizar propuestas de arbolado urbano mediante imágenes de Google Earth Pro. A partir de esto, se identificó la manzana que, además de tener un alto valor de TST y vulnerabilidad social, tuviera la posibilidad de intervención. Con lo anterior, se designó la unidad de observación comprendiendo todas las manzanas que ingresaron en el área de influencia.

Por otro lado, para la representación de los datos obtenidos de TST en cada año, se generaron mapas con un tipo de visualización de mínimos y máximos. De la misma manera, para la representación de los datos de IVDN, se generó un mapa para cada uno de los años con

visualización de mínimos y máximos. A su vez, a partir de los datos de IVDN se generó un gráfico de líneas con los valores máximos, medios y mínimos con la finalidad analizar el comportamiento del nivel de cobertura vegetal calculado dentro de los años estudiados.

Con los datos generados en los rangos de TST mínima y máxima y, los datos de IVDN mínima y máxima, se realizó un gráfico de líneas de doble eje vertical, que permitió el análisis comparativo de estas dos variables para los años del periodo de estudio (2018-2023).

### 3.2.6.1. Caracterización de la unidad de observación

La unidad de observación resultante (Figura 17), ubicada al sureste del área de estudio, está dividida por la vialidad principal del municipio de San Quintín, y es definida como una localidad urbana según el Plan de Municipal de Desarrollo Urbano de San Quintín (Periódico Oficial del Estado de Baja California, 2024). Mantiene un grado de vulnerabilidad media y comprende un total de 732 habitantes, de los cuales 200 mantienen una edad de 0 a 14 años y, 38 más se integran en la categoría de 65 años y más (INEGI, s/f-b), identificando a estos dos últimos grupos como parte de la población vulnerable ante el cambio climático. En cuanto a la clasificación de ZCL, presenta una clasificación 6<sub>fb</sub> que se caracteriza por tener un área construida abierta de poca altura, con árboles dispersos y suelos desnudos.

**Figura 17**

Unidad de observación



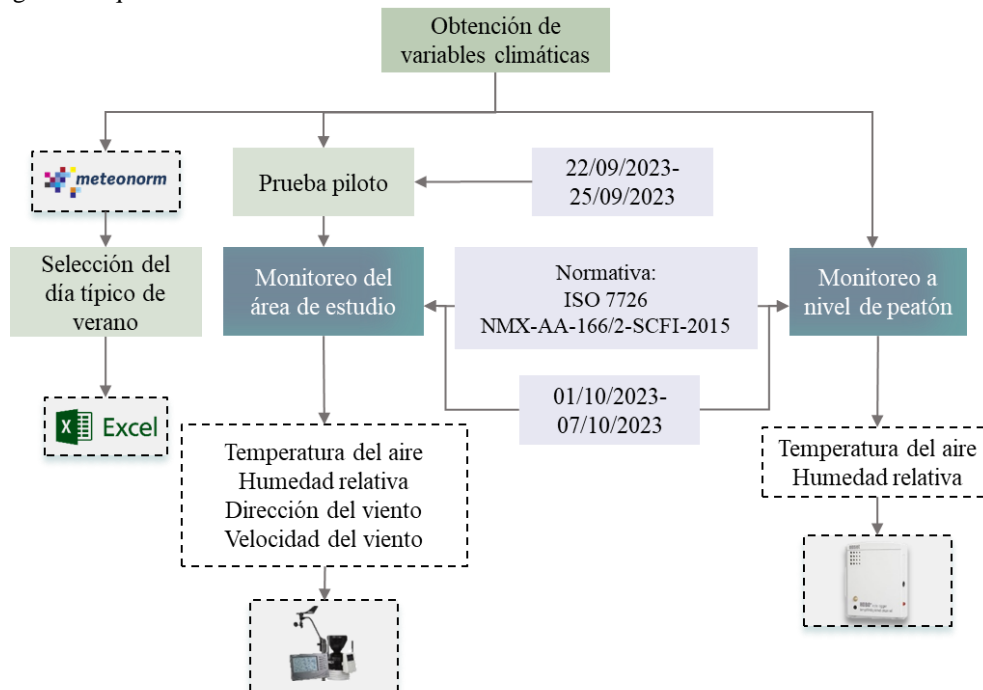
Nota. (a) Delimitación de la unidad de observación. (b) Perspectiva de norte a sur. Adaptado de mapa de Google Earth (Google, s/f).

### 3.2.7. Procedimiento de adquisición de datos climáticos y morfología del sitio

Para la recolección de datos climáticos, en primer lugar, se realizó la recuperación de un archivo climático del área de estudio mediante el software *Meteonorm*, a partir de este, en una hoja de cálculo del software *Microsoft Excel*, se analizaron los datos climáticos de temperatura del aire para los días típicos mensuales. Posteriormente, para la campaña de monitoreo, se desarrolló una prueba piloto con la estación meteorológica portátil. Seguido de esto, el monitoreo de las variables climáticas en el área de estudio, se llevó a cabo a través de la estación meteorológica inalámbrica, de grado de investigación, modelo *Vantage Pro2 Davis 6152*. Por otro lado, para el monitoreo a nivel peatón, se utilizaron dos registradores de datos de temperatura del aire y humedad relativa. Ambas campañas de monitoreo se realizaron el mismo periodo de tiempo que comprendió un total de siete días (1 al 7 de octubre). La normativa consultada para la instalación del equipo de monitoreo incluyó la norma internacional *ISO 7726* y la norma mexicana *NMX-AA-166/2-SCFI-2015*. El proceso de la metodología se muestra en la *Figura 18*.

**Figura 18**

Metodología de adquisición de datos climáticos de la unidad de observación



*Nota.* Diagrama de la metodología de la investigación que incluye las actividades a desarrollar durante la campaña de monitoreo y selección del día típico de verano.

En cuanto a la recolección de información del entorno construido, para los datos de la morfología urbana del sitio, a la par de la campaña de monitoreo, se realizó un levantamiento fotográfico de la unidad de observación y se midieron anchos de banquetas y vialidades para corroborar la información que posteriormente se recuperó de Google Earth Pro. También, se llevó a cabo, como parte de la caracterización de la unidad, la toma de fotografías a través de una cámara termográfica para recuperar los datos de temperatura superficial de los distintos materiales presentes a nivel superficie.

#### *3.2.7.1. Objetivo*

La campaña de monitoreo de las variables climáticas y la recolección de datos del entorno construido del sitio, tienen como objetivo adquirir los datos de entrada necesarios para el desarrollo de las simulaciones microclimáticas sobre la integración de cobertura vegetal a nivel de cañón urbano dentro del software ENVI-met. Lo anterior, según lo establecido en la pregunta de investigación en la que se indica, se considerarán las condiciones físico-geográficas y del microclima del área de estudio para evaluar el efecto de enfriamiento de la cobertura vegetal.

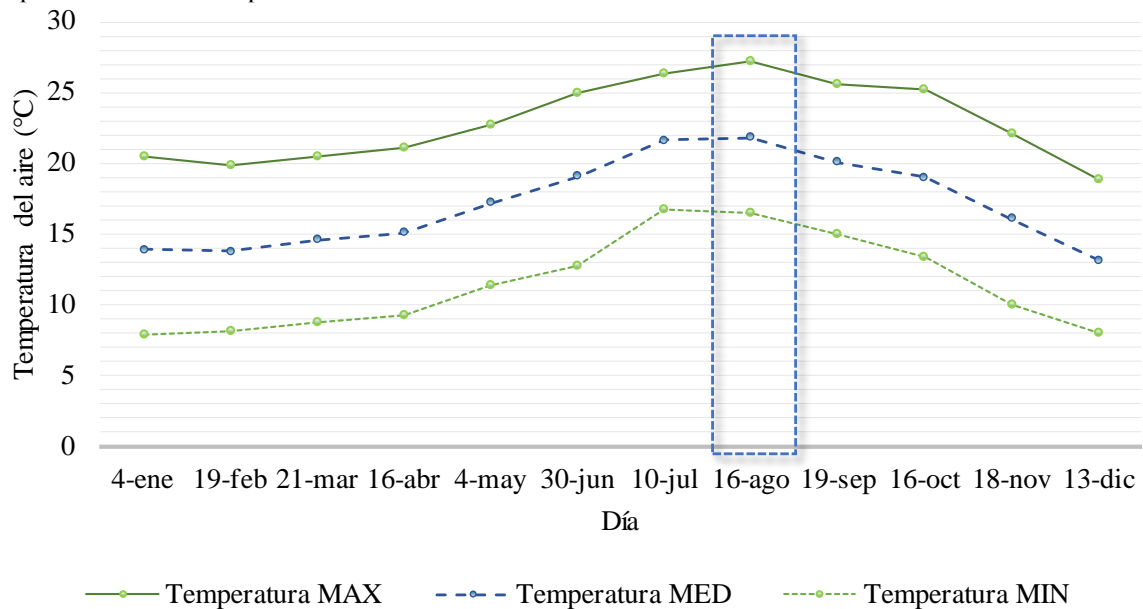
#### *3.2.7.2. Periodo representativo de adquisición de datos climáticos*

El periodo definido para la recolección de datos climáticos fue el mes de octubre, mismo que se encuentra dentro del periodo cálido definido anteriormente para San Quintín. El tiempo de monitoreo se definió de siete días, comprendidos entre el día 1 y 7 de octubre, tanto para la recolección de datos de las condiciones climáticas del área como a nivel peatón, aunque cabe destacar que la estación meteorológica estuvo registrando datos desde el día 30 de septiembre.

#### *3.2.7.3. Procedimiento de selección del día típico de verano*

Para la selección de las condiciones térmicas típicas del entorno, en la unidad de observación, se utilizó el archivo climático generado en el software Meteonorm (ver en apartado 3.2.2.2), en donde se identificó el día 16 de agosto como el día típico, con base a la temperatura del aire, para la temporada cálida, presentando una oscilación térmica de 5.4 °C, con una temperatura máxima de 27.2 °C, una media de 21.9 °C y mínima de 16.5 °C (Figura 19).

**Figura 19**  
Temperatura de los días típicos mensuales del área de estudio





*Nota.* Gráfico de barras con las temperaturas máximas (MAX), medias (MED) y mínimas (MIN) de los días típicos por mes en Lázaro Cárdenas, S.Q. Selección del día típico para el periodo de verano.

#### 3.2.7.4. Herramientas, equipo, software

Para el levantamiento del entorno construido de la unidad de observación, se utilizó una cámara Sony DSC H300 y teléfonos móviles para la toma de fotografías. También, se utilizó un flexómetro para la toma de medidas. Después de la adquisición de datos en sitio, los valores de las dimensiones recolectadas fueron corroborados con la información disponible en el software Google Earth Pro. Posterior a esto, todos los datos fueron modelados en el software Sketchup.

Para la campaña de monitoreo, se utilizó una estación meteorológica inalámbrica Vantage Pro2 Davis 6152, para la obtención de datos de las variables climáticas a una altura de 5.37 m. Por otro lado, para el monitoreo a nivel peatón, se utilizaron dos registradores de datos colocados a una altura de 2.10 m y 2.25 m. Las precisiones para el equipo de monitoreo se integran en la Tabla 20.

**Tabla 20**  
Precisiones del equipo de monitoreo

Equipo	Imagen	Variable monitoreada	Intervalos de monitoreo	Precisión	Rango de medición	Altura del equipo
Estación meteorológica inalámbrica Vantage Pro2 Davis 6152		Temperatura del aire	Cada 5 min	$\pm 0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$	5.37 m
		Humedad relativa	Cada 5 min	$\pm 2 \%$	1 % a 100 %	5.37 m
		Dirección del viento	Cada 5 min	$3^{\circ}$	$0^{\circ}$ a $360^{\circ}$	5.90 m
		Velocidad del viento	Cada 5 min	$\pm 5 \%$	1 m/s a 80 m/s	5.90 m
Registrador de datos HOBO 11 modelo U12-012		Temperatura del aire	Cada 10 min	$\pm 0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}^{*1}$	$-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$	2.10 m - 2.25 m
		Humedad relativa	Cada 10 min	$\pm 2.5 \%^{*2}$	5 % a 95 %	2.10 m - 2.25 m

Nota. <sup>\*1</sup>Precisión indicada para el rango de medición de  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . <sup>\*2</sup>Precisión para el rango de 10 % a 90 % de humedad relativa.

### 3.2.7.5. Criterios de colocación de puntos de adquisición de datos

Como criterios para la ubicación de la estación meteorológica (punto E, ver Figura 20), se buscó en primer lugar, respetar la normativa consultada, en donde respecto al área de colocación, se busca que mediante la altura y espacios abiertos no se interfiriera con el flujo del viento. También, se prioriza una zona segura, con la finalidad de evitar alguna situación de robo o manipulación del equipo. Como resultado de los criterios anteriores, la estación se localizó en la cubierta de una vivienda habitada, con seguridad, a una altura de 5.37 m, si bien esta altura no corresponde con lo indicado en la normativa, las edificaciones en la unidad de observación no presentan más de dos niveles, además, se cuidó no tener construcciones de altura mayor alrededor de la vivienda que provocaran sombreado en el equipo o interferencias en los flujos de viento.

**Figura 20**

Mapa de ubicación de los puntos de monitoreo



*Nota.* Punto de adquisición de datos, punto E (estación meteorológica) y puntos A y B (registrador de datos). Adaptado de mapa de Google Earth (Google, s/f).

En cuanto a los criterios para la instalación de los puntos de monitoreo a nivel peatón, también se respetó la normativa consultada y se evitó el sombreado del equipo por las construcciones alrededor. En este caso, la altura de los registradores de datos aumentó de entre 10 cm a 25 cm debido a cuestiones de seguridad del equipo, ya que estos estarían lo más cercano posible a las vialidades. Para estos puntos de monitoreo también se consideró la ubicación tanto en una calle con presencia de vegetación (punto B, ver Figura 20), como en una sin vegetación (punto A, ver Figura 20). Asimismo, se había considerado la adquisición de datos en una calle con banquetas pavimentadas y vialidad empedrada debido a que los otros dos puntos no presentaban calles pavimentadas, sin embargo, el equipo fue robado durante la campaña de monitoreo, como se reporta en el apartado de limitaciones de la presente investigación.

#### *3.2.7.6. Prueba piloto*

Previo al proceso de adquisición de datos en la campaña de monitoreo, se realizó una prueba piloto con la estación meteorológica inalámbrica, esta prueba se desarrolló del día 22 al 25 de septiembre (Figura 21). Durante esta prueba se verificó el funcionamiento de la estación

y, además, se confirmó que la estación reportara correctamente los datos para cada variable monitoreada. Para esta primera prueba el sensor de temperatura tenía una alta proximidad a la superficie de la cubierta de la vivienda y la altura total para el equipo no cumplía con los requerimientos indicados por la normativa consultada, por lo que, para el proceso de adquisición de datos, la ubicación se modificó.

**Figura 21**

Instalación de estación meteorológica para la prueba piloto



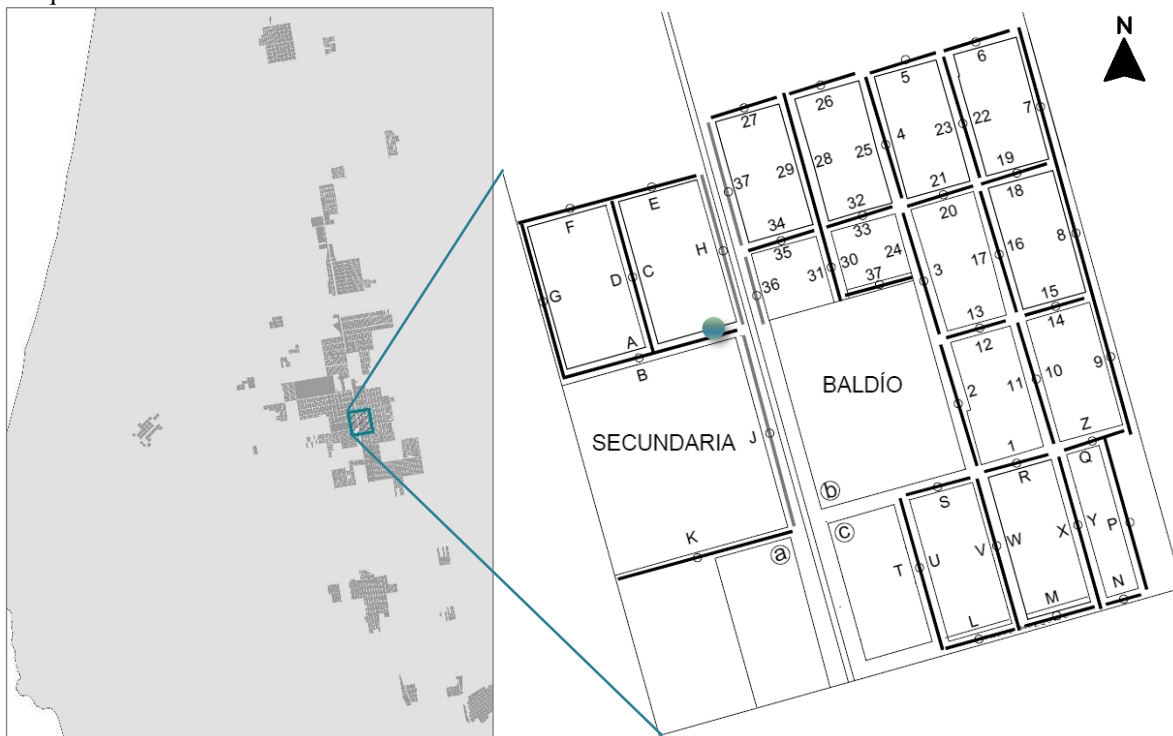
*Nota.* Fotografía de la instalación de la estación para monitoreo durante la prueba piloto en el sitio de estudio. Ver referencia del punto E la Figura 16. La altura indicada hace referencia a la distancia desde el nivel del suelo hasta el equipo.

*3.2.7.7. Adquisición de datos*

a) Levantamiento del sitio de estudio

Para la recolección de datos de la morfología urbana de la unidad de observación se tomaron fotografías de cada calle que integró la unidad a través de una cámara Sony DSC y cámaras de teléfonos móviles. En cuanto a la toma de datos de vialidades que incluyó el ancho de vialidad y de banquetas se utilizó un flexómetro. Los datos de vialidades se corroboraron con mediciones dentro del software Google Earth Pro, así como la altura de los edificios recuperadas de las fotografías tomadas. Para la guía de los transectos de toma de fotografías y medición, previamente se desarrolló un croquis con las vialidades de la unidad de observación numeradas (Figura 22).

**Figura 22**  
Croquis de unidad de observación



*Nota.* A la izquierda mapa del área de estudio. A la derecha croquis con nomenclatura guía de vialidades para el levantamiento de la unidad de observación. Indicación de punto de toma de fotografías termográficas.

Después de la recolección de los datos, dentro del software Sketchup se modeló la unidad de observación, en donde se incluyeron los volúmenes de las construcciones y el arbolado identificado. Este modelo se desarrolló como base para el diseño de los escenarios de propuestas de arbolado que posteriormente, se modelarían para ser evaluados en el software ENVI-met.

También como parte del proceso de recolección de datos en el sitio de estudio, se realizó la toma de fotografías mediante una cámara termográfica compacta FLIR C5, la cual tiene una precisión a temperatura ambiente, en un rango de 15 °C a 35 °C y, temperatura del objeto de 0 °C a 100 °C, de  $\pm 3$  °C. El punto de toma de fotografías se ubica en la Figura 22, en el que se recuperaron datos de una calle empedrada, una banqueta pavimentada y suelo desnudo el día 30 de septiembre a las 9 h 33.

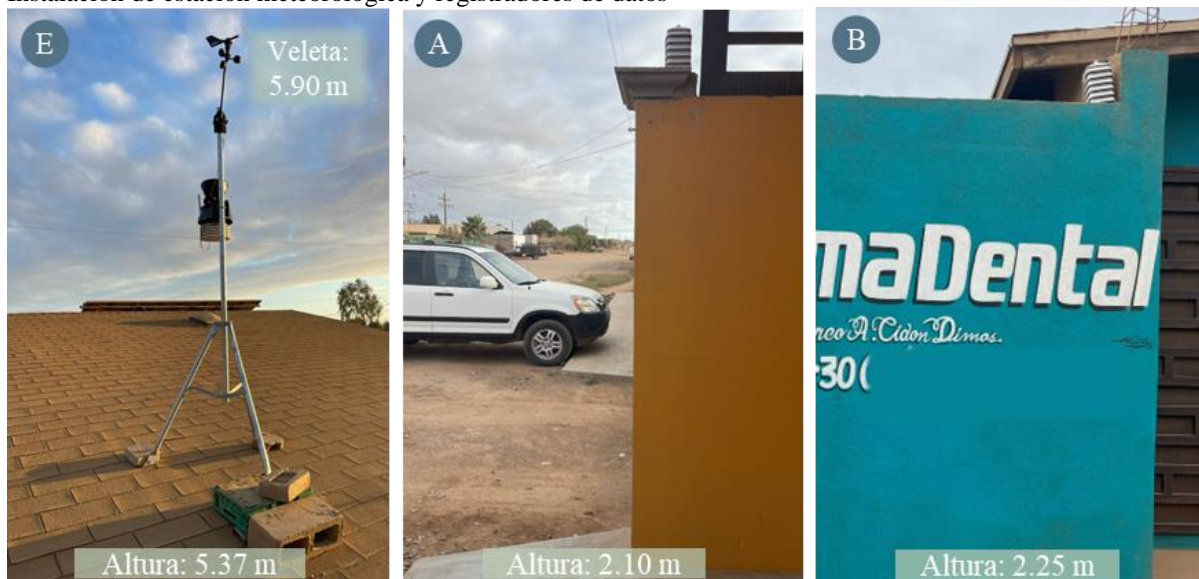
#### b) Monitoreo en sitio

Para la caracterización climática de la unidad de observación se llevó a cabo la recolección de datos de los parámetros de temperatura del aire, humedad relativa y velocidad y dirección del viento a través de la campaña de monitoreo mediante la estación meteorológica

inalámbrica. Los intervalos de tiempo de registro para cada parámetro fueron de 5 minutos (Tabla 20). En cuanto a la altura para los sensores de temperatura y humedad, fue de 1.62 m desde la cubierta y 5.37 m desde el suelo. Para la veleta, la altura total desde el suelo fue de 5.90 m, como se observa en la Figura 23.

**Figura 23**

Instalación de estación meteorológica y registradores de datos



*Nota.* Fotografías de la instalación de equipos para monitoreo en la unidad de observación. Ver referencia de los puntos E, A y B en la Figura 20. La altura indicada de los equipos hace referencia a la distancia desde el nivel del suelo hasta el equipo.

Respecto a los puntos de monitoreo a nivel peatón, la campaña de monitoreo incluyó la recolección de datos para los parámetros de temperatura del aire y humedad relativa en intervalos de tiempo de 10 minutos. Ambos equipos fueron protegidos como lo establece la normativa consultada, con pantallas de plástico protectoras que permiten el flujo del viento hacia el sensor. En este caso, las alturas para los sensores fueron de 2.10 m en el punto A y de 2.25 m en el punto B.

#### 3.2.7.8. Análisis de datos climáticos

Para el análisis de los datos climáticos monitoreados, estos fueron filtrados para la presentación de datos a cada hora. Seguido de esto, se realizaron gráficas de líneas con los datos horarios de temperatura del aire, una para cada punto de monitoreo. A cada una de estas gráficas, se le integraron los datos horarios del día típico de verano antes identificado (16 de agosto), con la finalidad de seleccionar en cada punto de monitoreo, el día con el conjunto de valores que

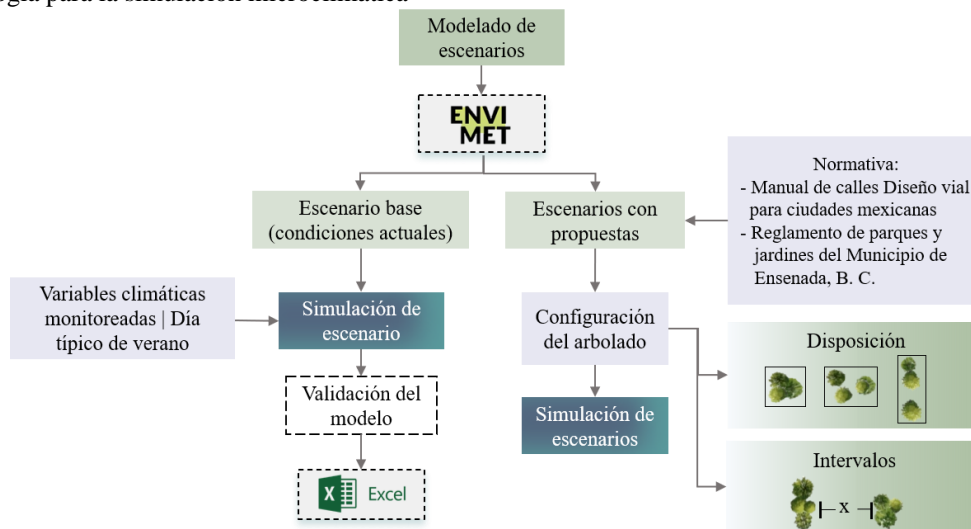
más correspondencia tuviera con el día típico de verano. Una vez identificados estos días, los valores monitoreados serían utilizados para la validación del modelo base en el software ENVI-met, lo anterior, al realizar un análisis de correlación entre los valores de temperatura de aire monitoreados y resultados para esta variable de la simulación del escenario base.

### 3.2.8. Procedimiento experimental

Para la etapa experimental de la investigación, se desarrolló la simulación microclimática en la unidad de observación con la integración de propuestas para la reducción de TST. El procedimiento inició con el modelado del escenario base previamente digitalizado como parte de la unidad de observación, ahora, dentro del software ENVI-met. Como parte del diseño de escenarios, se realizó la selección de especie de arbolado que se integró en la unidad de observación, esto como parte de las estrategias de infraestructura verde para evaluar el efecto de enfriamiento de la TST.

Una vez seleccionada la especie de arbolado, los escenarios a simular integraron tanto las condiciones actuales de la unidad de observación, como las de propuestas. En cuanto a los escenarios con propuestas de configuración de arbolado, se integraron variaciones de disposición (dispersa, intercalada y agrupada) e intervalos entre los elementos, como se indica en la Figura 24, manteniendo el mismo porcentaje de cobertura vegetal en todos los casos.

**Figura 24**  
Metodología para la simulación microclimática



*Nota.* Diagrama de la metodología de la investigación que incluye las actividades para el desarrollo de las simulaciones microclimáticas.

Para la validación del escenario base se recuperaron los valores resultantes del análisis de la campaña de monitoreo en cada uno de los puntos. Una vez generada la simulación de este modelo, con una duración de 24 h, mediante un análisis estadístico realizado en el software Excel, se validaron los datos de temperatura del aire del cálculo de las métricas RMSE y MAE, el coeficiente  $R^2$  y el índice d, como se ha sugerido en investigaciones previas (Liu et al., 2021).

#### *3.2.8.1. Objetivo*

Esta etapa del experimento está relacionada con el objetivo específico 2 de la investigación, en el cual se pretende determinar el valor de disminución de la TST de cada una de las configuraciones de arbolado a simular. Lo anterior, guiado a responder la pregunta de investigación planteada.

#### *3.2.8.2. Diseño de escenarios*

Previamente, en el levantamiento del sitio de estudio, se realizó el modelado 3D dentro del software Sketchup para la conformación del escenario con las condiciones actuales de la unidad de observación. En este caso, el área de modelado para ENVI-met se redujo y se dividió en dos cañones urbanos que conformaron los escenarios base, esto, debido a la capacidad del equipo a utilizar para la simulación.

Los criterios para seleccionar las manzanas a modelar en cada cañón urbano (Base A (BA) y Base B (BB)) (Figura 25) fueron, la presencia de los puntos de monitoreo a nivel peatón, esto debido a que los datos obtenidos servirían para la validación de los modelos y, en uno de los casos, la cercanía con la vialidad principal debido a que presenta un tipo de superficie que no se identifica en otro sitio de la unidad de observación. Ambos cañones mantienen en su mayoría, un tipo de uso de suelo habitacional y en mejor medida comercial.

**Figura 25**  
Cañones urbanos de la unidad de observación modelados



*Nota.* Croquis de la unidad de observación con la indicación de los cañones urbanos modelados dentro del software ENVI-met (BB y BA) y fotografías de estos últimos.

Respecto a los criterios para la selección de la especie de arbolado urbano que se integró en las propuestas de escenarios, estos fueron definidos tomando como referencia una guía que provee criterios basados en la literatura para la integración de árboles en las calles urbanas que se adapten al clima y condiciones del entorno urbano (Mehdipour et al., 2023). En la Tabla 21 se integran los criterios de selección. Se anexaron criterios como el sitio apropiado para plantar, presencia en la unidad de observación, la provisión de sombra, el tipo de hoja y tipo de suelo, aunque los autores consideraron algunos de estos solo como un dato descriptivo de la especie, para el objetivo de esta investigación tienen mayor importancia para la apropiada selección de la especie.

**Tabla 21**

Criterios para la selección de arbolado urbano

Criterio	Descripción
Tolerancia a la sequía	Capacidad de las especies para soportar períodos secos prolongados, principalmente durante el verano.
Tolerancia a los vientos	Capacidad para soportar condiciones de viento severas.
Tolerancia a la salinidad	Capacidad de las especies para soportar ciertos niveles de sal en el agua del suelo.
Potencial de malezas	Especies que invaden comunidades o ecosistemas nativos, causando modificaciones importantes en la riqueza, abundancia o función del ecosistema de especies.
Sitios apropiados para plantar	Sitios recomendados para el desarrollo óptimo de la especie considerando además que ésta no afecte el entorno urbano como banquetas.
Presencia en la unidad de observación	Define si la especie se encuentra o no actualmente, dentro de la unidad de observación.
Provisión de sombra	Cantidad de sombra proporcionada por el árbol en su madurez.
Tipo de hoja	Especies con follaje estacional (caduca) o durante todo el año (pereene).
Tipo de suelo	Preferencia del tipo de suelo para el correcto desarrollo de la especie.

*Nota.* Adaptado y modificado de “*Multi-criteria Street Tree Selection SA EI-2023 + Tool*” por Mehdipour et al. (2023).

Para la selección de especies a analizar en base a los criterios establecidos se identificaron las especies arbóreas presentes en la unidad de observación, así como aquellas descritas en la literatura que pertenecen al tipo de clima característico de San Quintín excluyendo especies punzo cortantes, venenosas o tóxicas, esto último respondiendo a lo estipulado en el Reglamento de parques y jardines del Municipio de Ensenada, Baja California (Ayuntamiento de Ensenada, 2008). Para lo anterior, se recurrió al levantamiento fotográfico realizado en la unidad de observación y se utilizó la plataforma web EnclicoVida de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, s/f-a) para definir el nombre de las especies identificadas. También, se consultó el libro de los autores Delgado et al. (2021) donde se integran especies de árboles nativos que se encuentran en Baja California. Una vez conformada la base de datos (ver Tabla A1.1 en Apéndice 1), se analizaron las especies por criterio (Tabla A1.2 en Apéndice 1) y se seleccionó aquella que cumpliera con un mayor número de criterios, siendo ésta definida como *Tecoma stans* o Tronadora. La ficha técnica del árbol *Tecoma stans* se incluye en la Tabla A1.3 del Apéndice 1.

### 3.2.8.3. Modelado

#### a) Escenarios base

Las condiciones de los escenarios base fueron caracterizadas por los resultados de la recolección de datos de la morfología urbana de la unidad de observación. En la Figura 26 se integra una visualización previa de los escenarios BA y BB que fueron modeladas dentro del software Sketchup. Se observa la vegetación presente en cada sección de la unidad de observación, así como la geometría de las edificaciones.

**Figura 26**

Diseño de los escenarios BA y BB



*Nota.* Modelos 3D generados en el software Sketchup del diseño de los escenarios base BA (a) y BB (b) con las condiciones morfológicas actuales de la unidad de observación. A la izquierda, vista 3D en perspectiva y a la derecha, vista en planta.

### b) Escenarios con propuestas

Los escenarios con la integración de propuestas de configuración de arbolado, fueron en total seis, conformados por tres tipos distintos de configuración para cada escenario base. Para estos escenarios, el arbolado fue localizado en las calles al nivel de banqueta, esto, en las vialidades donde el ancho de calle lo permitía (ver en Tabla 22) según lo establecido en el manual para el diseño vial de la Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (SEDATU) (s/f).

**Tabla 22**  
Especificaciones de las calles intervenidas de los cañones BA y BB

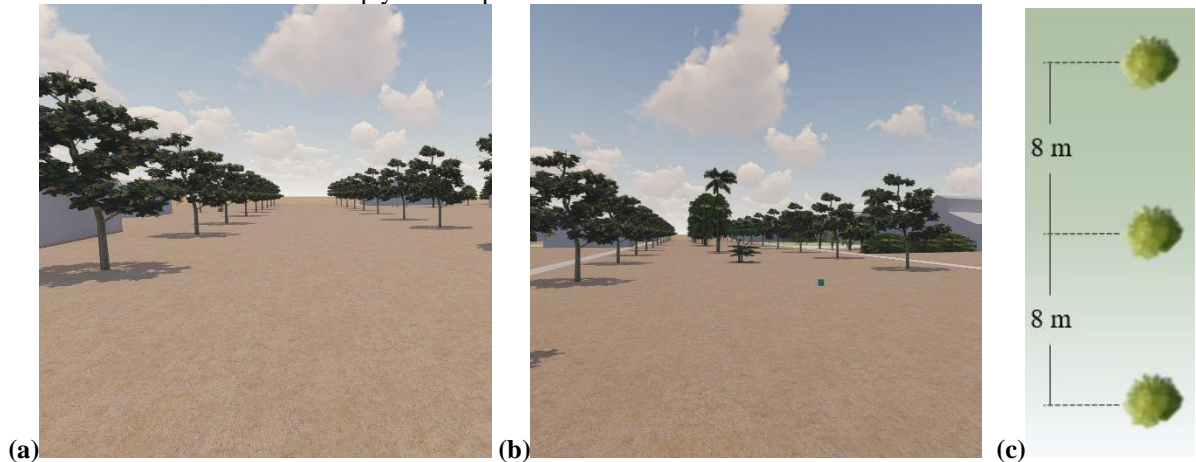
Cañón	Calle	Ancho de calle (m)	Banquetas intervenidas, orientación
BA	Calle 2	16.63	2, este
	Calle 11-10*	20.47	11, oeste y 10, este
	Calle 1-R	18.92	1, norte
	Calle Z-Q	16.40	Z, norte
BB	Calle 29-28*	20	29, oeste y 28, este
	Calle 25-4	16.30	25, oeste
	Calle 32-33	14.40	32, norte

*Nota.* Ver referencia de nombre de calles en Figura 22. \*Ubicación de cañones urbanos analizados.

Para la primera propuesta de configuración de arbolado urbano, se estableció un escenario con patrón de plantación de árboles dispersos (Disp) al nivel de las banquetas como se muestra en la Figura 27. El espacio entre elementos se definió de 8 m a partir del eje de los troncos, lo anterior, debido a que en la literatura consultada (Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI), s/f) se recomienda un espaciado de 12 m entre cada árbol de la especie *Tecoma stans* y, para ésta misma, la fronda máxima definida por el autor se define de 6 m, sin embargo la dimensión de fronda utilizada en la presente investigación es de 3 m, considerando que la altura total del árbol propuesta fue de 5 m a manera de evitar su interferencia con el cableado eléctrico aéreo presente en la unidad de observación, por lo anterior, el espaciado entre elementos se redujo 4 m. El total de arbolado incluido en cada escenario fue de 67 elementos debido a la separación antes definida entre elementos.

**Figura 27**

Diseño de los escenarios BA-Disp y BB-Disp

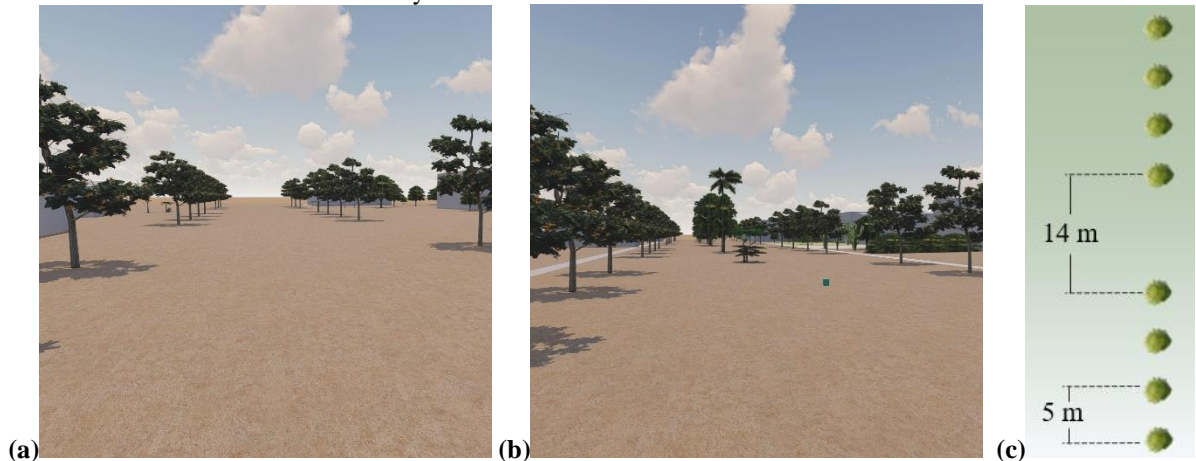


*Nota.* (a) Modelo 3D del diseño del escenario Disp en el cañón BA. (b) Modelo 3D del diseño del escenario Disp en el cañón BB. (c) Representación de la configuración de arbolado del escenario, las dimensiones indicadas son a partir de los troncos.

En cuanto a la segunda propuesta de configuración, el patrón de plantación incluye árboles alineados intercalados (Alin int) al nivel de las banquetas. Las alineaciones de arbolado se conforman por cuatro elementos separados por 5 m entre troncos y, entre las alineaciones se presenta un intervalo de 14 m, esto como resultado de distribuir la misma cantidad de arbolado (67) que en los escenarios anteriores (BA-Disp y BB-Disp). En la Figura 28 se muestra el modelo 3D generado en Sketchup para este escenario.

**Figura 28**

Diseño de los escenarios BA-Alin int y BB-Alin int

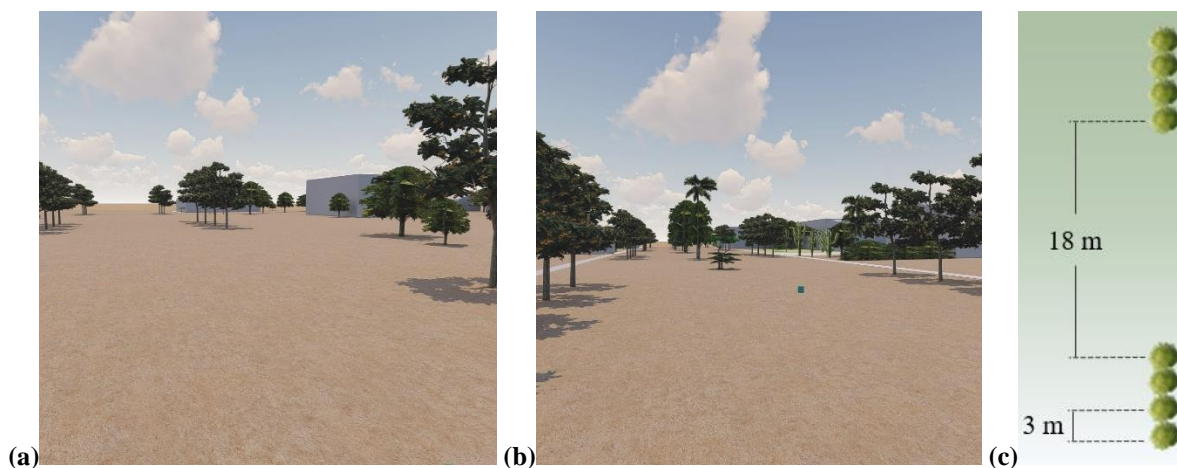


*Nota.* (a) Modelo 3D del diseño del escenario Alin int en el cañón BA. (b) Modelo 3D del diseño del escenario Alin int en el cañón BB. (c) Representación de la configuración de arbolado del escenario, las dimensiones indicadas son a partir de los troncos.

Por último, en la tercera propuesta de configuración, el patrón de plantación se compone por árboles agrupados intercalados (Agr int) al nivel de las banquetas (Figura 29). Cada agrupación de arbolado incluye cuatro elementos separados por 3 m entre troncos y, entre las agrupaciones se presenta un intervalo de 18 m, esto a fin de mantener la misma cantidad de cobertura vegetal que los escenarios anteriores. Si bien, en la literatura se ha descrito la configuración agrupada como más de una hilera de arbolado paralelas, en este caso, el ancho de calle disponible no permite la implementación de banquetas con las dimensiones suficientes para generar este tipo de arreglo. Para solucionar lo anterior, el espaciado de 3 m entre elementos propuestos, genera que las copas de los árboles se unan evitando espaciado entre ellas, lo que propicia la conformación de agrupaciones.

**Figura 29**

Diseño de los escenarios BA-Agr int y BB-Agr int



*Nota.* (a) Modelo 3D del diseño del escenario Agr int en el cañón BA. (b) Modelo 3D del diseño del escenario Agr int en el cañón BB. (c) Representación de la configuración de arbolado del escenario, las dimensiones indicadas son a partir de los troncos.

#### 3.2.8.4. Configuración de los modelos BA y BB (módulo Spaces)

Dentro del software ENVI-met, para la configuración de dominios del modelo, se ingresaron los datos de ubicación de la unidad de observación, con las coordenadas latitud 30.52 N y longitud 115.92 W. En el caso del área de modelado se definió una cuadrícula de 194,400 m<sup>2</sup>, esto, respetando la recomendación del software de dejar al menos 5 m libres alrededor del perímetro del área a modelar. Para la altura, se siguió la recomendación de que el eje z al menos doblara la dimensión del elemento más alto dentro del modelo, en este caso, un

árbol de 9 m de altura presente en ambos modelos. Las especificaciones de la configuración se integran en la Tabla 23.

**Tabla 23**  
Configuración de los modelos BA y BB

Elemento	Dato
Ubicación del modelo	
○ Nombre	22930 Lázaro Cárdenas, Baja California, México
○ Posición	Latitud 30.52 N Longitud 115.92 W
Geometría del modelo	
○ Unidades eje x	200
○ Unidades eje y	165
○ Unidades eje z	20
○ Dimensiones por unidad (m)	x = 1, y = 1, z = 1
○ Rotación del norte	-15

*Nota.* Datos de configuración de los modelos BA y BB ingresados dentro del módulo *Spaces* en ENVI-met.

#### a) Suelo y superficie

El tipo de suelo que se incluyó para todas aquellas zonas que presentaban suelos desnudos fue arcilloso, en base a la información adquirida del área de estudio a través del mapa de edafología de México (INEGI, s/f-c). En el caso de las áreas que contaban con banquetas o pisos exteriores con concreto, se caracterizaron con la superficie *concrete pavement gray* (pavimento de concreto gris). Por último, para la carretera se utilizó la superficie *asphalt road* (camino asfaltado). También, se caracterizaron las superficies con césped, lo anterior, utilizando de la base de datos de ENVI-met la planta de tipo *grass 25 cm aver. dense* (césped de 25 cm denso), a la cual se le ajustó el albedo con un valor de 0.26 y la emisividad con un valor de 0.95 (Oke, 2002). Los valores de rugosidad, albedo y emisividad de las superficies empleadas se incluyen en la Tabla 24.

**Tabla 24**  
Especificaciones de suelos y superficies de los modelos BA y BB

	<i>Loamy soil</i> (suelo arcilloso)	<i>Concrete pavement gray</i> (pavimento de concreto gris)	<i>Asphalt road</i> (camino asfaltado)	<i>Grass 25 cm aver. dense</i> (césped de 25 cm denso)
Longitud de rugosidad	0.015	0.010	0.010	-
Albedo	0.400	0.350	0.150	0.260
Emisividad	0.900	0.900	0.950	0.950

*Nota.* Especificaciones de la base de datos de ENVI-met sobre suelos y superficies utilizados en la simulación. Valores de albedo y emisividad ajustados mediante información consultada de los autores Oke (2002), Rosas & García (2014) y Haber & Bencsik (2018).

### b) Edificios

Para el modelado de los edificios dentro de ENVI-met se utilizó el modelo 3D previamente realizado en Sketchup como resultado del levantamiento del entorno construido de la unidad de observación. En cuanto a los materiales se identificó que las construcciones estaban compuestas en mayor medida de block de concreto y techos de madera impermeabilizados. Por lo anterior, el material para paredes se definió como *Concrete wall (hollow block)* caracterizado como un muro de concreto con bloque hueco y, para techos se utilizó *Default Wall - (moderate insulation)* correspondiente a una cubierta predeterminada con aislamiento moderado.

**Tabla 25**

Especificaciones de materiales en edificaciones de los modelos BA y BB

	<i>Concrete wall (bloque hueco) con acabado en pintura color claro.</i>	<i>Concrete wall (bloque hueco) con acabado en pintura color oscuro.</i>	<i>Default Wall - (moderate insulation) (cubierta predeterminada con aislamiento moderado)</i>
Longitud de rugosidad	0.020	0.020	0.020
Albedo	0.500	0.200	0.200
Emisividad	0.850	0.850	0.850

*Nota.* Especificaciones de la base de datos de ENVI-met sobre materiales para las edificaciones utilizados en la simulación. Valores de albedo y emisividad ajustados mediante información consultada de los autores Oke (2002), Rosas & García (2014) y Haber & Bencsik (2018).

### c) Vegetación

En el caso de la vegetación, debido a que los escenarios Base A (BA) y Base B (BB) modelados se caracterizan por las condiciones actuales de la unidad de observación, se introdujo a la base de datos del proyecto dentro de ENVI-met, mediante la herramienta *Albero*, la vegetación identificada en la unidad de observación durante el levantamiento del sitio. Se definieron principalmente los parámetros de tipo de hoja (hoja caduca u hoja conífera) y las dimensiones de altura y ancho para cada elemento. En total, se ingresaron a la base de datos sesenta y cuatro árboles y veinticuatro palmeras para el cañón BA (ver Tabla A2.1 en Apéndice 2) y sesenta y un árboles, sesenta y siete palmeras y un pino para el cañón BB (ver Tabla A2.2 en Apéndice 2). Para la ubicación de los elementos dentro del modelo se utilizó el levantamiento previamente modelado en Sketchup, siguiendo el redondeo en las distancias previamente explicado en la sección de Edificios.

d) *Receptores*

Los receptores dentro de la geometría son puntos en los cuales se monitorean los procesos de la atmósfera y el suelo durante la simulación y otorgan los valores de salida de cada variable para su posterior análisis. En total, cuatro receptores fueron integrados a cada escenario, la ubicación de estos puntos dentro de los cañones BA y BB, y que se replicarían en cada escenario de propuesta, se establecieron según distintos criterios, tres de ellos basados en la posición del arbolado que sería integrado en los escenarios de propuesta (ver en Figura 30).

**Figura 30**

Ubicación y especificaciones de receptores para los modelos BA y BB



*Nota.* Ubicación, especificaciones y vista 3D de los receptores dentro de los modelos BA (a) y BB (b). La vista 3D se representa con el escenario de propuesta Alin int para cada cañón, esto con el objetivo de visualizar la posición de los receptores respecto al arbolado. La posición cercana a árbol hace referencia a una distancia de entre 3 m y 7 m entre el receptor y el árbol. La ubicación y especificaciones indicadas se replicaron en los escenarios de propuesta de cada cañón (Disp, Alin int y Agr int).

El primer receptor (R1) se colocó en el sitio correspondiente al registrador de datos A (para el modelo BA) y B (para el modelo BB) de la campaña de monitoreo, los cuales se encuentran contiguos a una edificación. El segundo receptor (R2) se posicionó al centro del

cañón tomando como referencia el ancho de calle, esto con el objetivo de que, en los escenarios de propuestas, el R2 se encuentre entre el arbolado ubicado a los costados en las banquetas. En el caso del tercer receptor (R3) se integró de manera que quedara a máximo 7 m de distancia de uno de los árboles integrados en los escenarios de propuestas, quedando el más cercano a 3 m. Por último, el cuarto receptor (R4) se posicionó debajo de la sombra de un árbol, habiendo una excepción en el escenario BA, esto debido a que las condiciones actuales de esta sección en la unidad de observación, no presenta arbolado en el cañón.

### 3.2.8.5. Configuración general y de condiciones meteorológicas (módulo ENVIguide)

Dentro del módulo *ENVIguide* de ENVI-met se generaron los archivos de tipo SIMX con la información de configuración general y de condiciones meteorológicas para la simulación de los escenarios BA y BB (Tabla 26). Dentro de la configuración general se establecieron los datos de fecha de inicio, hora de inicio y el tiempo total de la simulación, también, se generó el vínculo con los archivos de los modelos generados en el módulo *Spaces* y la carpeta de salida para los resultados.

**Tabla 26**  
Configuración de la simulación de los modelos BA y BB

Elemento	Dato	Especificaciones
Configuración general		
○ Fecha de inicio (AAAA/MM/DD)	2023/10/05	
○ Hora de inicio (HH:MM)	00:00	
○ Tiempo total de simulación (h)	24	
Meteorología – <i>Full Forcing</i>		
○ Forzar viento	No	Constante de velocidad: 1.08 m/s Constante de dirección: 0.00 °
○ Forzar temperatura	Si	
○ Forzar radiación/nubes	No	Nubes bajas: 0 Nubes medias: 0 Nubes altas: 0
○ Formar humedad relativa	Si	
○ Forzar precipitación	No	

*Nota.* Datos de configuración general y de condiciones meteorológicas ingresados en el módulo *ENVIguide* para la simulación de los modelos BA y BB. Esta configuración de simulación fue utilizada en todos los escenarios simulados.

En el caso de las condiciones meteorológicas, se seleccionó la opción de *Full Forcing*, para la cual, se ingresaron los datos monitoreados el día 5 de octubre de 2023 (seleccionado con

base en el día típico de verano) a través de un archivo tipo FOX generado mediante la herramienta *Forcing Manager* de ENVI-met. Aquí, se forzaron las variables de temperatura y humedad y, para la variable de viento, se definieron valores constantes obtenidos al calcular la media de las velocidades monitoreadas durante el 5 de octubre de 2023 (1.08 m/s) y la moda de las direcciones de viento para el mismo día (norte). Por otro lado, para variable de radiación/nubes, se asignaron los valores de un día despejado (ver en Tabla 26). Las configuraciones descritas en este subtema fueron la mismas para los demás escenarios de propuesta simulados.

### 3.2.8.6. Configuración de cañones con propuestas

Para los escenarios con propuestas de arbolado (Disp, Alin int y Agr int), se utilizaron como base los modelos BA y BB previamente desarrollados y validados. En este caso, el modelado de los seis escenarios dentro del módulo *Spaces*, incluyó la integración de la especie de arbolado *Tecoma Stans* con la configuración de plantación correspondiente. La caracterización del modelo de la especie se desarrolló a través de la herramienta *Albero* (Tabla 27) al modificar un elemento de la base de datos del programa.

**Tabla 27**  
Especificaciones de la especie *Tecoma Stans*

Elemento	Dato
Altura	5 m
Ancho de copa	3 m
Especie	Caduca*
Tipo de copa	Cilíndrica
Tronco	Mediano
LAD	1
LAI	3
Calendario de árbol: factor de hoja estacional de octubre	1 (hojas completas)

*Nota.* Valores del perfil de la especie *Tecoma Stans* integrados a la base de datos de ENVI-met mediante la herramienta *Albero*. \*Si bien la configuración se define como caduca, el calendario de árbol se modificó como se indica en la tabla. LAD = densidad de área foliar. LAI = índice de área foliar.

Una vez integrada la vegetación correspondiente en cada escenario de propuesta, el incremento de cobertura vegetal fue de 5.74 % para todos los casos. Los porcentajes correspondientes de cobertura del suelo, para cada tipo de superficie, se integran en la Tabla 28.

**Tabla 28**

Descripción de cobertura de suelo de cada escenario

Cañón	Escenario	Superficie impermeable (%)	Suelos desnudos (%)	Cobertura vegetal (%)
BA	BA	13.97	65.48	20.55
	BA-Disp	13.97	59.74	26.29
	BA-Alin int	13.97	59.74	26.29
	BA-Agr int	13.97	59.74	26.29
BB	BB	23.45	56.88	19.67
	BB-Disp	23.45	51.13	25.41
	BB-Alin int	23.45	51.13	25.41
	BB-Agr int	23.45	51.13	25.41

*Nota.* La superficie permeable incluye edificaciones, banquetas y superficies con asfalto.

Para el posicionamiento de receptores, la configuración general y de condiciones meteorológicas en el módulo *ENVI-guide*, de los escenarios con propuestas, se utilizaron las mismas especificaciones que en los escenarios BA y BB.

### 3.2.9. Análisis de datos de escenarios experimentales

#### 3.2.9.1. Método estadístico del análisis

Para la validación de los modelos, se tomaron los datos de los receptores colocados en cada escenario base (BA y BB) a la altura de 2.5 m, lo anterior, debido a que fue la altura más próxima, en los resultados arrojados por ENVI-met, a la de los registradores de datos instalados en la campaña de monitoreo (2.10 m y 2.25 m, ver en Figura 23). La variable utilizada para la validación fue la temperatura del aire ( $T_{air}$ ), como se ha realizado con anterioridad según la revisión de la literatura, utilizando los valores por hora desde la 1 h 00 hasta las 23 h 00. El proceso de validación se llevó a cabo al realizar un análisis de correlación a través de las métricas de RMSE, MAE,  $R^2$  y  $d$ , indicadas en la Tabla 29, utilizando el software Excel para el cálculo de cada una de ellas, así como para la representación gráfica de los resultados a través de gráficas de líneas.

**Tabla 29**

Especificaciones de las métricas estadísticas utilizadas para la validación

Métricas	Fórmula	Objetivo	Fuente (autor y año)
Raíz del error cuadrático medio (RMSE*)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - E_i)^2}{n}}$	El valor es siempre positivo y disminuye a medida que disminuye el error de las previsiones; cuanto más se acerquen los valores pronosticados a los reales, menor será el RMSE.	Automateexcel, (2022)
Error absoluto medio (MAE*)	$MAE = \frac{1}{n} \sum  y_{yo} - x_{yo} $	Cuanto menor sea el valor del MAE, mejor podrá ajustarse un modelo a un conjunto de datos.	Bobbitt, (2021)
Coefficiente de correlación R <sup>2</sup>	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (\hat{Y}_t - \bar{Y})^2}{\sum_{t=1}^T (Y_t - \bar{Y})^2}$	El valor oscila entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor será el ajuste del modelo a la variable que estamos intentando explicar.	López, (2017)
Índice de concordancia d	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - \bar{O}  +  O_i - \bar{O} )^2}$	El valor va de 0 a 1, donde 1 significa una coincidencia perfecta entre las predicciones del modelo y los datos observados.	AgriMetSoft, (2019)

*Nota.* El objetivo indica los valores deseables para los resultados obtenidos en la validación. \*Por sus siglas en inglés.

En cuanto al análisis de los resultados de TST de las simulaciones microclimáticas se utilizó la estadística descriptiva a través de la identificación de los valores mínimos, máximos y el cálculo de la media y rangos de los datos obtenidos.

### 3.2.9.2. Tratamiento de la información


Para el tratamiento de los resultados de TST, en primer lugar, se generaron tablas, integrando por escenario, los resultados horarios de los cuatro receptores colocados, con la finalidad de identificar en qué sitios se presentaron los valores menores de TST durante las horas críticas del día. A partir de la identificación de los horarios críticos de TST se generaron también, mapas de isotermas por escenario con la información de TST a través del módulo *Leonardo* de ENVI-met.

Después, a manera de caracterizar el ambiente térmico en cuanto a la Tair de cada uno de los escenarios, se realizaron diagramas de cajas en donde se presentaron los resultados por cada receptor. En cuanto a la TST, para la comparación entre escenarios, se recuperaron los valores resultantes por receptor, de cada uno de los cuatro escenarios por cañón (BA y BB). Con esta información, se generaron tablas con los datos horarios obtenidos por el receptor, ubicando así, el escenario con el mejor efecto de enfriamiento.

### *3.2.9.3. Análisis de la información*

Para la interpretación de los resultados obtenidos y los gráficos generados, como primer punto, se analizaron los escenarios individualmente. Lo anterior, al analizar los horarios críticos en cada receptor por escenario, identificando los sitios donde se presentaron menores valores de TST, para posteriormente, mediante los mapas de isotermas de TST, visualizar la distribución de temperaturas y analizar qué factores de la geometría del cañón influyeron en las mismas.

Como segundo punto, se realizó el análisis comparativo entre escenarios, partiendo de los resultados obtenidos por receptor. Esto fue posible al visualizar a través de tablas los valores horarios registrados en el receptor de cada uno de los escenarios. Comparando las horas del día más críticas de cada escenario, se identificó el valor máximo de los escenarios base (BA y BB) y el efecto de enfriamiento obtenido para esta misma hora en los demás escenarios (Disp, Alin int y Agr int). También se analizaron las diferencias en cuanto a la oscilación de TST durante el día para cada escenario. El análisis antes descrito, permitió identificar la configuración de vegetación que con el mejor efecto de enfriamiento para cada cañón.



**CAPÍTULO 4. RESULTADOS**

## 4. Resultados

### 4.1. Relación entre la TST y el uso de suelo/cobertura de suelo

El objetivo específico uno indica establecer la relación espacio-temporal entre la TST y el uso de suelo/cobertura de suelo en San Quintín, B. C. a través del análisis de imágenes satelitales. Además, a través del cumplimiento de este objetivo se generó el análisis para la selección de la unidad de observación.

#### 4.1.1. *Cálculo de TST e Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada*

Mediante el cálculo de TST en el área de estudio, se obtuvieron seis mapas durante el periodo cálido para San Quintín, correspondientes al periodo de estudio del año 2018 al 2023. Los mapas para estos resultados se integran en el Apéndice 3. Los resultados obtenidos en los mapas térmicos, respecto a la variable dependiente de TST, muestran cómo en los últimos años, tanto el límite inferior como superior de TST han incrementado entre 6.62 °C y 8.47 °C del año 2018 al 2023. Dentro de los mapas, se puede apreciar una mayor tonalidad rojiza hacia el centro de la imagen, que corresponde a la zona urbana. En cuanto a las tonalidades azules estas indican zonas con cuerpos de agua y zonas agrícolas, estas últimas, pueden presentar menor temperatura debido al sistema de irrigación de los campos.

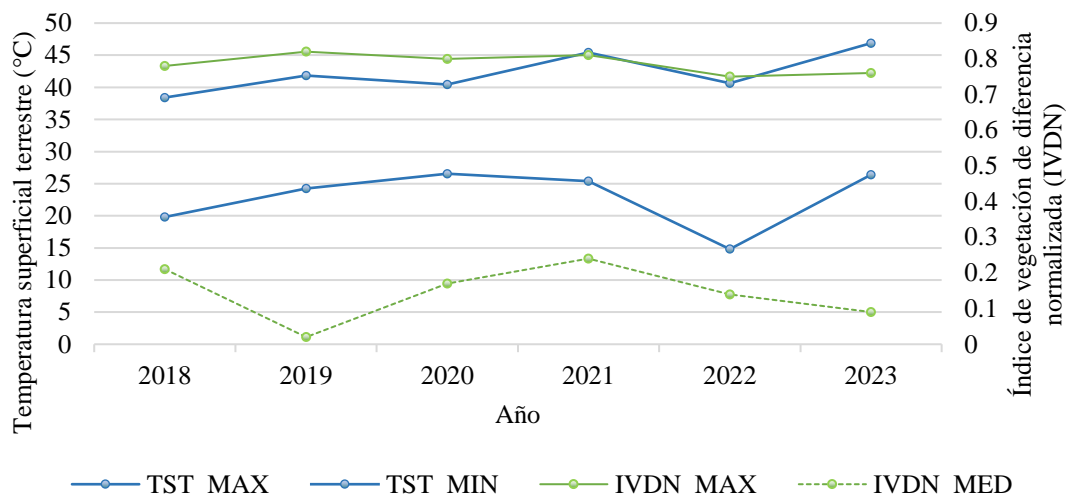
En cuanto al cálculo del IVDN (Apéndice 4), el indicador de vegetación en el rango medio disminuyó de 0.21 a 0.09 en el periodo de tiempo analizado. Se puede observar en la mayor parte de los mapas como los resultados de IVDN se mantienen con tonalidades del rango medio, esto se debe a que el IVDN identifica, con la diferencia de la reflectividad de ondas del espectro electromagnético rojo y del infrarrojo cercano, el verdor de la superficie y se refleja en valores positivos del índice del 0.20 al 1.00 y, en el caso de San Quintín el tipo de vegetación que predomina es desértica, por lo que una disminución de rango medio proporciona información sobre la pérdida de cobertura vegetal y los valores cercanos al 1 estarían más relacionados al uso de suelo agrícola.

En la Figura 31, se integran los datos de los mapas de resultados generados y, se puede observar que la temperatura superficial ha incrementado en los últimos años. Por otro lado, en el caso del IVDN nos indica un descenso en los últimos dos años, en el valor medio (IVDN\_MED) de 0.15 y en el máximo (IVDN\_MAX) de 0.05. El gráfico también indica que,

en aquellos años donde la TST aumenta, los niveles medios de IVDN disminuyen, indicando una correlación inversa entre las dos variables.

**Figura 31**

Relación entre la TST y el IVDN del polígono del área de estudio analizada

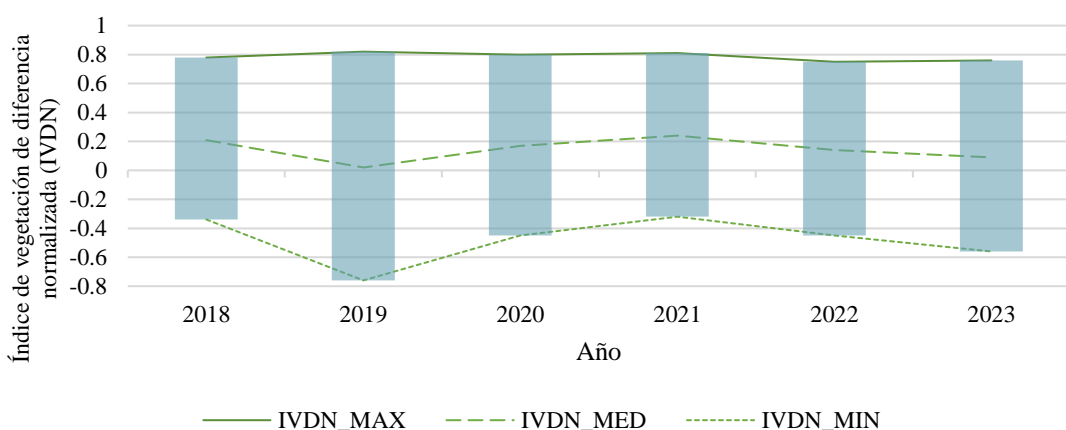


*Nota.* Gráfico de líneas que indica los valores máximos (MAX) y mínimos (MIN) resultantes para la TST y los valores MAX y medios (MED) del IVDN, en el periodo de estudio 2018-2023.

En el caso del año 2019 se observa una caída del IVDN\_MED e IVDN\_MIN (Figura 32) de 0.21 a 0.02 y de -0.34 a -0.76 respectivamente, sin embargo, el valor del IVDN\_MAX incrementó 0.04, lo anterior, no podría estar relacionado con la pérdida de vegetación (identificada del 0.20 al 1.00 del índice) si no que, con la disminución de los valores en los pixeles de los cuerpos de agua que tienen lugar en el área de estudio.

**Figura 32**

Resultados para el IVDN del polígono del área de estudio analizada



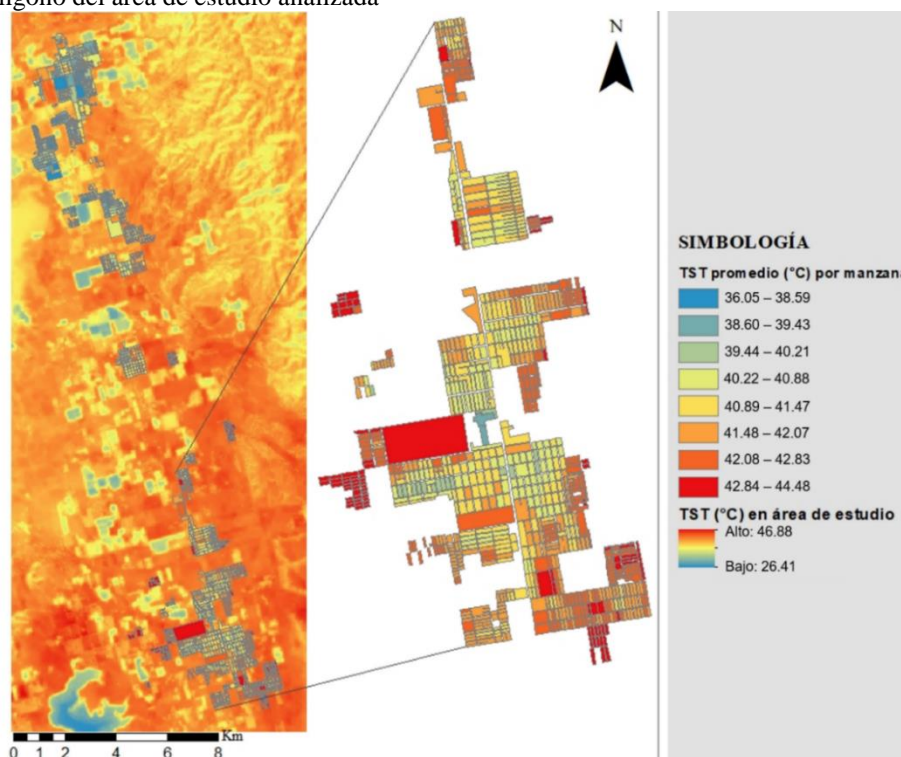
*Nota.* Gráfico de líneas que indica los valores máximos (MAX), medios (MED) y mínimos (MIN) resultantes para el IVDN en el periodo de estudio 2018-2023.

Se identificó también que, el nivel de IVDN\_MAX se mantiene relativamente constante, sin sobrepasar de 0.82 ni disminuir de 0.75 durante los 5 años y esto podría deberse a que este índice identifica las zonas agrícolas, que reflejan en mayor medida en el infrarrojo cercano debido al alto contenido de clorofila, en el rango máximo y ese tipo de uso de suelo no suele ser tan cambiante en periodos cortos de tiempo, como los 5 años que se analizaron. En el caso del IVDN\_MED relacionado con la presencia de vegetación, la mayor disminución se identificó del año 2020 al 2021 con 0.10.

#### 4.1.2. Selección de la unidad de observación

Respecto a la selección de la unidad de observación, en donde se incluye el análisis de TST por manzanas para el año 2023, los resultados se presentan en el mapa integrado en la Figura 33, en donde se observa que la mayoría de las manzanas con valores altos de TST se ubican al sur del área analizada, por lo que se genera un acercamiento a la zona. El valor máximo de TST en esta zona es de 44.98 °C y corresponde a suelos desnudos y el mínimo de 36.05 °C que corresponde a una zona arbolada propiedad del 67 Batallón de Infantería.

**Figura 33**  
TST en el polígono del área de estudio analizada

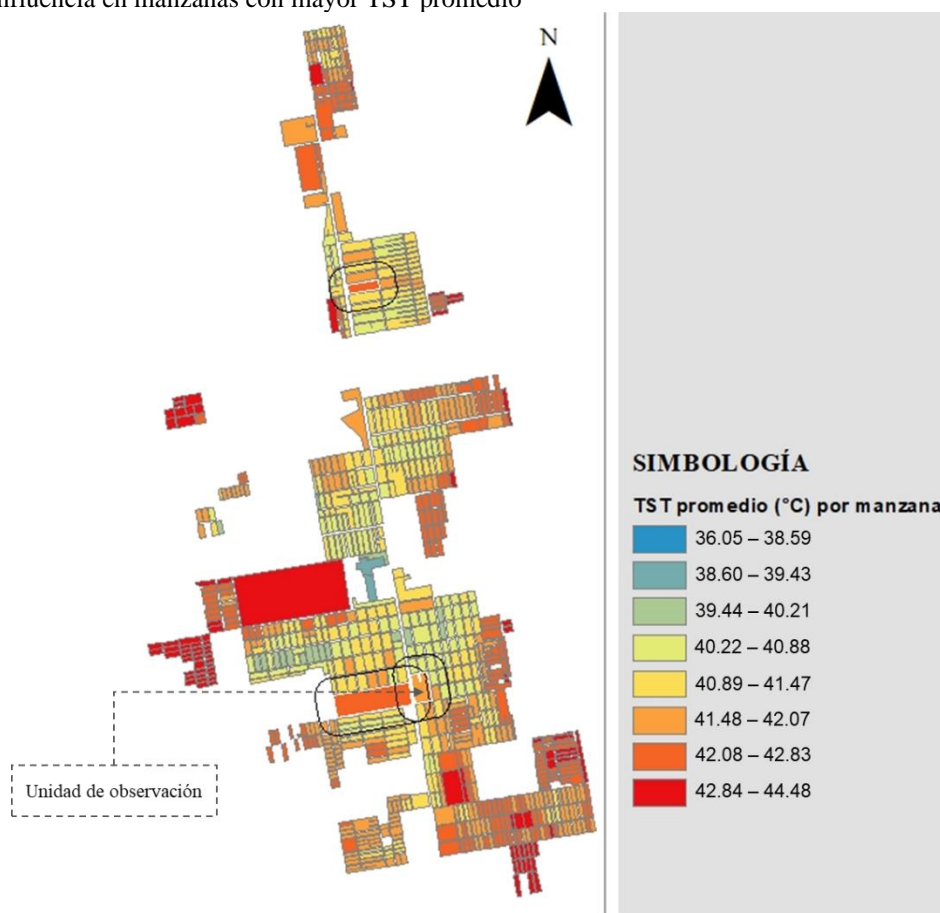


*Nota.* Mapa de TST del polígono analizado con visualización de mínimos y máximos en el área analizada y de TST promedio por manzana. Acercamiento a las manzanas con los valores más altos de TST promedio.

Como arte del segundo criterio de selección, se identificaron las manzanas con altos niveles de TST, siendo éstos a partir de los 41.48 °C según la simbología generada en la Figura 33. Una vez identificadas estas manzanas, mediante imágenes de Google Earth Pro se descartaron aquellas manzanas con un bajo ambiente edificado y después, con las manzanas restantes, se ubicaron las que se integraban dentro las AGEB urbanas con un grado de vulnerabilidad medio (ver en Anexo 2). En la Figura 34 se presenta la selección de las 3 manzanas con mayor TST promedio y que presentaron un mayor número de construcciones alrededor, así como un grado de vulnerabilidad medio, los valores de TST promedio para estas manzanas van de los 41.83 °C a los 42.53 °C.

**Figura 34**

Áreas de influencia en manzanas con mayor TST promedio

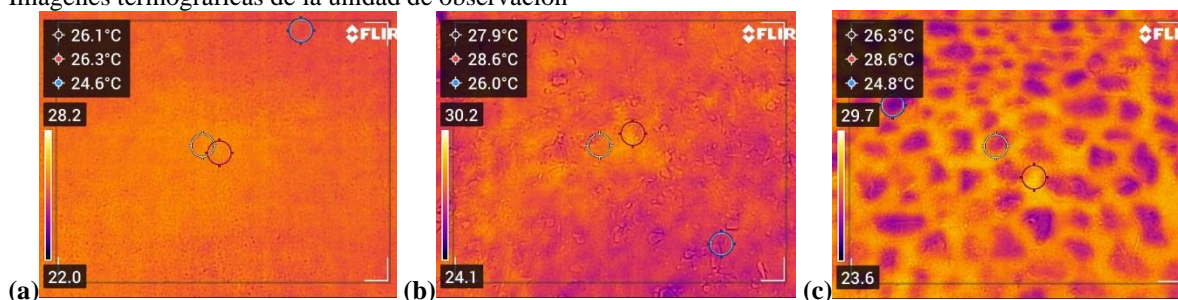


*Nota.* Polígonos de área de influencia sobre las manzanas con los valores más altos de TST promedio, un grado alto de vulnerabilidad y presencia de edificaciones del área de estudio. Indicación de la unidad de observación seleccionada.

La manzana seleccionada como unidad de observación (indicada en la Figura 34) presentó una TST de 41.83 °C y su área de influencia se traslapó con una manzana de 42.53 °C también analizada, sin embargo, ésta última, presentaba una mayor superficie de suelos desnudos.

Ahora, como parte de los resultados para la caracterización de temperatura superficial de la unidad de observación seleccionada, se presentan en la Figura 35, tres fotografías térmicas tomadas en las distintas superficies identificadas en las calles secundarias. En el caso de la banqueta pavimentada, caracterizada por un concreto gris claro, fue la que menor temperatura registró, de 24.6 °C a 26.3 °C. Por otro lado, los suelos desnudos presentaron las más altas temperaturas, en un rango de los 26.0 °C a los 28.6 °C. Lo anterior, podría deberse a la falta de vegetación en la superficie y de árboles urbanos que generen sombreado en el sitio. Por último, la calle empedrada también presentó temperaturas altas en comparación con la banqueta, siendo el rango registrado de 24.8 °C a 28.6 °C.

**Figura 35**  
Imágenes termográficas de la unidad de observación



*Nota.* Fotografías térmicas de distintas superficies del suelo presentes en la unidad de observación el día 30 de septiembre de 2023 a las 9 h 33. (a) Banqueta pavimentada. (b) Suelo desnudo. (c) Calle empedrada.

En la Tabla 30 se presentan los datos de las variables climáticas de temperatura del aire, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, registrados por la estación meteorológica portátil en la unidad de observación, el día de la toma de las fotografías térmicas de la Figura 35 (30 de septiembre de 2023). Los valores de temperatura del aire, van de los 19.5 °C a los 20.8 °C, cercano al momento de la toma de fotografías (9 h 33) y, una humedad relativa de 69.7 % a 65.3 %. En este caso, las temperaturas del aire registradas están hasta 9.1 °C por debajo de las temperaturas superficiales registradas en las fotografías.

**Tabla 30**

Datos monitoreados por la estación meteorológica en la unidad de observación

Fecha y hora (mm/dd/aaaa hh:mm)	Temperatura del aire (°C)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento
09/30/2023 00:00	18.2	76.9	0.6	WNW
09/30/2023 01:00	18.2	76.4	1.4	NW
09/30/2023 02:00	18.2	75.9	1.1	NW
09/30/2023 03:00	18.1	76.4	0.7	N
09/30/2023 04:00	18.1	75.8	1	N
09/30/2023 05:00	18.2	74.1	0.5	NNE
09/30/2023 06:00	18.3	72.7	0.9	NNE
09/30/2023 07:00	18.3	73.4	0.7	NNW
09/30/2023 08:00	18.7	72.6	0.6	NNW
09/30/2023 09:00	19.5	69.7	1.2	N
09/30/2023 10:00	20.8	65.3	0.5	N
09/30/2023 11:00	21.7	62.9	2	NW
09/30/2023 12:00	22.1	63.4	2.8	W
09/30/2023 13:00	23.1	59.7	1.1	NNW
09/30/2023 14:00	22.9	60.5	2.4	WNW
09/30/2023 15:00	23.1	60.4	3.7	WSW
09/30/2023 16:00	22.4	64.1	3.9	WNW
09/30/2023 17:00	22.3	67	2.9	W
09/30/2023 18:00	20.7	74.3	3.4	WNW
09/30/2023 19:00	19.4	80.6	1.7	NW
09/30/2023 20:00	18.4	84.4	0.3	NW
09/30/2023 21:00	17.8	86.6	1	NW
09/30/2023 22:00	17.4	87.6	0.4	NW
09/30/2023 23:00	17.1	88.4	0	

#### 4.2. Efecto de enfriamiento de TST de las configuraciones de arbolado urbano simuladas

El objetivo específico 2 indica determinar el efecto de enfriamiento de TST de diferentes configuraciones de cobertura vegetal a través de la simulación microclimática. Como parte de los resultados obtenidos para el cumplimiento de este objetivo se incluyen cuatro apartados. En el primero, se desarrolla el análisis de los datos obtenidos de la campaña de monitoreo como parte del proceso de selección del día que sería utilizado después para la validación del modelo dentro de ENVI-met, como parte de la segunda sección de resultados para este objetivo. En tercer lugar, se integran los resultados obtenidos en las simulaciones y, por último, se analiza el efecto de enfriamiento generado por cada tipo de configuración de arbolado. En esta última

sección se da respuesta a la pregunta de investigación determinando el efecto de enfriamiento de cada configuración de cobertura vegetal e identificando la configuración de arbolado urbano que obtuvo un mayor impacto en la reducción de la TST.

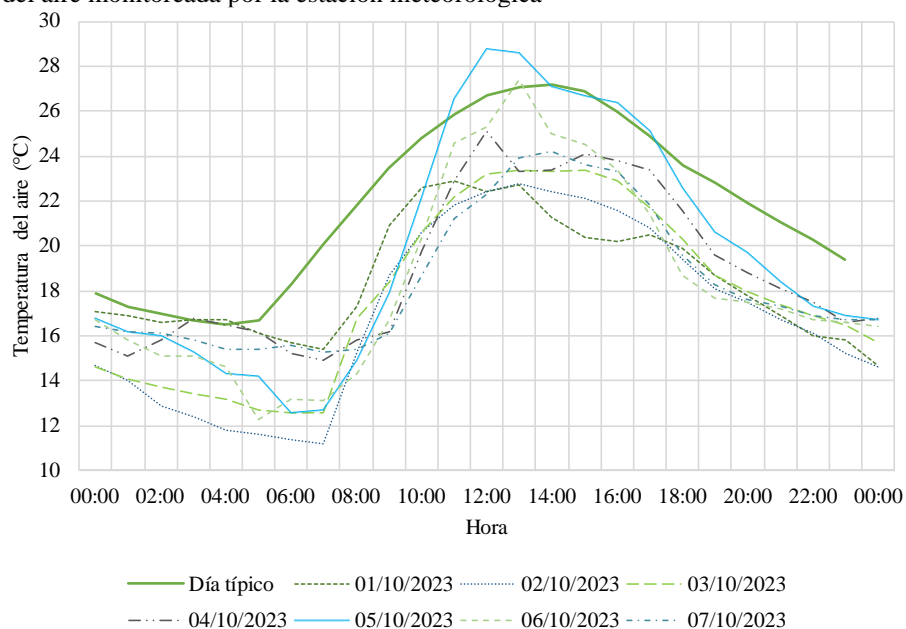
#### 4.2.1. Caracterización del microclima

Para la primera sección de resultados de este objetivo, se aborda la caracterización del microclima de la unidad de observación, esto, mediante los resultados obtenidos de la etapa de monitoreo de las variables climáticas. En el Apéndice 5 y Apéndice 6 se muestran los datos por hora para el periodo monitoreado del día 1 al 7 de octubre.

En la Figura 36 se integra un gráfico de líneas con los valores horarios de temperatura del aire ( $T_{air}$ ) para cada día monitoreado en la estación meteorológica portátil y del día típico de verano. Se observa que el día monitoreado con mayor temperatura fue el 5 de octubre, alcanzando los  $28.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  a las 12 h 00, seguido del 6 de octubre, con un registro de  $27.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  a las 13 h 00. En cuanto a los valores mínimos, el día 2 de octubre presentó  $11.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  a las 7 h 00. La mayor oscilación presentada en el periodo monitoreado fue la del día 3 de octubre, con una oscilación total de  $16.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , presentando una mínima de  $12.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  en punto de las 7 h 00.

**Figura 36**

Temperatura del aire monitoreada por la estación meteorológica



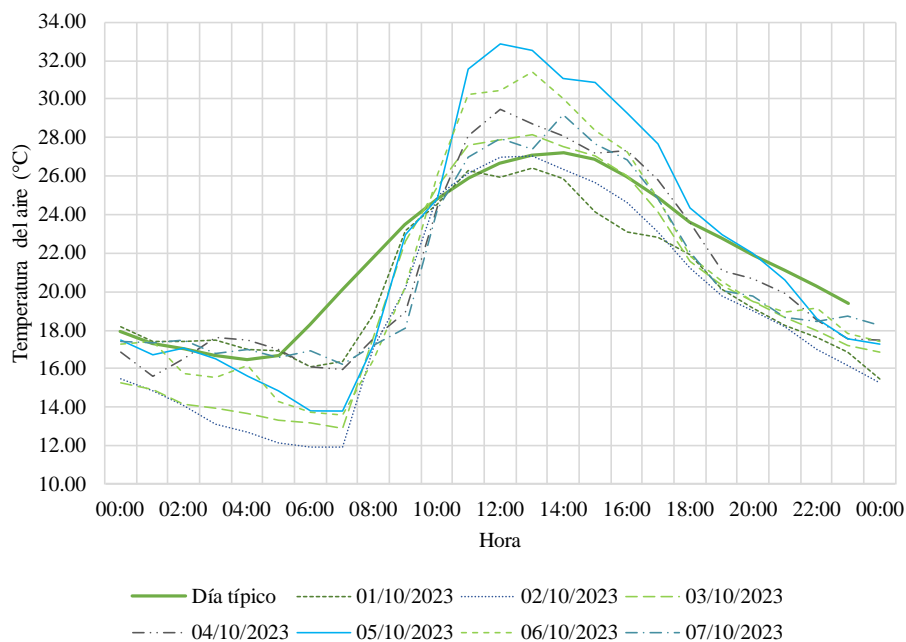
*Nota.* Gráfico de  $T_{air}$  horaria de los resultados obtenidos mediante la campaña de monitoreo en el punto E (ver Figura 20) y del día típico de verano: 16 de agosto, identificado mediante las normales climatológicas (ver en apartado 3.2.7.3).

En cuanto a la comparativa de la Tair de los días monitoreados por la estación (E) y el día típico de verano, se identifica una mayor relación entre los valores de este día, y el 5 de octubre, el cual presenta una temperatura máxima de 28.8 °C, media de 19.78 °C y mínima de 12.6 °C. Las diferencias entre los valores del día típico y el 5 de octubre son de 1.6 °C en la temperatura máxima, 2.07 °C en la media y 3.9 °C en la mínima.

Los resultados de los datos horarios de la Tair monitoreados a nivel peatón, en el punto A, se presentan en la Figura 37, a través de un gráfico de líneas, aquí también se integran los datos horarios para el día típico de verano. En este caso, se observa una temperatura máxima de 32.84 °C a las 12 h 00 para el día 5 de octubre y una mínima de 11.09 °C a las 7 h 00 el día 2 de octubre. La oscilación térmica va de 11.01 °C para el día 1 de octubre, a 19.02 °C el día 5 de octubre, éste último con una temperatura mínima de 13.81 °C.

**Figura 37**

Temperatura del aire monitoreada a nivel peatón (A)



*Nota.* Gráfico de la T<sub>a</sub> horaria de los resultados obtenidos mediante la campaña de monitoreo en el punto A (ver Figura 20) y del día típico de verano: 16 de agosto, identificado mediante las normales climatológicas.

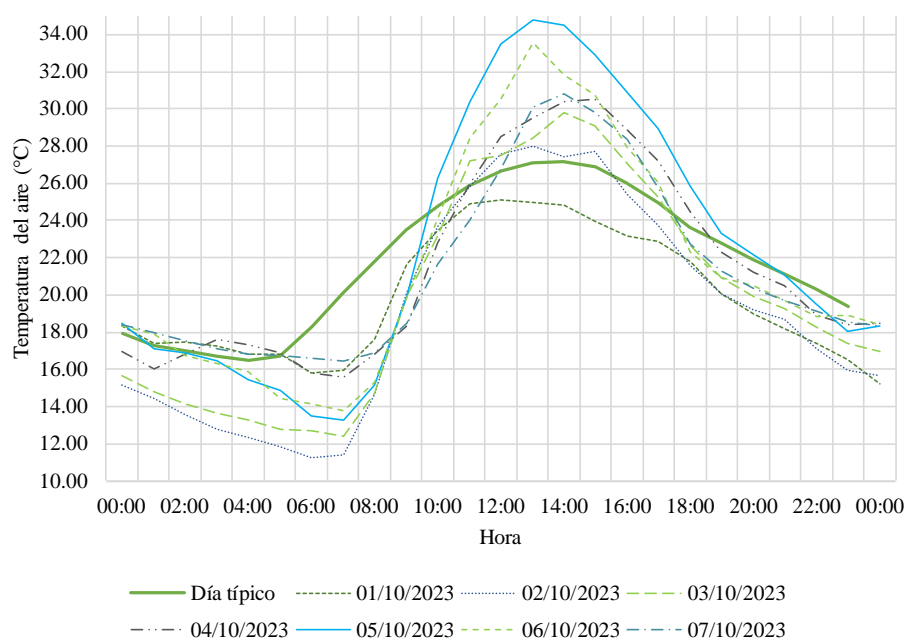
Respecto a los valores para el día típico de verano, el día 7 de octubre fue el que tuvo mayor concordancia en el punto A. La Tair para este día presentó valores de 29.16 °C en la temperatura máxima a las 14 h 00, 20.88 °C en la media y 16.24 °C en la mínima a las 7 h 00.

La diferencia entre estos valores y los del día típico de verano son de, 1.96 °C en la Tair máxima, 0.97 °C en la media y 0.26 °C en la mínima.

Por último, como resultado de la campaña de monitoreo, se presentan en la Figura 38 los datos horarios de la Tair obtenidos a nivel peatón desde el punto B, así como los datos horarios para el día típico de verano. El día con mayor oscilación en la Tair fue el 5 de octubre, con una máxima de 34.81 °C a las 13 h 00 y una mínima de 13.28 °C a las 7 h 00, siendo este el punto y día con mayor oscilación en la campaña de monitoreo, con un valor de 21.52 °C.

**Figura 38**

Temperatura del aire monitoreada a nivel peatón (B)



*Nota.* Gráfico de la Tair horaria de los resultados obtenidos mediante la campaña de monitoreo en el punto B (ver Figura 20) y del día típico de verano: 16 de agosto, identificado mediante las normales climatológicas.

Para el análisis comparativo entre el día típico de verano y los días monitoreados en el punto B, el 7 de octubre, igual que en el punto A, fue el de mayor similitud. Los valores para este día fueron de 30.84 °C en la Tair máxima, 21.21 °C en la media y 16.43 °C en la mínima. Las diferencias entre el día típico y el 7 de octubre, fueron de 3.64 °C en la máxima, 0.64 °C en la media y 0.07 °C en la mínima.

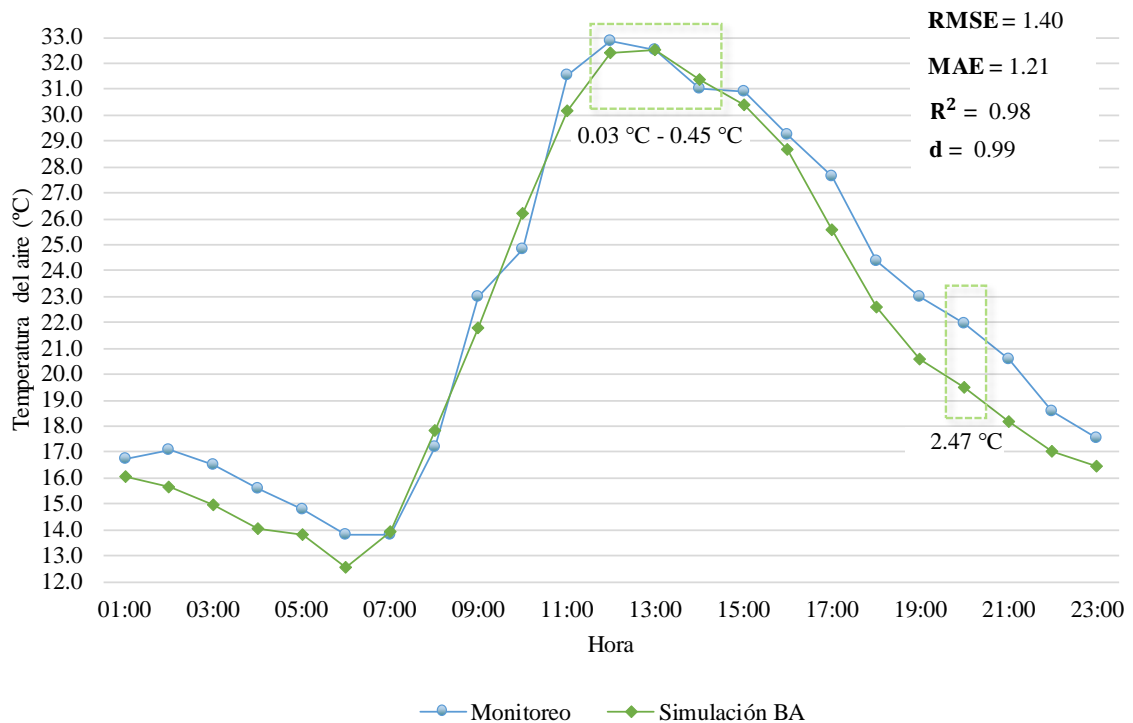
#### 4.2.2. Validación del modelo base de simulación

Para la segunda sección de resultados del objetivo específico 2, se integran los resultados de las simulaciones de los escenarios base BA y BB para la validación de estos modelos al compararlos las condiciones de la Tair monitoreada a nivel peatón el día 7 de octubre.

En la Figura 39 se presenta la comparación de los valores de Tair de la simulación del escenario Base A (BA) y del monitoreo en sitio, así como los valores resultantes para las métricas de RMSE, MAE,  $R^2$  e índice d. Se observa que la tendencia de los valores durante el día es similar, presentándose las temperaturas máximas y mínimas en los mismos horarios.

**Figura 39**

Comparación de temperatura del aire de monitoreo y simulación del escenario BA



*Nota.* Gráfico de comparación de Tair horaria de los valores obtenidos en la simulación del escenario base BA a una altura de 2.5 m y los valores monitoreados a nivel peatón en el punto A. Indicación del periodo con mayor discrepancia y del periodo con los horarios críticos.

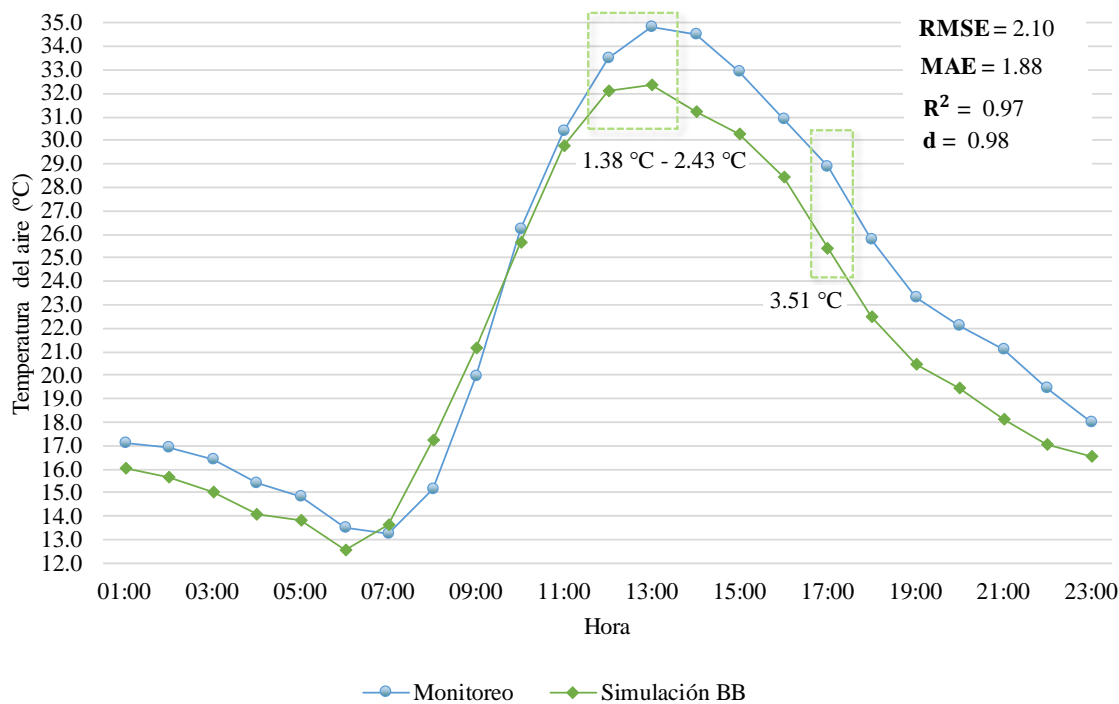
En el periodo comprendido entre las 15 h 00 y las 6 h 00 la Tair en la simulación quedó por debajo de los valores monitoreados y, la mayor diferencia de Tair se identificó a las 20 h 00 con 2.47 °C. Respecto a los horarios críticos de Tair establecidos anteriormente, que van de las 12 h 00 (en la estación meteorológica) a las 14 h 00 (en el punto A a nivel peatón), la diferencia entre los valores registrados fue de 0.03 °C a 0.45 °C.

En cuanto a las métricas estadísticas del escenario Base B (BA), los valores para la RMSE (1.40) y el MAE (1.21) se mantuvieron dentro de los rangos reportados en estudios previos y, para el  $R^2$  e índice d, los valores resultantes se aproximaron al uno, siendo estos 0.98 y 0.99 respectivamente, alcanzándose así el objetivo establecido para la validación.

Por otra parte, en la Figura 40 se presentan los resultados de la simulación y la comparación con los valores monitoreados del escenario BB. Contrario al escenario BA, las diferencias entre los valores simulados y los monitoreados fueron mayores en el escenario BB, generándose la mayor discrepancia a las 17 h 00 con 3.51 °C.

**Figura 40**

Comparación de temperatura del aire de monitoreo y simulación del escenario BB



*Nota.* Gráfico de comparación de Tair horaria de los valores obtenidos en la simulación del escenario base BB a una altura de 2.5 m y los valores monitoreados a nivel peatón en el punto B. Indicación del periodo con mayor discrepancia y del periodo con los horarios críticos.

Durante la mayor parte del día, comprendiendo el periodo de las 10 h 00 a las 6 h 00, los valores de Tair simulados fueron menores a los monitoreados, incluyéndose en este periodo de tiempo, las horas críticas identificadas en la caracterización del microclima, 12 h 00 y 13 h 00, en donde las diferencias resultaron de 1.38 °C y 2.43 °C respectivamente.

Los valores resultantes en las métricas estadísticas del escenario BB respecto al RMSE (2.10) y el MAE (1.88) también se mantuvieron dentro de los rangos reportados en estudios previos y en el caso del  $R^2$  e índice d, igual que en el escenario BA, los valores aproximados al uno (0.97 y 0.98 respectivamente), permitieron que se cumpliera el objetivo de validación.

#### *4.2.3. Resultados de simulaciones con integración de cobertura vegetal*

Para la tercera sección de resultados del objetivo específico 2, se presentan los resultados de la variable de TST obtenidos en las simulaciones realizadas por cada cañón urbano (BA y BB). Para esta sección, se analizarán con un énfasis mayor los horarios de las 8 h 00, 12 h 00, 13 h 00 y 16 h 00, identificadas en la sección anterior, como los horarios en donde la Tair comienza a incrementar, llega a su punto máximo y disminuye.

##### *4.2.3.1. Escenarios del cañón BA*

Los resultados de TST de los escenarios del cañón BA (Apéndice 7) mostraron que, las mayores temperaturas se registraron de entre las 8 h 00 y las 16 h 00, correspondiendo esto al comportamiento de la Tair analizada en la sección anterior y los resultados obtenidos para esta variable (ver en Apéndice 8). A partir de la comparación de los resultados por receptores, se determinó que, en todos los escenarios (base y de propuesta), la mayor discrepancia en los valores obtenidos se presentó a las 12 h 00, recordando que es éste el horario crítico del día.

En la Tabla 31 se presentan los valores resultantes de la comparación entre receptores para cada uno de los escenarios del cañón BA, con el fin de identificar el receptor que registró los valores de temperatura superficial terrestre mínima (TSTmin) y máxima (TSTmax) durante el periodo cálido del día. En el caso de los escenarios BA, BA-Disp, y BA-Alin int los valores de TSTmin se presentaron en mayor medida en el R3 (cercano a árbol). Por el contrario, el escenario BA-Agr int no tuvo un receptor con una alta recurrencia de TSTmin, no obstante, fue el R3 el que obtuvo el valor de TSTmin en la hora crítica del día (12 h 00). En cuanto a la TSTmax, sólo el escenario BA y BA-Agr int tuvieron recurrencia sobre un receptor durante el periodo cálido del día y fue el R1. En general, a las 8 h 00 el sitio más cálido fue bajo la sombra de un árbol (R4), a las 12 h 00 contiguo a un edificio (R1) y a las 16 h 00 entre el arbolado (R3).

**Tabla 31**

Resultados de TSTmin y TSTmax horaria por escenario del cañón BA

Hora	Elemento	BA	BA-Disp	BA-Alin int	BA-Agr int
8:00	Receptor, TSTmin (°C)	R3, 20.14	R2, 16.55	R1, 17.10	R1, 15.96
	CE (°C)	1.17	3.85	3.36	4.45
	Receptor, TSTmax (°C)	R1, 21.31	R4, 20.40	R4, 20.46	R4, 20.41
12:00	Receptor, TSTmin (°C)	R3, 36.20	R3, 28.65	R3, 28.67	R3, 28.63
	CE (°C)	5.37	11.74	11.36	11.17
	TSTmax (°C)	R1, 41.57	R1, 40.39	R1, 40.03	R1, 39.80
16:00	Receptor, TSTmin (°C)	R1, 30.06	R3, 28.83	R3, 28.82	R2, 26.75
	CE (°C)	2.48	1.64	1.19	2.36
	Receptor, TSTmax (°C)	R3, 32.54	R2, 30.47	R2, 30.01	R1, 29.11

*Nota.* Resultados del receptor, por escenario, en donde se presentó la TSTmin y TSTmax en los horarios indicados. CE (efecto de enfriamiento, por sus siglas en inglés) del receptor con TSTmin en comparación de los demás receptores en el mismo horario.

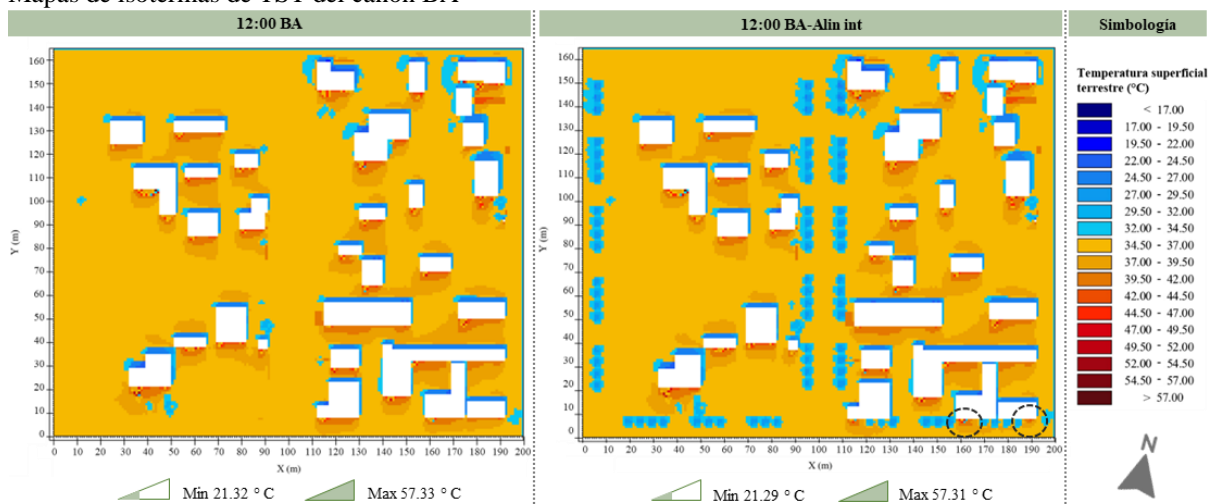
Respecto a la diferencia entre TSTmin registradas en los receptores del escenario BA a las 8 h 00 y 12 h 00 se vuelven menos significativas en comparación con los escenarios de propuestas, donde las configuraciones de arbolado provocaron mayores diferencias entre receptores.

Con base a los resultados anteriores, se determina que para el cañón BA el sitio con menor TST durante el periodo cálido del día fue cercano a un árbol (3 m -7 m) y el sitio con mayor TST fue contiguo a un edificio. La orientación del R3, que registró los valores de TSTmin de las 8 h 00 a 16 h 00, es SSE y, la posición con respecto al arbolado es N. Los vientos se determinaron constantes con orientación N, por lo que el efecto refrescante del arbolado sobre el flujo de aire al norte del cañón, pudieron influir en la disminución de TST. No obstante, los registros de valores de Tair, en los escenarios con integración de arbolado, no mostraron disminuciones significativas respecto al escenario base, por ejemplo, para las 12 h 00 la mayor diferencia en el R3 respecto al escenario BA, fue en el BA-Disp con 0.37 °C.

Continuando con el análisis del cañón BA, en el Apéndice 9 se muestran los mapas de isotermas de la TST con los resultados de las 8 h 00, 12 h 00 y 16 h 00. Se puede identificar a las 8 h 00 que la integración de cobertura vegetal al norte del cañón incrementa la superficie con una temperatura dentro del rango de 17.00 °C a 19.50 °C provocada en principio por la sombra de las edificaciones. También se identificó que, en general, en todos los escenarios de propuesta, el alcance del enfriamiento provocado por el arbolado fue mayor al norte del cañón.

Durante las 12 h 00 se identificó en los mapas al sur del cañón que la presencia de vegetación disminuye el efecto de sobrecalentamiento provocado por sombra de los edificios sobre la TST bajando del rango 37.00 °C – 39.50 °C al rango 34.50 °C – 37.00 °C. Por el contrario, el arbolado que se ubicó cercano a las construcciones y que tenía menor separación entre elementos (BA-Alin int y BA-Agr int) provocó un CE (efecto de enfriamiento, por sus siglas en inglés) en el perímetro próximo, pero, entre alineaciones y agrupaciones se presentó un incremento de TST (ver en Figura 41). Para la parte central del cañón urbano, sobre la banqueta oeste, donde se presentan superficies pavimentadas, los escenarios BA-Alin int y BA-Agr int lograron disminuir en mayor medida la TST en este tipo de superficie debido a que las alineaciones y grupos se presentaron cercanos al pavimento de concreto.

**Figura 41**  
Mapas de isotermas de TST del cañón BA



*Nota.* Mapas de isotermas de TST de comparación de los escenarios BA y BB-Alin int a las 12 h 00. Indicación en el mapa del escenario BA-Alin int de las zonas con incrementos de TST entre alineaciones en comparación con el escenario base. Simbología inferior con los valores de TSTmin (min) y TSTmax (max) registradas en el mapa.

Para las 16 h 00 el alcance del CE del escenario BA-Disp con respecto al escenario base, es el mayor, siendo la sección sur y oeste del escenario donde más se incrementa, pasando del rango de TST de 32.00 °C – 34.50 °C al 29.50 °C – 32.00 °C.

#### 4.2.3.2. Escenarios del cañón BB

En el Apéndice 10 se incluyen los resultados de TST de los escenarios del cañón BB, con base a los cuales se desarrolló la Tabla 32, que incluye los resultados de los escenarios de

TSTmin y diferencias entre el valor máximo y mínimo registrado entre receptores a la misma hora. Los valores obtenidos para este cañón, indicaron que las mayores temperaturas de TST se registraron entre las 8 h 00 y las 16 h 00, de igual manera que en el cañón BA. En este caso, la hora crítica del día en cuanto a TST fue a las 13 h 00 y, las mayores diferencias entre los valores de TST registrados por los receptores, se presentaron a las 16 h 00.

**Tabla 32**

Resultados de TSTmin y TSTmax horaria por escenario del cañón BB

Hora	Elemento	BB	BB-Disp	BB-Alin int	BB-Agr int
8:00	Receptor, TSTmin (°C)	R3, 18.13	R4, 15.58	R2, 16.11	R2, 16.23
	CE (°C)	1.89	2.62	2.92	3.61
	Receptor, TSTmax (°C)	R1, 20.02	R3, 18.20	R1, 19.03	R1, 19.84
13:00	Receptor, TSTmin (°C)	R4, 36.50	R3, 32.98	R4, 35.98	R4, 35.96
	CE (°C)	1.78	3.72	1.39	2.02
	Receptor, TSTmax (°C)	R1, 38.28	R2, 36.70	R3, 37.37	R1, 37.98
16:00	Receptor, TSTmin (°C)	R4, 31.00	R3, 28.69	R2, 27.31	R4, 26.25
	CE (°C)	1.58	2.19	4.60	5.81
	Receptor, TSTmax (°C)	R3, 32.58	R1 y R2, 30.88	R3, 31.91	R3, 32.06

*Nota.* Resultados del receptor, por escenario, en donde se presentó la TSTmin y TSTmax en los horarios indicados. CE (efecto de enfriamiento, por sus siglas en inglés) del receptor con TSTmin en comparación de los demás receptores en el mismo horario.

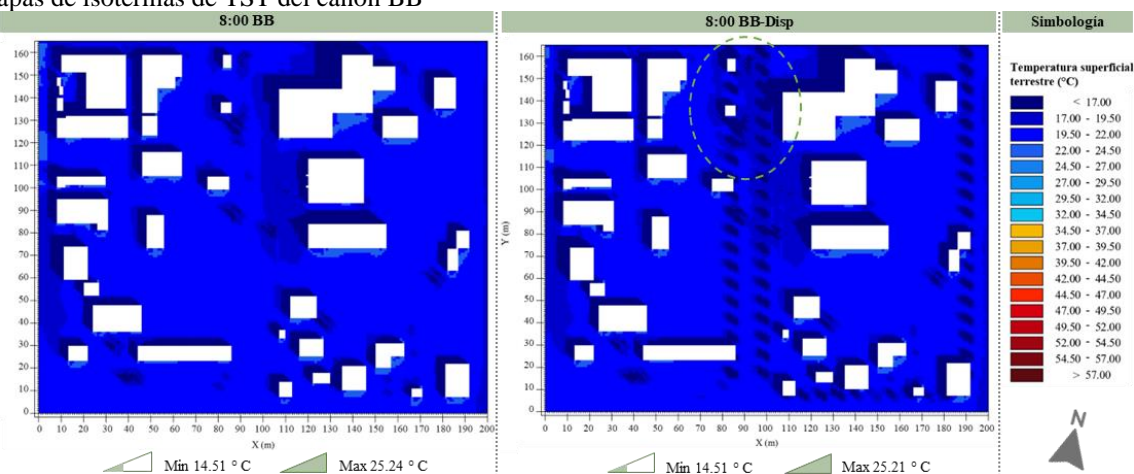
A partir del análisis de la Tabla 32, se determinó que, en los escenarios BB y BB-Agr int, los valores de TSTmin se presentaron en mayor medida en el R4 (bajo la sombra de árbol), siendo este mismo receptor el que registró la TSTmin a las 13 h 00 (hora crítica del día) en tres de los cuatro escenarios. Para el escenario BB-Disp, el sitio con menor TST en el periodo cálido del día fue en el R3 y, para el escenario BB-Alin int, fue en el R2.

En cuanto a las diferencias entre TSTmin registradas en los receptores de un mismo escenario, a las 8 h 00 y 16 h 00 se vuelven menos significativas en el BB en comparación con los escenarios de propuestas, donde las configuraciones de arbolado provocaron mayores diferencias entre receptores. En el caso de la TSTmax para el escenario BB y BB-Agr int se presentó en el R1, para el BB-Alin int en el R3 y en el BB-Disp no hubo recurrencia sobre un receptor. En general, durante las 8 h 00 y 13 h 00 el R1 registró en la mayoría la TSTmax y durante las 16 h 00 fue el R3.

Con base a los resultados se define que, la superficie bajo la sombra del arbolado (R4) presentaron una menor TST durante las horas críticas del día en el cañón BB y la superficie contigua a edificio (R1) la mayor TST. El R4 se ubica al norte dentro del cañón, de donde provienen los vientos reinantes y en donde se registraron menores valores de Tair durante el periodo cálido del día (ver resultados de Tair en Apéndice 11). Continuando con el análisis respecto a la Tair, en el R4, se identificó que, a las 13 h 00 la mayor diferencia de valores en comparación con el escenario base BB, fue de 0.38 °C en el escenario BB-Disp.

Respecto a los mapas de isotermas de la TST de los escenarios del cañón BB, en el Apéndice 12 se integran los mapas de las 8 h 00, 13 h 00 y 16 h 00. Se identificó que en el escenario BB-Disp a las 8 h 00 la integración de arbolado al norte del cañón incrementa el CE provocado por la vegetación presente al centro del cañón, aumentando la superficie con una TST menor a 17.00 °C, además, en comparación con los demás escenarios, en éste es mayor la superficie que pasa del rango de 19.50 °C – 22.00 °C a 17.00 °C – 19.50 °C (ver en Figura 42). En todos los escenarios de propuesta en la sección noroeste se apreció una reducción en la TST del rango 19.50 °C – 22.00 °C al 17.00 °C - 19.50 °C. De igual manera que en el cañón BA, aquí se identificó que, en todos los escenarios de propuesta, el alcance del enfriamiento de la TST por parte del arbolado se extendió más en la sección norte del cañón.

**Figura 42**  
Mapas de isotermas de TST del cañón BB



*Nota.* Mapas de isotermas de TST de comparación de los escenarios BB y BB-Disp a las 8 h 00. Indicación en el mapa del escenario BB-Disp de la zona con mayor superficie con reducción de TST en comparación con el escenario base. Simbología inferior con los valores de TSTmin (min) y TSTmax (max) registradas en el mapa.

Para las 13 h 00 se identificó que, en todos los escenarios de propuesta, la TST en las superficies de concreto al oeste del cañón disminuyó, pasando del rango 42.00 °C - 44.50 °C al

39.50 - 42.00 °C. En la orientación este del escenario, la configuración agrupada intercalada logró un mayor alcance en la reducción de TST incrementando la superficie con una TST de entre 34.50 °C a 37.00 °C. Para la sección noroeste del escenario base, todos los escenarios con integración de arbolado urbano lograron disminuir la TST de zonas caracterizadas con asfalto, bajando del rango 47.00 °C - 49.50 °C al 44.50 °C - 47.00 °C. En el caso de las 16 h 00, el escenario BB-Disp fue el de mayor alcance de enfriamiento respecto a las condiciones base en comparación con los demás escenarios de propuesta, en este caso, la superficie con TST de 32.00 °C - 34.50 °C disminuyó y la superficie con TST de 29.50 °C - 32.00 °C aumentó.

#### *4.2.4. Efecto de enfriamiento de configuraciones de arbolado*

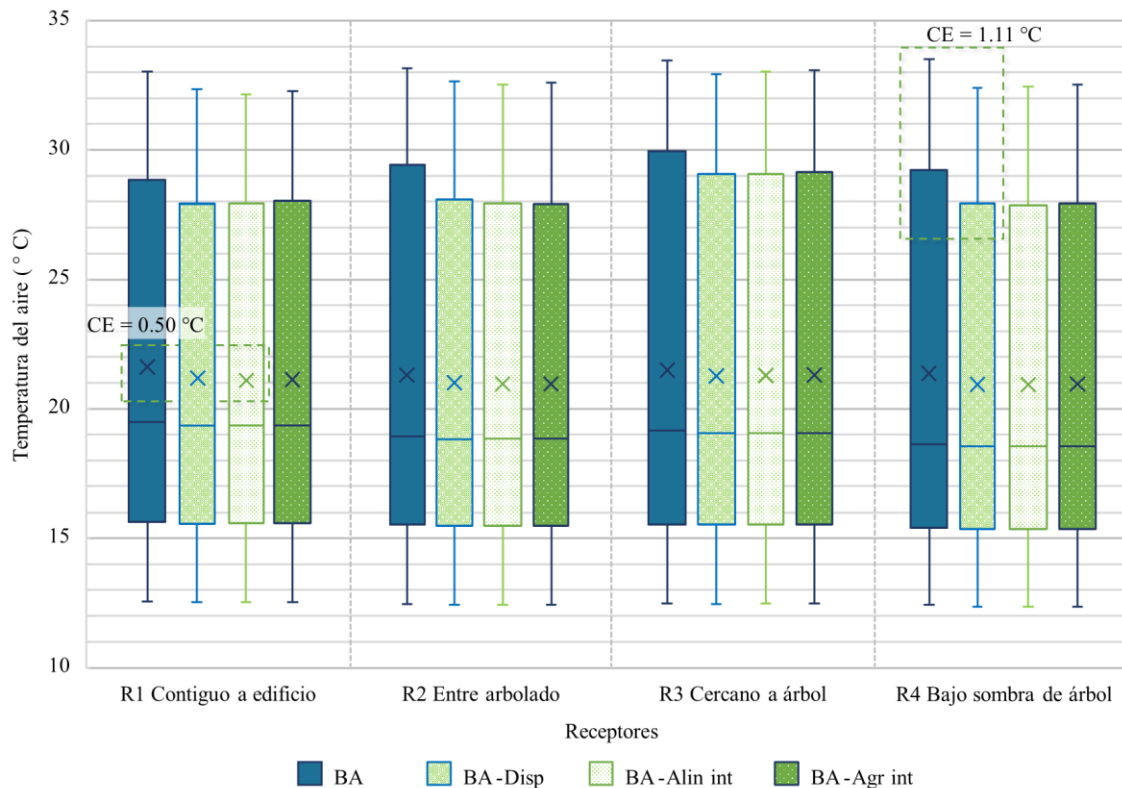
Por último, para la cuarta sección del cumplimiento del objetivo específico 2, se incluye el análisis del CE de TST generado, por las configuraciones de arbolado simuladas, al comparar estadísticamente los resultados por receptor, lo anterior, con la finalidad de identificar la configuración óptima de arbolado urbano que disminuye la TST respecto a los escenarios base.

##### *4.2.4.1. Escenarios del cañón BA*

A manera de ampliar el conocimiento de las condiciones del tiempo que se presentaron durante la obtención de resultados de TST que se analizarán en los siguientes párrafos, se integra aquí un análisis de los valores de Tair registrados por receptor para cada escenario. Para lo anterior, se generó un diagrama de cajas (Figura 43) con los valores de Tair de cada escenario por receptor, con base a los valores resultantes de las simulaciones (ver en Apéndice 8). Se puede observar que las condiciones de Tair no tuvieron variaciones significativas entre los escenarios de propuesta, incluso, la oscilación de la Tair media registrada por los receptores fue de 0.30 °C en los escenarios con integración de arbolado urbano y, comparando todos los escenarios fue de 0.67 °C. En el caso del cañón BA, el mayor CE respecto al escenario base se presentó en el R1 a las 9 h 00 con 1.37 °C, en el R2 y R3 a las 16 h 00 con 1.50 °C y 0.89 °C respectivamente y, en el R4 a las 15 h 00 con 1.59°C, siendo la configuración Alin int la óptima. En cuanto a la Tair máxima el mayor CE, fue de 1.11 °C en por parte de la configuración dispersa (BA-Disp) en el R4 y de 0.50 °C en la Tair media por parte del escenario BA-Alin int en el R1.

**Figura 43**

Resultados de temperatura del aire de los receptores del cañón BA.



*Nota.* Gráfico de comparación de los valores de Tair horaria obtenidos por receptor en la simulación de los escenarios del cañón BA. Indicación del mayor CE registrado en la Tair máxima y Tair media al comparar los escenarios de propuesta con el escenario base BA.

Ahora, para la identificación de la configuración de arbolado que generó un mejor CE, en primer lugar, se integran en la Tabla 33 los resultados de reducción e incremento de TST de cada uno de los escenarios de propuesta respecto al escenario base, registrados en el R1 (contiguo a edificio). Para todos los escenarios con integración de arbolado, el mejor CE en la TST se presentó a las 9 h 00, siendo el mayor de 8.99 °C provocado por la configuración de arbolado agrupada intercalada (BA-Agr int), seguido de 7.98 °C por el escenario BA-Alin int y 7.55 °C por el escenario BA-Disp. En cuanto al análisis del horario crítico del día, éste se determinó considerando la hora con mayor TST en el escenario base BA registrada en el receptor analizado, así como una hora antes y después de ésta última.

**Tabla 33**

Resultados de TST en el receptor 1 de los escenarios del cañón BA

Receptor 1 - Contiguo a edificio				
Hora	BA-Base (°C)	BA-Disp	BA-Alin int	BA-Agr int
01:00	17.27	+0.04	+0.05	+0.06
02:00	16.43	+0.04	+0.05	+0.06
03:00	15.73	+0.04	+0.06	+0.07
04:00	14.99	+0.05	+0.07	+0.08
05:00	14.45	+0.05	+0.07	+0.08
06:00	13.85	+0.05	+0.07	+0.08
07:00	15.84	-0.17	-1.27	-1.20
08:00	21.31	-3.74	-4.21	-5.35
09:00	27.46	-7.55	-7.98	-8.99
10:00	33.36	-3.28	-3.73	-4.26
11:00	38.38	-1.79	-2.18	-2.52
12:00	41.57	-1.18	-1.54	-1.77
13:00	37.72	-0.95	-1.27	-1.36
14:00	33.59	-0.89	-1.14	-1.13
15:00	31.88	-0.89	-1.08	-1.02
16:00	30.06	-0.86	-1.02	-0.95
17:00	27.74	-0.69	-0.80	-0.78
18:00	24.99	-0.46	-0.55	-0.54
19:00	22.88	-0.30	-0.37	-0.37
20:00	21.38	-0.20	-0.25	-0.26
21:00	20.04	-0.14	-0.18	-0.19
22:00	18.86	-0.08	-0.11	-0.12
23:00	17.99	-0.05	-0.07	-0.08

*Nota.* Gradiente de color (de menor a mayor) de valores de TST en el escenario BA-Base e indicación de aumento o disminución de TST en los escenarios de propuesta BA-Disp, BA-Alin int y BA-Agr int. Selección de los valores con mayor CE durante las horas críticas respecto al escenario BA-Base.

Con base a lo anterior se determina que, en el R1, la configuración de arbolado agrupada intercalada (BA-Agr int) fue la que logró mitigar en mayor medida la TST, con una reducción de entre 2.52 °C y 1.36 °C durante el horario crítico del día (11 h 00 - 13 h 00), incluso, se observa que este resultado se presentó en el resto del periodo cálido del día, que va de las 8 h 00 a las 16 h 00. En cuanto al aumento en la TST provocado por la integración de arbolado, este se presentó durante las primeras horas del día y se prolongó hasta las 6 h 00, observando el mayor incremento entre las 4 h 00 y 6 h 00 en el escenario BA-Agr int.

Continuando con el análisis de resultados por receptor, en la Tabla 34 se presentan los resultados de la comparativa del CE de los escenarios de propuesta en el R2 (entre arbolado), en donde se observa que, a las 15 h 00 se presenta el mejor CE para el escenario BA-Alin int y BA-Agr int con una reducción de 6.75 °C y 7.45 °C respectivamente. Para el escenario BA-Disp el mejor CE fue a las 8 h 00 con 3.88 °C.

**Tabla 34**

Resultados de TST en el receptor 2 de los escenarios del cañón BA

Receptor 2 – Entre arbolado				
Hora	BA-Base (°C)	BA-Disp	BA-Alin int	BA-Agr int
01:00	15.53	-0.01	+0.01	+0.04
02:00	14.99	-0.02	+0.01	+0.03
03:00	14.34	-0.02	+0.01	+0.04
04:00	13.50	-0.02	+0.01	+0.04
05:00	13.13	-0.02	+0.02	+0.05
06:00	12.29	-0.02	-0.00	+0.03
07:00	14.90	-1.27	-1.55	-0.12
08:00	20.43	-3.88	-1.58	-0.57
09:00	25.54	-0.68	-0.63	-0.46
10:00	30.13	-0.51	-0.43	-0.31
11:00	33.68	-0.55	-0.39	-0.23
12:00	36.32	-0.62	-0.42	-0.21
13:00	37.67	-0.91	-0.64	-0.29
14:00	37.72	-1.21	-0.97	-0.58
15:00	36.46	-1.61	-6.75	-7.45
16:00	32.11	-1.64	-2.10	-5.36
17:00	24.80	-0.65	-0.81	-0.94
18:00	20.92	-0.32	-0.35	-0.35
19:00	18.90	-0.18	-0.15	-0.12
20:00	17.76	-0.11	-0.05	-0.01
21:00	16.53	-0.06	-0.00	+0.06
22:00	15.49	-0.04	+0.03	+0.09
23:00	14.92	-0.03	+0.05	+0.12

Nota. Gradiente de color (de menor a mayor) de valores de TST en el escenario BA-Base e indicación de aumento o disminución de TST en los escenarios de propuesta. Selección de los valores con mayor CE durante las horas críticas respecto al escenario BA-Base.

De acuerdo con los registros del R2, la configuración de arbolado alineada intercalada (BA-Alin int) logró reducir en mayor medida la TST, disminuyendo de entre 0.64 °C a 6.75 °C respecto al escenario base, durante el horario crítico del día (13 h 00 - 15 h 00), aunque, durante las 8 h 00 a 14 h 00, del periodo cálido del día, el escenario BA-Disp obtuvo mejores resultados de enfriamiento. En cuanto al aumento de TST en los escenarios de propuesta, este se presentó entre las 21 h 00 y 6 h 00 en el escenario BA-Agr int con un aumento máximo de 0.12 °C y de las 22 h 00 a las 5 h 00 en el BA-Alin int, con un aumento máximo de 0.05 °C, siendo la configuración dispersa la única que no aumentó los niveles de TST.

Respecto al análisis de resultados del R3 (cercano a árbol), en la Tabla 35 se presentan los resultados de la comparativa del CE de los escenarios a partir del cual se identificó que, a las 12 h 00 se presenta el mejor CE de los tres escenarios de propuesta, siendo el mayor de 7.57 °C en el escenario BA-Agr int.

**Tabla 35**

Resultados de TST en el receptor 3 de los escenarios del cañón BA

Receptor 3 – Cercano a árbol				
Hora	BA-Base (°C)	BA-Disp	BA-Alin int	BA-Agr int
01:00	15.58	+0.07	+0.05	+0.05
02:00	15.02	+0.07	+0.04	+0.04
03:00	14.36	+0.07	+0.05	+0.05
04:00	13.52	+0.08	+0.05	+0.05
05:00	13.15	+0.07	+0.04	+0.04
06:00	12.30	+0.07	+0.05	+0.05
07:00	13.99	+0.02	+0.02	+0.01
08:00	20.14	+0.11	+0.12	+0.08
09:00	25.21	-0.88	-0.87	-0.91
10:00	29.81	-5.06	-5.06	-5.08
11:00	33.46	-6.65	-6.62	-6.64
12:00	36.20	-7.55	-7.53	-7.57
13:00	37.66	-4.21	-4.16	-4.21
14:00	37.80	-4.74	-4.71	-4.78
15:00	36.69	-4.75	-4.73	-4.78
16:00	32.54	-3.71	-3.72	-3.71
17:00	25.31	-1.92	-1.97	-1.94
18:00	21.31	-0.88	-0.94	-0.92
19:00	19.20	-0.34	-0.39	-0.38
20:00	17.99	-0.10	-0.15	-0.14
21:00	16.72	+0.03	-0.02	-0.01
22:00	15.63	+0.12	+0.07	+0.08
23:00	15.02	+0.17	+0.13	+0.13

Nota. Gradiente de color (de menor a mayor) de valores de TST en el escenario BA-Base e indicación de aumento o disminución de TST en los escenarios de propuesta. Selección de los valores con mayor CE durante las horas críticas respecto al escenario BA-Base.

La configuración BA-Agr int fue la que obtuvo un mayor CE, con una reducción de entre 4.21 °C a 4.78 °C durante el horario crítico del día, de igual manera, mantuvo un mejor CE durante el resto del periodo cálido del día, a excepción de las 8 h 00, en donde todos los escenarios elevaron la TST de entre 0.08 °C (BA-Agr int) a 0.12 °C (BA-Alin int). Continuando con la identificación del aumento en la TST, este tuvo lugar de las 21 h 00 a las 8 h 00 siendo el escenario BA-Disp el que aumentó en mayor medida la TST con 0.17 °C a las 23 h 00.

Ahora bien, en la Tabla 36 se presentan los resultados de la comparativa del CE de los escenarios de propuesta en el R4 (bajo sombra de árbol), donde se observa que, a las 14 h 00, siendo ésta la hora crítica del día, se presentó el mejor CE en todos los escenarios de propuesta. Durante esta hora la reducción de TST fue de entre 6.70 °C (BA-Disp) a los 8.38 °C (BA-Agr int).

**Tabla 36**

Resultados de TST en el receptor 4 de los escenarios del cañón BA

<b>Receptor 4 – Bajo sombra de árbol</b>				
<b>Hora</b>	<b>BA-Base (°C)</b>	<b>BA-Disp</b>	<b>BA-Alin int</b>	<b>BA-Agr int</b>
01:00	15.57	+0.09	+0.09	+0.11
02:00	14.99	+0.09	+0.10	+0.11
03:00	14.34	+0.09	+0.09	+0.11
04:00	13.50	+0.10	+0.11	+0.12
05:00	13.13	+0.09	+0.10	+0.11
06:00	12.31	+0.07	+0.08	+0.09
07:00	15.08	-1.62	-0.42	-1.69
08:00	20.77	-0.37	-0.31	-0.36
09:00	25.90	-0.24	-0.19	-0.25
10:00	30.46	-0.25	-0.19	-0.33
11:00	33.96	-2.18	-2.76	-6.16
12:00	36.49	-3.55	-3.59	-7.60
13:00	37.75	-5.79	-5.80	-9.19
14:00	37.75	-6.70	-6.72	-8.38
15:00	36.32	-3.75	-3.85	-5.88
16:00	31.87	-2.77	-2.87	-4.43
17:00	24.82	-1.30	-1.36	-2.16
18:00	20.89	-0.45	-0.47	-0.85
19:00	18.87	-0.09	-0.09	-0.21
20:00	17.73	+0.07	+0.08	+0.07
21:00	16.50	+0.17	+0.18	+0.23
22:00	15.46	+0.22	+0.23	+0.31
23:00	14.89	+0.25	+0.26	+0.37

*Nota.* Gradiente de color (de menor a mayor) de valores de TST en el escenario BA-Base e indicación de aumento o disminución de TST en los escenarios de propuesta. Selección de los valores con mayor CE durante las horas críticas respecto al escenario BA-Base.

En este caso, la configuración de arbolado agrupada intercalada (BA-Agr int) fue la que logró mitigar en mayor medida la TST, con una reducción de entre 5.88 °C y 9.19 °C durante el horario crítico del día (12 h 00 - 15 h 00). Este mismo resultado se extiende al periodo cálido del día, que va de las 8 h 00 a las 16 h 00. En cuanto al aumento en la TST provocado por la integración de arbolado, este se identificó de entre las 20 h 00 a las 6 h 00, siendo el mayor incremento a las 23 h 00 por parte del escenario BA-Agr int. El escenario BA-Disp fue el que tuvo menor aumento de TST, estando entre los 0.07 °C y los 0.25 °C y, por el contrario, el escenario BA-Agr int presentó el mayor aumento de TST siendo de entre 0.07 °C y 0.37 °C.

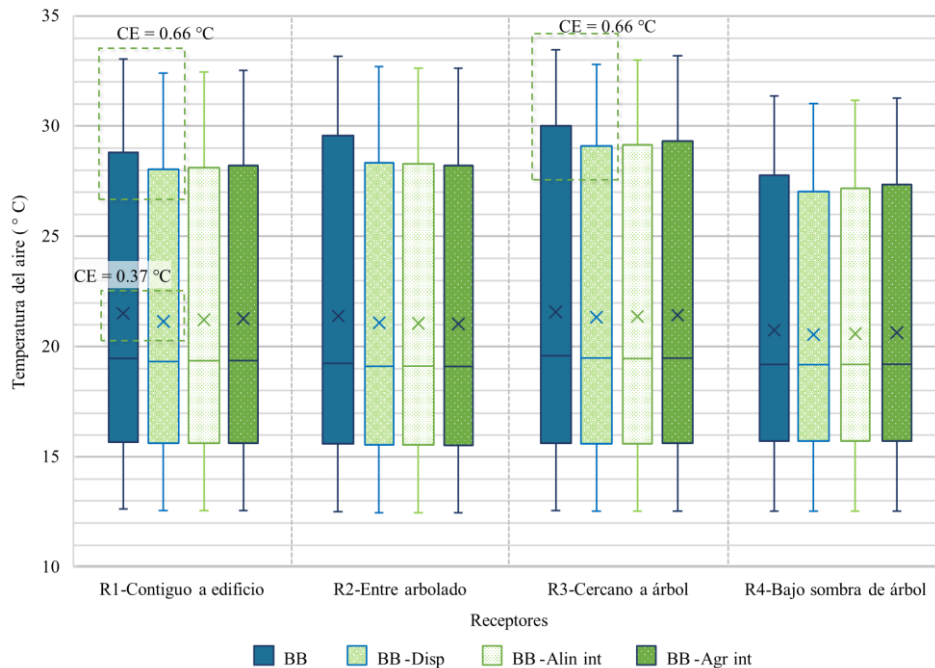
A partir de los resultados, se determina que para el cañón BA, la configuración que logró reducir en mayor medida la TST durante el periodo cálido del día fue la agrupada intercalada (BA-Agr int) y, aunque también provocó el registro de aumento de TST durante las horas con menor TST y Tair (ver en Apéndice 8) respecto al escenario base, este aumento estuvo entre los 0.08 °C y los 0.37 °C.

#### 4.2.4.2. Escenarios del cañón BB

Analizando las condiciones de Tair presentadas durante la simulación de los escenarios, en la Figura 44 se muestran los resultados por receptor para cada uno de los escenarios, en donde se observa que, de igual manera que en el cañón BA, los valores de Tair no tuvieron grandes variaciones entre los escenarios de propuesta, obteniendo una oscilación de la Tair media registrada por los receptores de 0.90 °C en los escenarios de propuesta y, de 1.03 °C comparando todos los escenarios.

**Figura 44**

Resultados de temperatura del aire de los receptores del cañón BB



*Nota.* Gráfico de comparación de los valores de Tair horaria obtenidos por receptor en la simulación de los escenarios del cañón BB. Indicación del mayor CE registrado en la Tair máxima y Tair media al comparar los escenarios de propuesta con el escenario base BB.

Respecto al mayor CE provocado por la integración de arbolado, sobre la Tair, se observó en todos los receptores a las 15 h 00, con valores de enfriamiento el R1 de 0.85 °C, en el R2 de 1.43 °C, en el R3 de 0.97 °C y en el R4 de 0.79 °C, identificando el escenario BB-Disp como el óptimo. En cuanto a la Tair máxima el CE fue de 0.66 °C por parte de la configuración dispersa (BB-Disp) en el R1 y R3 y, en la Tair media fue de 0.37 °C por parte del escenario BB-Disp en el R1.

Ahora, en cuanto a la identificación de la configuración de arbolado que generó un mejor CE, en la Tabla 37 se presentan los resultados de reducción de TST de cada uno de los escenarios respecto al escenario base, registrados en el R1. Para los escenarios BB-Disp y BB-Alin int, el mejor CE sobre la TST se presentó a las 9 h 00, siendo el mayor de 4.48 °C provocado por la configuración de arbolado dispersa. En cuanto al escenario BB-Agr int, el mayor CE se presentó a las 7 h 00 con 0.66 °C. Respecto al análisis del horario crítico del día, éste se determinó de igual manera que en el cañón BA, con los resultados obtenidos del escenario BB.

**Tabla 37**

Resultados de TST en el receptor 1 de los escenarios del cañón BB

Receptor 1 - Contiguo a edificio				
Hora	BB-Base (°C)	BB-Disp	BB-Alin int	BB-Agr int
01:00	15.72	-0.00	-0.02	-0.03
02:00	15.21	-0.00	-0.03	-0.03
03:00	14.57	-0.01	-0.03	-0.04
04:00	13.72	-0.00	-0.02	-0.03
05:00	13.38	-0.01	-0.04	-0.04
06:00	12.46	-0.00	-0.02	-0.03
07:00	14.79	-0.29	-0.60	-0.66
08:00	20.02	-3.18	-0.99	-0.18
09:00	24.98	-4.48	-2.17	-0.12
10:00	29.63	-1.14	-0.48	-0.08
11:00	33.38	-1.14	-0.48	-0.08
12:00	36.44	-1.36	-0.67	-0.10
13:00	38.28	-1.88	-1.06	-0.30
14:00	38.31	-1.99	-1.22	-0.48
15:00	36.53	-1.67	-1.12	-0.59
16:00	32.05	-1.17	-0.83	-0.51
17:00	25.77	-0.70	-0.54	-0.38
18:00	22.21	-0.37	-0.32	-0.24
19:00	20.15	-0.21	-0.21	-0.16
20:00	18.93	-0.14	-0.16	-0.13
21:00	17.64	-0.09	-0.12	-0.10
22:00	16.53	-0.05	-0.09	-0.08
23:00	15.89	-0.03	-0.08	-0.08

*Nota.* Gradiente de color (de menor a mayor) de valores de TST en el escenario BB-Base e indicación de aumento o disminución de TST en los escenarios de propuesta. Selección de los valores con mayor CE durante las horas críticas respecto al escenario BB-Base.

Con base a los resultados obtenidos en el R1, la configuración de arbolado dispersa (BB-Disp) fue la que mitigó en mayor medida la TST, con una reducción de entre 1.67 °C y 1.99 °C durante el horario crítico del día (13 h 00 - 15 h 00), fue también este escenario el que obtuvo un mejor CE sobre la TST durante el periodo cálido del día que va de las 8 h 00 a las 16 h 00, identificado en el análisis anterior de peste cañón. En cuanto al aumento en la TST

ocasionado por la integración de arbolado, en este receptor no se registró ningún valor de TST por encima de los del escenario base BB.

Continuando con el análisis de resultados, en la Tabla 38 se presenta la comparativa del CE de los escenarios de propuesta en el R2 (entre arbolado), en donde se observa que, a las 15 h 00 se presenta el mejor CE para el escenario BB-Alin int y BB-Agr int con una reducción de 5.76 °C y 7.87 °C respectivamente. Para el escenario BB-Disp el mejor CE fue a las 8 h 00 con 3.79 °C.

**Tabla 38**  
Resultados de TST en el receptor 2 de los escenarios del cañón BB

Receptor 2 – Entre arbolado				
Hora	BB-Base (°C)	BB-Disp	BB-Alin int	BB-Agr int
01:00	15.57	-0.02	+0.01	+0.02
02:00	15.05	-0.02	+0.02	+0.02
03:00	14.40	-0.02	+0.02	+0.02
04:00	13.56	-0.03	+0.01	+0.02
05:00	13.20	-0.02	+0.02	+0.03
06:00	12.32	-0.02	+0.01	+0.01
07:00	14.68	-1.46	-1.45	-1.50
08:00	19.96	-3.79	-3.85	-3.73
09:00	24.97	-0.65	-0.68	-0.77
10:00	29.54	-0.48	-0.46	-0.55
11:00	33.09	-0.48	-0.42	-0.53
12:00	35.96	-0.60	-0.50	-0.63
13:00	37.63	-0.93	-0.77	-0.91
14:00	37.94	-1.25	-1.09	-1.28
15:00	36.74	-1.58	-5.76	-7.87
16:00	32.40	-1.52	-5.09	-5.52
17:00	25.25	-0.66	-0.95	-1.13
18:00	21.32	-0.36	-0.43	-0.50
19:00	19.23	-0.21	-0.20	-0.22
20:00	18.05	-0.15	-0.10	-0.10
21:00	16.79	-0.11	-0.04	-0.03
22:00	15.71	-0.08	+0.01	+0.03
23:00	15.12	-0.06	+0.03	+0.05

*Nota.* Gradiente de color (de menor a mayor) de valores de TST en el escenario BB-Base e indicación de aumento o disminución de TST en los escenarios de propuesta. Selección de los valores con mayor CE durante las horas críticas respecto al escenario BB-Base.

De acuerdo con los resultados del R2, la configuración de arbolado agrupada intercalada (BB-Agr int) logró reducir en mayor medida la TST durante el horario crítico del día (13 h 00 - 15 h 00), disminuyendo de entre 0.91 °C a 7.87 °C respecto al escenario base, de igual manera, durante el periodo cálido del día de las 9 h 00 a las 16 h 00, fue este mismo escenario el más efectivo al mitigar la TST, quedando excluida las 8 h 00, en donde el escenario BB-Alin int obtuvo mejores resultados de enfriamiento. En cuanto al aumento de TST en los escenarios de

propuesta este se presentó entre las 22 h 00 y 6 h 00 en el escenario BB-Alin int y BB-Agr int con un aumento máximo de 0.03 °C y 0.05 °C respectivamente, a las 23 h 00, siendo la configuración dispersa la única que no aumentó los niveles de TST.

Respecto al análisis de resultados del R3 (cercano a árbol), a partir de los resultados de la comparativa del CE (Tabla 39) se identificó que, a las 16 h 00 se presenta el mejor CE de los escenarios BB-Alin int y el BB-Agr int, con una reducción de 0.67 °C y 0.52 °C respectivamente. Para el escenario BB-Disp el mayor CE fue a las 12 h 00 con 7.56 °C.

**Tabla 39**  
Resultados de TST en el receptor 3 de los escenarios del cañón BB

Receptor 3 – Cercano a árbol				
Hora	BB-Base (°C)	BB-Disp	BB-Alin int	BB-Agr int
01:00	15.60	+0.07	+0.01	0.00
02:00	15.08	+0.06	+0.01	0.00
03:00	14.43	+0.06	0.00	0.00
04:00	13.58	+0.07	+0.01	0.00
05:00	13.23	+0.06	0.00	-0.01
06:00	12.33	+0.07	+0.02	+0.01
07:00	13.30	+0.03	+0.02	+0.01
08:00	18.13	+0.07	+0.07	+0.04
09:00	24.56	-0.75	+0.26	+0.14
10:00	29.13	-4.93	+0.30	+0.17
11:00	32.70	-6.59	+0.31	+0.18
12:00	35.54	-7.56	+0.31	+0.17
13:00	37.23	-4.25	+0.14	+0.05
14:00	37.64	-4.91	-0.15	-0.14
15:00	36.68	-4.99	-0.48	-0.38
16:00	32.58	-3.89	-0.67	-0.52
17:00	25.62	-2.06	-0.46	-0.36
18:00	21.68	-0.99	-0.27	-0.22
19:00	19.57	-0.43	-0.19	-0.16
20:00	18.34	-0.18	-0.15	-0.13
21:00	17.05	-0.03	-0.12	-0.10
22:00	15.95	+0.06	-0.10	-0.09
23:00	15.32	+0.12	-0.09	-0.08

*Nota.* Gradiente de color (de menor a mayor) de valores de TST en el escenario BB-Base e indicación de aumento o disminución de TST en los escenarios de propuesta. Selección de los valores con mayor CE durante las horas críticas respecto al escenario BB-Base.

Continuando con en el análisis del R3, la configuración dispersa (BB-Disp) fue la que obtuvo un mayor CE sobre la TST, con una reducción de entre 4.25 °C a 4.99 °C durante el horario crítico del día (13 h 00 - 15 h 00), de igual manera, mantuvo un mejor CE durante el resto del periodo cálido del día, a excepción de las 8 h 00, en donde todos los escenarios aumentaron la TST de entre 0.04 °C (BA-Agr int) a 0.07 °C (BB-Disp y BB-Alin int). Continuando con la identificación del aumento en la TST, este tuvo lugar de la 1 h 00 a las 13

h 00 en los escenarios BB-Alin int y BB-Agr int, por lo que ocasionaron incrementos durante el periodo cálido del día, siendo el mayor a las 11 h 00 con 0.31 °C y 0.18 °C respectivamente. El escenario BB-Disp tuvo el mayor aumento de TST a las 23 h 00 con 0.12 °C y en este caso sólo a las 8 h 00 (correspondiente al periodo cálido del día) provocó un aumento de la TST.

En la Tabla 40 se presentan los resultados de la comparativa del CE de los escenarios de propuesta en el R4 (bajo sombra de árbol), a partir de los cuales se identificó que, a las 15 h 00 se presentó el mejor CE en los escenarios BB-Alin int y BB-Agr int con 6.15 °C y 7.21 °C respectivamente, en el caso del escenario BB-Disp, éste se presentó a las 8 h 00 con 3.79 °C.

**Tabla 40**  
Resultados de TST en el receptor 4 de los escenarios del cañón BB

Receptor 4 – Bajo sombra de árbol				
Hora	BB-Base (°C)	BB-Disp	BB-Alin int	BB-Agr int
01:00	15.55	+0.01	+0.04	+0.03
02:00	15.08	+0.01	+0.04	+0.04
03:00	14.44	+0.02	+0.04	+0.04
04:00	13.58	+0.02	+0.05	+0.04
05:00	13.26	+0.02	+0.05	+0.04
06:00	12.31	+0.02	+0.04	+0.03
07:00	14.12	-1.33	-1.29	-1.30
08:00	19.37	-3.79	-1.39	-1.39
09:00	24.38	-0.73	-0.57	-0.53
10:00	28.84	-0.57	-0.40	-0.37
11:00	32.27	-0.61	-0.36	-0.35
12:00	35.03	-0.70	-0.40	-0.41
13:00	36.50	-0.96	-0.52	-0.54
14:00	36.51	-1.17	-0.70	-0.78
15:00	35.13	-1.43	-6.15	-7.21
16:00	31.00	-1.27	-1.46	-4.75
17:00	24.59	-0.45	-0.47	-0.75
18:00	21.00	-0.19	-0.14	-0.28
19:00	19.06	-0.08	-0.02	-0.10
20:00	18.01	-0.03	+0.03	-0.02
21:00	16.80	+0.01	+0.07	+0.03
22:00	15.77	+0.02	+0.09	+0.06
23:00	15.25	+0.04	+0.10	+0.08

*Nota.* Gradiente de color (de menor a mayor) de valores de TST en el escenario BB-Base e indicación de aumento o disminución de TST en los escenarios de propuesta. Selección de los valores con mayor CE durante las horas críticas respecto al escenario BB-Base.

Para el R4, la configuración de arbolado agrupada intercalada fue la que logró mitigar en mayor medida la TST, con una reducción de entre 0.54 °C y 7.21 °C durante el horario crítico del día (13 h 00 - 15 h 00). Sin embargo, durante el periodo de las 8 h 00 a las 14 h 00 el escenario BA-Disp obtuvo valores mayores de enfriamiento. En cuanto al aumento en la TST provocado por la integración de arbolado, este se identificó entre las 21 h 00 a las 6 h 00 y, en

el caso del escenario BA-Alin int desde las 20 h 00, siendo el mayor incremento a las 23 h 00 por parte del escenario BA-Alin int con 0.10 °C. El escenario BA-Disp fue el que tuvo menores aumentos de TST, estando entre los 0.04 °C y los 0.01 °C.

A partir de los resultados, se determina que para el cañón BB, la configuración con mejor CE durante el periodo cálido del día fue la dispersa y, aunque también provocó el registro de aumento en la TST durante las horas con menor TST y Tair (ver en Apéndice 11), este estuvo entre los 0.12 °C y los 0.01 °C y solo se presentó en los receptores R3 y R4, a diferencia de los otros escenarios de propuesta que también registraron aumento de TST en el R2.

Para finalizar con la identificación de la configuración de arbolado óptima, como resultado del análisis generado en el cañón BA y BB, en las primeras horas del día se observó que la integración de arbolado en las configuraciones propuestas, provocaron un aumento en la TST, a excepción de la configuración dispersa en el cañón BB, aunque el aumento registrado no sobrepasó los 0.37 °C. En cuanto a las configuraciones, para el cañón BB la mejor configuración para mitigar la TST fue la dispersa, aunque la configuración agrupada intercalada también obtuvo buenos resultados de enfriamiento. Para el cañón BA, la configuración agrupada intercalada logró el mejor efecto de enfriamiento.

Comparando los resultados de CE obtenidos para el cañón BA, se identificó que el sitio con menor TST se presentó cercano a un árbol, de 3m a 7 m. Dentro del escenario óptimo del cañón BA (Agr int), el sitio antes mencionado presentó una TST de 28.63 °C en la hora crítica del día (12 h 00), mientras que en los demás puntos de análisis la TST tuvo diferencias de 0.26 °C a 11.17 °C, siendo más cálidos, encontrándose el punto más cálido en contiguo a un edificio. Para el caso del cañón BB en donde el sitio con menor TST fue el R4, dentro del escenario con configuración dispersa este sitio registró una TST de 35.54 °C durante la hora crítica del día (13 h 00) y, en los demás puntos de análisis la TST fue más cálida en el R1 (contiguo a edificio) por 0.86 °C y en el R2 (entre arbolado) por 1.16 °C, por el contrario, en el R3 (cercano a árbol) la TST fue menor por 2.56 °C. Para el escenario BB-Disp el sitio más cálido a las 13 h 00 fue entre el arbolado, aunque, contiguo a un edificio, fue en general el sitio más cálido para los escenarios del cañón BB durante el periodo cálido del día. En la Tabla 41 se resumen los hallazgos antes mencionados incluyendo las características de cada uno de los cañones analizados.

**Tabla 41**

Resumen de resultados de simulaciones microclimáticas

Cañón	Cobertura de suelo	Vegetación al centro del cañón	Configuración óptima	Mayor CE	Sitio con menor TST <sup>1</sup>				
					Receptor	Diferencia de TST <sup>2</sup>	Posición	Orientación	Superficie
BA	S-IMP: 13.97 % S-DES: 65.48 % A-CV: 5.76 %	No	Agrupada intercalada (BA-Agr int)	9.19 °C (13 h 00)	R3	11.17 °C	Cercana a árbol (de 3 m a 7 m al norte)	SEE	S-DES
BB	S-IMP: 23.45 % S-DES: 56.88 % A-CV: 5.76 %	Si	Dispersa (BB-Disp)	7.56 °C (12 h 00)	R4	1.16 °C	Bajo la sombra de árbol	N	S-DES

*Nota.* <sup>1</sup>El sitio con menor TST hace referencia a la ubicación del receptor que registró en mayor medida el mejor CE durante el periodo cálido del día. <sup>2</sup>Resultado de la diferencia de TST entre el receptor indicado y la mayor TST registrada por los receptores dentro del mismo escenario en el horario crítico del día (12 h 00 para el BA y 13 h 00 para el BB). S-IMP = Superficie impermeable, S-DES= Suelos desnudos, A-CV=Aumento de cobertura vegetal respecto al escenario base.



**DISCUSIÓN**

Como hallazgos del primer objetivo específico de la investigación, se determinó una correlación inversa entre el IVDN y la TST coincidiendo con lo identificado en investigaciones anteriores (Hashim et al., 2022; Kumari et al., 2018; Rahaman et al., 2021). En cuanto al aumento de la TST éste estuvo entre 6.62 °C y 8.47 °C del año 2018 al 2023, en otros estudios con periodos de análisis más amplios el aumento ha sido menor, por ejemplo, los autores Moisa et al. (2022) observaron un aumento de 5 °C debido a la disminución de la cubierta vegetal y al aumento de suelos desnudos de 1990 al 2020 y, en otro estudio en una ciudad con un clima similar al de San Quintín (BWh), el aumento fue de 6.8 °C de 1984 a 2020 (Hashim et al., 2022). A diferencia de esos estudios, en San Quintín, la disminución en el IVDN está relacionado el reciente proceso de urbanización y por lo tanto, a la construcción de edificios y superficies impermeables que producen incremento en la TST (Almeida et al., 2022). Respecto a las superficies que presentaron mayor TST promedio en el área de estudio, fueron suelos desnudos y superficies urbanizadas, coincidiendo esto con los resultados de los autores Hou & Estoque (2020).

Los hallazgos de la presente investigación respecto al objetivo específico dos determinaron las configuraciones de cobertura vegetal (en este caso de arbolado) óptimas para disminuir la TST en la unidad de observación. Contrario a lo que se ha determinado en estudios anteriores (Bartesaghi-Koc et al., 2020) al mantener en todos los escenarios el mismo tipo de cobertura de suelo y solo modificar la configuración de arbolado, ésta última si generó efectos significativos sobre la TST del cañón urbano, en el caso del BB, con variaciones de 4.36 °C en el R1, 6.29 °C en el R2, 7.87 °C en el R3 y 5.78 °C en el R4. En cuanto al cañón BA las variaciones fueron de 1.61 °C en el R1, 5.84 °C en el R2, 0.07 °C en el R3 y 4.05 °C en el R4. Es importante mencionar que, para el análisis del comportamiento de la TST, se consideró la Tair, las condiciones del viento y morfología urbana como parte de los factores que alteran el microclima dentro del cañón y por lo tanto el CE del arbolado (Cheng et al., 2022).

Como uno de los hallazgos respecto al tema de las configuraciones de cobertura vegetal, se presenta la identificación del escenario con la configuración de arbolado agrupada intercalada como la óptima para mitigar la TST registrada en el periodo cálido del día en el cañón BA, alcanzando un CE de 9.19 °C.

Durante la hora crítica del día, la interferencia de los flujos de viento cercano a las edificaciones a causa del arbolado pudo provocar el aumento de TST al interior de los predios y en la superficie al sur de las construcciones en el cañón BA. Contrario a lo anterior, se observó que el arbolado posicionado al norte de los escenarios analizados tanto del cañón BA como del cañón BB, provocaron un mayor alcance de CE en la superficie comparado con los árboles integrados al sur del cañón, esto podría deberse al efecto del flujo del viento que se mantuvo constante con orientación norte con una velocidad baja (1.08 m/s), lo que conduce a un efecto de enfriamiento de la Tair alrededor del árbol como lo reportaron Manickathan et al. (2018) y, por consiguiente, esto influye en el ambiente térmico del entorno, contribuyendo a la reducción de la TST.

Por otro lado, respecto al cañón BB se identificó la configuración dispersa como aquella que redujo en mayor medida la TST en el periodo cálido del día con una reducción de hasta 7.56 °C. La discrepancia del resultado entre la configuración óptima identificada para este cañón y el BA pudo deberse a las diferencias en la morfología urbana de los cañones, la presencia de vegetación al centro del cañón BB en el escenario base y, a la diferencia de los porcentajes de tipo de cobertura suelo que influyen por ejemplo en la interferencia de los flujos de viento, para el caso del escenario BB que presenta una mayor superficie impermeable relacionada con un mayor ambiente edificado. En cuanto al efecto refrescante de los árboles, el proceso de la evapotranspiración está relacionado con la temperatura de las hojas y, a su vez, ésta última es afectada por los intercambios de energía entre el árbol y su entorno (Feng et al., 2024). Respecto a la naturaleza distribuida de los árboles que generaron un mejor CE, los autores Wu et al. (2019) mencionan que, cada árbol puede alcanzar su máximo potencial para reducir la Tair (mediante la intercepción de la radiación solar y el proceso de evapotranspiración) a diferencia de configuraciones de árboles densamente agrupados con hojas superpuestas, lo que se traduce en un alto valor de LAI, por lo que, las condiciones base del cañón BB con presencia de vegetación en hilera al centro de la calle, pudo interferir en los resultados de la configuración óptima. Respecto a lo anterior, los autores Shi et al. (2020) demostraron que, cuanto mayor es el valor de LAI, mayor será la obstrucción del viento y, por tanto, el efecto de enfriamiento en la Tair disminuirá.

El aumento de TST presentado durante la noche tuvo mayor concurrencia en la configuración de arbolado Agr int aun siendo ésta una de las mejores configuraciones para reducir la TST durante el día y, lo anterior puede explicarse ya que, durante las horas donde incide la radiación solar sobre la superficie, las copas agrupadas de los árboles logran impedir su paso y evitar aumentos en la TST (Herath et al., 2024), sin embargo durante la noche, los materiales de las superficies del suelo emiten el calor que acumularon durante el día al recibir la radiación solar (Camilloni & Vera, 2003; NOAA, 2024) y, la obstrucción de este por parte de las copas con un alto LAI, generan que el calor se mantenga en el sitio, aumentando la Tair y la TST (Thom et al., 2016), contrario a lo que se observó para la configuración dispersa que provocó el menor aumento de TST durante la noche. Aunque el aumento no fue significativo para la configuración Agr int (hasta 0.37 °C) en comparación con los valores de CE generados, es importante considerarlo en la planeación de integración de arbolado para evitar el incremento de la TST en periodos de verano. La razón de que el aumento no fuera significativo pudo deberse a los intervalos entre agrupaciones que permitieron que no se obstruyera por completo la ventilación de la superficie por la noche, por lo que evitar la obstrucción del aire durante la noche es importante para evitar el sobrecalentamiento (Zölch et al., 2019). También, las bajas alturas de las edificaciones del cañón urbano que alcanzaron los 6 m en el cañón BA y 8 m en el BB, pudieron influir en la idea anterior (Morakinyo et al., 2020).

Otro punto a considerar es la cobertura vegetal total dentro de la unidad de observación, Zhao et al. (2020) determinaron que, el CE se presentó cuando el porcentaje de la cobertura vegetal fue inferior a 40 % e incrementó a medida que el índice de agregación<sup>1</sup> de la vegetación era superior. En el caso de los escenarios de propuesta del cañón BA, el porcentaje de cobertura vegetal fue de 26.29 %, a través del cual se logró el enfriamiento de 9.19 °C con la configuración Agr int, respecto al escenario base, lo que coincide con lo antes expuesto.

Como punto adicional, se determinó el sitio con menor TST registrada en cada uno de los cañones durante el periodo cálido del día (8 h 00 a las 16 h 00), siendo el sitio cercano a un árbol (de 3 m a 7 m) para el cañón BA. En el caso del cañón BB el sitio con menor TST durante este periodo fue bajo la sombra del arbolado, con una reducción máxima registrada, respecto al escenario base, de 7.21 °C a las 15 h 00, siendo esta hora parte del horario crítico del día respecto

---

<sup>1</sup>Va del 0 al 100 y se refiere al número de adyacencias similares, el 0 el igual a máximamente aislado y el 100 a agregado máximo.

a la TST, lo que coincide con los resultados de los autores Speak et al. (2020), quienes determinaron también un CE a la sombra del árbol durante las horas de mayor radiación del día, en este caso de 16.40, 12.90 y 8.50 °C para asfalto, pórfido y césped respectivamente.

En cuanto al mayor CE de la cobertura vegetal sobre la Tair observado, en el cañón BA, fue de 1.59 °C a las 15 h 00 por parte de la configuración alineada intercalada (BA-Alin int) en el R4. Por otro lado, en el cañón BB, el mayor CE se identificó de igual manera las 15 h 00 con la mayor reducción de Tair de 1.13 °C por parte de la configuración dispersa (BB-Disp) en el R2. En el caso de ambos cañones urbanos (BA y BB) el horario crítico del día respecto a la Tair se presentó de las 12 h 00 a las 14 h 00 por lo que, como se describió anteriormente el mayor CE no estuvo dentro del periodo más cálido del día, esto podría deberse a lo explicado por los autores Meili et al. (2021), quienes en un estudio sobre efecto de los árboles sobre el microclima urbano en una ciudad que comparte el tipo de clima de San Quintín (BWh), identificaron que, durante las horas del día en que los efectos de la radiación y estructura urbana aumentaron la Tair, el enfriamiento por la evapotranspiración fue decreciente. Lo anterior, enfatiza el hecho de que el efecto de enfriamiento del arbolado urbano no sólo depende de su estructura y propiedades físicas, sino que es afectado por las condiciones del microclima de su entorno (Morakinyo et al., 2020).

The page features a decorative background of palm fronds. A central rectangular area is highlighted with a semi-transparent green overlay. A thin black horizontal line crosses the page through the middle of this green area.

**CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES**

El objetivo principal que guió esta investigación fue evaluar a nivel microescala el efecto de enfriamiento de la configuración de cobertura vegetal sobre la TST de San Quintín, B. C. a partir de la identificación de la variabilidad espacio-temporal del uso de suelo/cobertura de suelo y su impacto sobre la TST. Este objetivo condujo a la formulación de la pregunta de investigación: ¿cuál es el efecto de enfriamiento de diferentes configuraciones de cobertura vegetal sobre la Temperatura Superficial Terrestre (TST) en San Quintín, B. C. y cuál de ellas es la óptima, considerando las condiciones físico-geográficas y del microclima?

Para dar respuesta a la pregunta anterior, se definieron dos objetivos específicos. Para el primero, se buscó establecer la relación espacio-temporal entre la TST y el uso de suelo/cobertura de suelo en San Quintín, B.C., lo anterior, al generar el análisis entre el IVDN y la TST en los últimos cinco años (2018 - 2023) mediante la técnica de sensores remotos, a través de la cual, se desarrolló el procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8-9. En cuanto al objetivo específico dos, la implementación de la técnica de simulación microclimática a través de software ENVI-met, permitió determinar el efecto de enfriamiento de la TST de diferentes configuraciones de cobertura vegetal.

### **Variabilidad de TST y su relación con el uso de suelo/cobertura de suelo**

Este análisis espacio-temporal tuvo como resultado la identificación del aumento de entre 6.62 °C y 8.47 °C en la TST del periodo analizado, así como la correlación inversa entre esta variable y el IVDN. Lo que lleva a determinar que la disminución de la vegetación (asociada al IVDN) ha provocado aumentos en el ambiente térmico del área de estudio. Los aumentos identificados se relacionaron con los procesos de urbanización que implicaron la disminución de cobertura vegetal y el aumento de superficies impermeables. También se determinó el tipo de cobertura de suelos desnudos como aquella que presentó los más altos niveles de TST y, por el contrario, los sitios con cuerpos de agua y con cubierta vegetal los más bajos, por lo que es importante la permanencia de la vegetación nativa del sitio y evitar la deforestación cuando las superficies aún no han sido urbanizadas.

### **Integración de arbolado urbano como estrategia de mitigación de la TST**

A partir de los hallazgos de la investigación, se determina que el aumento de cobertura vegetal ayuda a disminuir la TST y Tair durante el periodo cálido del día y que, la configuración

de la integración de arbolado si influye en el CE generado, con variaciones que van de los 0.07 °C a los 5.84 °C en los escenarios del cañón urbano BA y de los 4.36 °C a los 7.87 °C en los del cañón BB.

En cuanto a la identificación de las zonas con menor TST dentro de los cañones, la configuración de la cobertura vegetal también tuvo influencia en los resultados, como se observó en el cañón BB, donde las superficies bajo la sombra del arbolado presentaron una menor TST durante las horas críticas del día, siendo 7.21 °C más fresco que el escenario base, sin embargo, el resultado de CE difiere en los demás escenarios de propuesta donde, si bien el sitio bajo la sombra del árbol también fue el más fresco en el caso del BB-Alin int, el valor de enfriamiento fue 1.06 °C menor.

La consideración del flujo del viento en el cañón urbano reflejó importancia al incrementar el alcance del CE del arbolado que se vio en principio impactado por el viento proveniente del norte, durante el horario crítico del día, lo anterior, debido a que el viento tiene influencia en el proceso de evapotranspiración de los árboles, siendo ésta una de sus principales fuentes de enfriamiento junto con el sombreado. Por el contrario, en la sección sur la interferencia del arbolado y morfología urbana respecto al viento, incrementó el nivel de TST al interior los predios.

### **Configuración de arbolado óptima en la reducción de TST**

Los resultados mostraron que, para el cañón BA el escenario con mayor potencial para disminuir la TST considerando las condiciones físico-geográficas del sitio, fue el BA-Agr int con un CE máximo de 9.19 °C. En cuanto al cañón BB la configuración dispersa fue la óptima al disminuir hasta 7.56 °C la TST. Respecto al aumento de temperatura presente durante la noche, identificado también en las dos configuraciones óptimas, se recomienda evitar la obstrucción del aire durante este periodo, a través de los intervalos y mantener la cobertura vegetal por debajo del 40 % (Zhao et al., 2020) para prevenir el sobrecalentamiento.

En cuanto a la hipótesis planteada, sobre la indicación de la configuración de cobertura vegetal agrupada intercalada como la óptima para reducir la TST al dirigirla a obtener una mayor superficie sombreada, ésta se comprobó en el cañón BA, contrario al resultado del cañón BB, debido a que la capacidad de CE de las configuraciones no dependió sólo de su estructura misma

(al provocar sombrero y el proceso de evapotranspiración de los árboles), sino que también influyeron los componentes de la morfología urbana de cada cañón y la caracterización climática propia del sitio, mismas que tienen influencia en el ambiente térmico del cañón.

Ahora bien, respecto a la integración de la especie arbórea *Tecoma stans*, ésta fue la óptima para incluir en las banquetas. Para la inclusión de este arbolado en banquetas, se considera el ambiente urbano de ambos cañones analizados, mismo que incluye usos de suelo de tipo residencial y se identificaron en menor medida comercios pequeños, lo que genera la necesidad de acceso vehicular hacia los predios, limitando la disponibilidad de áreas sobre la banqueta para la distribución del arbolado. Respecto a la configuración Disp, siendo la óptima del cañón BA, el intervalo entre elementos fue de 8 m y, considerando el ancho regular para el acceso vehicular de 5.50 m en cocheras dobles, esta configuración no interfiere con la movilidad vehicular. En cuanto a la configuración Agr int, identificada como una de las óptimas, los grandes intervalos de 18 m entre agrupaciones y la necesidad de espacio disponible de sólo 10 m para las agrupaciones, permiten flexibilidad para evitar la obstrucción de los accesos.

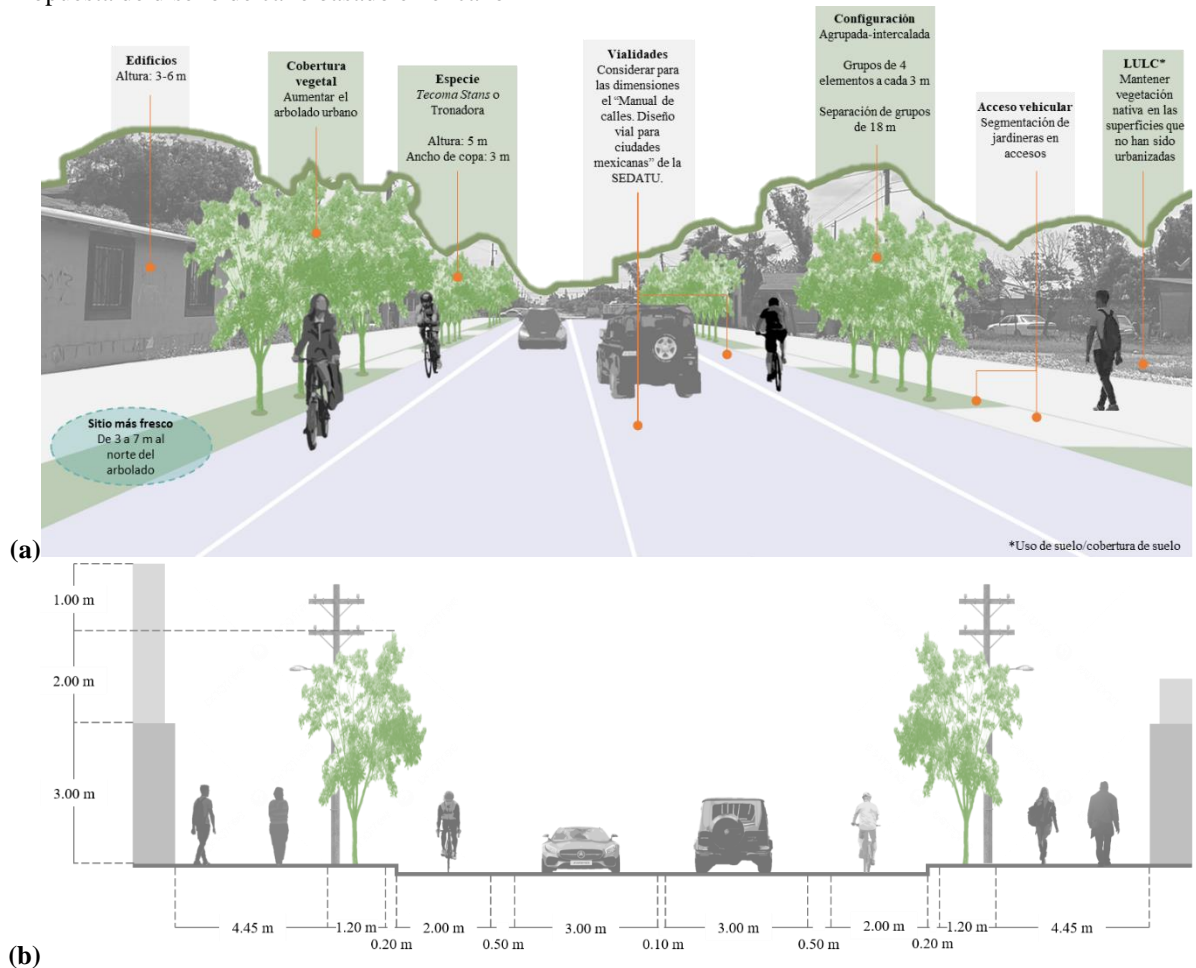
Esta investigación tiene como aportación la generación de conocimiento en la configuración del espacio público en San Quintín y, en zonas que comparten características físico-geográficas de la unidad de observación, que permitirá a los desarrolladores urbanos, personas involucradas en el diseño del espacio público y aquellas interesadas en el tema, tomar decisiones en la integración de arbolado en los cañones urbanos que no sólo mitiguen la TST sino que ayuden a prevenir el efecto SUHI en zonas como en el caso del área de estudio, que se encuentra en proceso de urbanización y por consiguiente, ayuden a la prevención de la generación de una ICU. Para el caso de los sitios que compartan características con los cañones urbanos aquí analizados y que se encuentran ya con un grado de urbanización mayor, en donde las superficies construidas en banquetas reducen la disponibilidad de áreas a intervenir, la elección del tipo de configuración de arbolado óptima aquí identificada, puede ayudar a mitigar los efectos de la ICU. Esta aportación atiende los objetivos once y trece de los objetivos de desarrollo sostenible de la ONU y apoyando al Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático del CONAHCYT.

Con base a los hallazgos y conclusiones obtenidas, se presenta en la Figura 45 la representación de la propuesta del diseño óptimo de calles basado en la caracterización del cañón

BA analizado de la unidad de observación en San Quintín, así como la indicación del sitio con menor TST durante el horario crítico del día. También se incluye en la propuesta el diseño de vialidades con dimensiones basado en el manual de calles de la SEDATU (s/f).

**Figura 45**

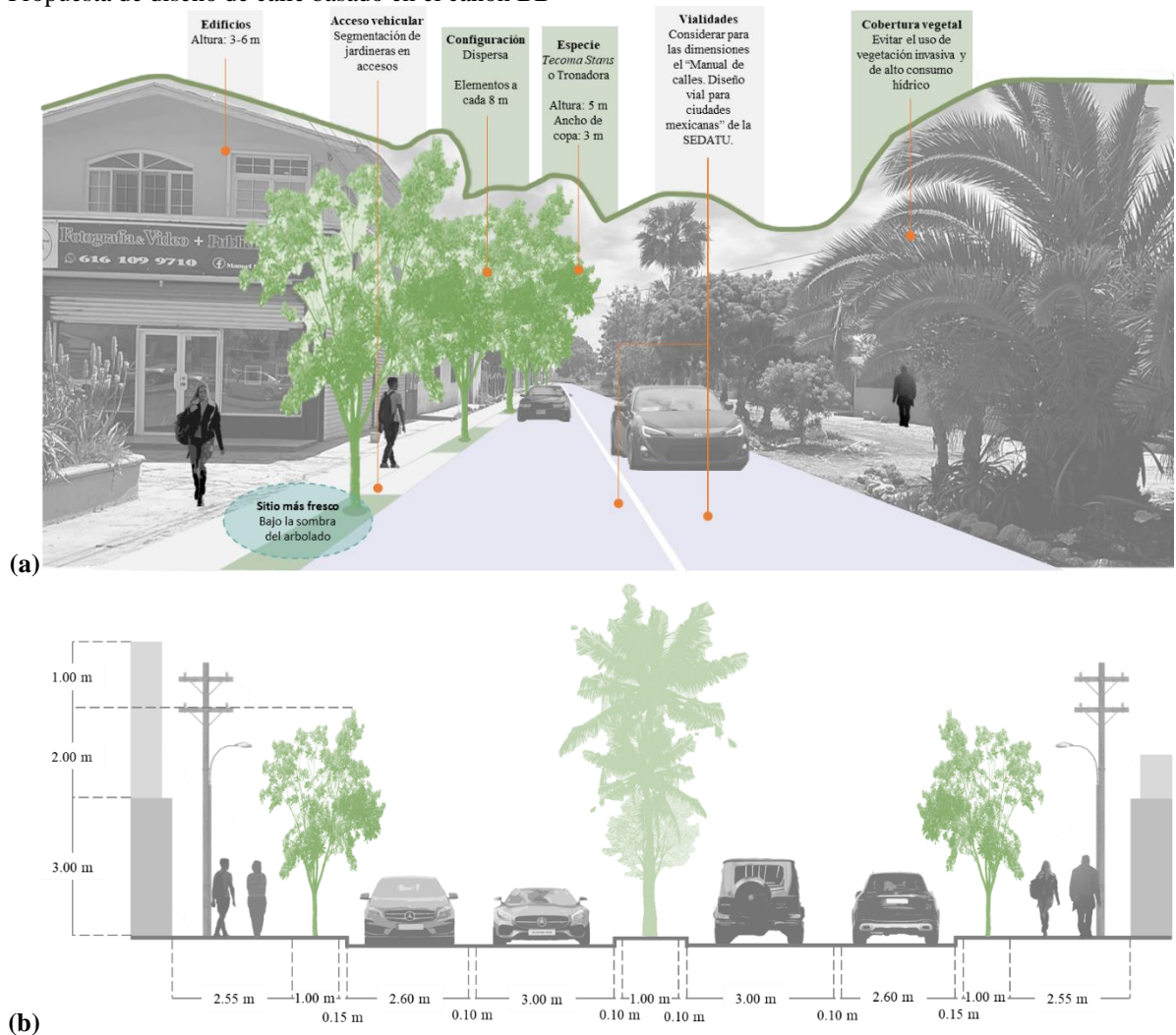
Propuesta de diseño de calle basado en el cañón BA



**Nota.** (a) Recomendaciones para el diseño de calles en San Quintín, B. C. y sitios que mantengan características similares al cañón BA y a la unidad de observación con clasificación climática Köppen BWh (desértico cálido) y clasificación de ZCL 6<sub>fb</sub>. (b) Alzado con dimensiones de la propuesta basadas en el “Manual de calles. Diseño vial para ciudades mexicanas” por SEDATU (s/f).

Por otro lado, en la Figura 46 se incluye la propuesta de diseño de calle de acuerdo a los resultados obtenidos para el cañón urbano BB, que, a diferencia del anterior, incluía originalmente vegetación al centro de la calle por lo que, basado en el manual de calles consultado, las dimensiones o propuesta de vialidades es distinta.

**Figura 46**  
Propuesta de diseño de calle basado en el cañón BB



*Nota.* (a) Recomendaciones para el diseño de calles en San Quintín, B. C. y sitios que mantengan características similares al cañón BB y a la unidad de observación con clasificación climática Köppen BWh (desértico cálido) y clasificación de ZCL 6<sub>FB</sub>. (b) Alzado con dimensiones de la propuesta basadas en el "Manual de calles. Diseño vial para ciudades mexicanas" por SEDATU (s/f).

### Futuras investigaciones

Si bien, no surgió una configuración que fuera la más efectiva en todas las ubicaciones de los cañones urbanos analizados, incluso estando dentro de la misma unidad de observación, esto enfatiza la necesidad de realizar este tipo de estudios antes de intervenir el entorno urbano. Con base a los temas desarrollados y conclusiones obtenidas, se recomienda:

- La selección de la especie para propuesta en entornos urbanos debería integrar criterios que consideren la adaptación de ésta en entornos urbanos, como lo es la compactación de raíces por banquetas y otras superficies a nivel de suelo entre otros, como lo presentan los autores Mehdipour et al. (2023), por lo que se sugiere para futuras investigaciones plantear la pregunta ¿cuáles son las características óptimas de arbolado urbano para integrar en sitios con clima BWh (desértico cálido)?
- Además de la TST, se debería incluir en el análisis, variables como la Tair, Trm (temperatura radiante media), viento y radiación, así como métricas de confort térmico para comprender mejor el fenómeno de la ICU y cómo ésta es percibida por la población, lo que podría abordarse bajo la pregunta ¿qué configuración de cobertura vegetal tiene un mayor impacto en la regulación del ambiente térmico urbano?
- Como parte de la caracterización de la unidad de observación, se recomienda clasificarla de acuerdo a las ZCL así como determinar su clasificación climática de Köppen-Geiger, de manera que, las investigaciones realizadas puedan ser identificadas y reproducibles en sitios que compartan las mismas características.
- Se recomienda realizar este tipo de investigaciones en sitios que aún están en desarrollo para prevenir los efectos de la generación de ICU, así como prestar atención a climas cálidos y secos, en donde los efectos por sobrecalentamiento son mayores y la vegetación que puede proponerse debe considerar factores como la disponibilidad del recurso hídrico, a diferencia de otros tipos de climas.
- Además se sugiere considerar los resultados obtenidos en la presente investigación en la generación de instrumentos de planeación urbana propios de San Quintín que suplan los que actualmente fueron adaptados debido a la reciente creación del municipio, como lo es el Reglamento de Parques y Jardines del Municipio de Ensenada, Baja California.



**REFERENCIAS**

---

- Acero, J. A., Koh, E. J. Y., Ruefenacht, L. A., & Norford, L. K. (2021). Modelling the influence of high-rise urban geometry on outdoor thermal comfort in Singapore. *Urban Climate*, 36(January), 100775. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100775>
- AgriMetSoft. (2019). *Online Calculators*. <https://agrimetsoft.com/calculators/Index> of Agreement
- Aguilera, F., Rodríguez, V., & Gómez, M. (2018). Definición de infraestructuras verdes: una propuesta metodológica integrada mediante análisis espacial. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 64(2), 313. <https://doi.org/10.5565/rev/dag.419>
- Aik, J., Ismail, M. H., & Muharam, F. M. (2020). Land Use/Land Cover Changes and the Relationship with Land Surface Temperature Using Landsat and MODIS Imageries in Cameron Highlands, Malaysia. *Land*, 9(372), 1–23.
- Al-Obaidi, K. M., Ismail, M., & Abdul Rahman, A. M. (2014). Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review. *Frontiers of Architectural Research*, 3(3), 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2014.06.002>
- Alavipanah, S., Wegmann, M., Qureshi, S., Weng, Q., & Koellner, T. (2015). The role of vegetation in mitigating urban land surface temperatures: A case study of Munich, Germany during the warm season. *Sustainability (Switzerland)*, 7(4), 4689–4706. <https://doi.org/10.3390/su7044689>
- Ali, S. A., Parvin, F., & Ahmad, A. (2022). Retrieval of Land Surface Temperature from Landsat 8 OLI and TIRS: A Comparative Analysis Between Radiative Transfer Equation-Based Method and Split-Window Algorithm. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s41976-022-00079-0>
- Almeida, C. R. de, Furst, L., Gonçalves, A., & Teodoro, A. C. (2022). Remote Sensing Image-Based Analysis of the Urban Heat Island Effect in Bragança, Portugal. *Environments - MDPI*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/environments9080098>
- Arauz, C., & Marzo, M. (2021). Las Soluciones basadas en la Naturaleza como herramienta para mitigar el cambio climático. *Ambienta*, 127, 24–31. <https://www.icerda.org/wp-content/uploads/2021/03/127-ARTICULO-SbN-MITIGAR-CAMBIO-CLIMATICO.pdf>

- Arias, J. L. (2012). Guía para elaborar la operacionalización de variables. *Revista Espacio I+D Innovación más Desarrollo*, X(28), 42–56. <https://doi.org/10.31644/imasd.28.2021.a02>
- Arunachalam, M., Joshua, R. M., Kochuparampil, A. J., & Saravanel, J. (2022). ArcOLITIRS: A Toolbox for Radiometric Calibration and Surface Temperature Estimation from Landsat 8 Products in ArcGIS Environment. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, December 2022. <https://doi.org/10.1007/s12524-022-01636-2>
- Auntarin, C., Chunpang, P., Chokkuea, W., & Loasuwan, T. (2021). Using a split-window algorithm for the retrieval of the land surface temperature via landsat-8 OLI/TIRS. *Geographia Technica*, 16(2), 30–42. <https://doi.org/10.21163/GT>
- Automateexcel. (2022). *Cómo Calcular la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) – Excel y Google Sheets*. <https://www.automateexcel.com/es/stats/calcular-la-raiz-del-error-cuadratico-medio/>
- Ayuntamiento de Ensenada. (2008). *Reglamento de parques y jardines del Municipio de Ensenada, Baja California*.
- Bachir, N., Bounoua, L., Aiche, M., Maliki, M., Nigro, J., & El Ghazouani, L. (2021). The simulation of the impact of the spatial distribution of vegetation on the urban microclimate: A case study in Mostaganem. *Urban Climate*, 39(March), 100976. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100976>
- Badaro-Saliba, N., Adjizian-Gerard, J., Zaarour, R., & Najjar, G. (2021). LCZ scheme for assessing Urban Heat Island intensity in a complex urban area (Beirut, Lebanon). *Urban Climate*, 37(April), 100846. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100846>
- Balany, F., Ng, A. W. M., Muttill, N., Muthukumaran, S., & Wong, M. S. (2020). Green infrastructure as an urban heat island mitigation strategy—a review. *Water (Switzerland)*, 12(12), 1–22. <https://doi.org/10.3390/w12123577>
- Barbierato, E., Bernetti, I., Capecchi, I., & Saragosa, C. (2019). Quantifying the impact of trees on land surface temperature: a downscaling algorithm at city-scale. *European Journal of Remote Sensing*, 52(sup4), 74–83. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1646104>
- Bartesaghi-koc, C., Osmond, P., & Peters, A. (2021). Innovative use of spatial regression

- models to predict the effects of green infrastructure on land surface temperatures Local Indicators of Spatial Association. *Energy & Buildings*, 254, 111564. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111564>
- Bartesaghi-Koc, C., Osmond, P., & Peters, A. (2019). Mapping and classifying green infrastructure typologies for climate-related studies based on remote sensing data. *Urban Forestry and Urban Greening*, 37(July 2017), 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.11.008>
- Bartesaghi-Koc, C., Osmond, P., & Peters, A. (2020). Quantifying the seasonal cooling capacity of ‘green infrastructure types’ (GITs): An approach to assess and mitigate surface urban heat island in Sydney, Australia. *Landscape and Urban Planning*, 203(June), 103893. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103893>
- Bobbitt, Z. (2021). *How to Calculate Mean Absolute Error in Excel (Step-by-Step)*. <https://www.statology.org/mean-absolute-error-excel/>
- Burga Ríos, M. (2016). Incremento de la deforestación y sus consecuencias en la pérdida de biomasa en los bosques de la provincia alto amazonas del departamento de Loreto, 2000-2014. En *Universidad Científica del Perú*. <http://repositorio.ucp.edu.pe/handle/UCP/107>
- Camilloni, I., & Vera, C. (2003). La Atmósfera. *Explora: Las Ciencias En El Mundo Contemporáneo*, 1, 16. <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL002316.pdf>
- Cao, X., Tang, B., Zou, X., & He, L. (2015). Analysis on the cooling effect of a heat-reflective coating for asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 16(3), 716–726. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1026383>
- Chang, Y., Xiao, J., Li, X., Middel, A., Zhang, Y., Gu, Z., Wu, Y., & He, S. (2021). Exploring diurnal thermal variations in urban local climate zones with ECOSTRESS land surface temperature data. *Remote Sensing of Environment*, 263(April), 112544. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112544>
- Cheela, V. R. S., Michele, J., Wahidul, B., & Prabir, S. (2021). Combating Urban Heat Island Effect—A Review of Reflective Pavements and Tree Shading Strategies. *Buildings*, 11(93), 1–24.

- Chen, J., Jin, S., & Du, P. (2020). Roles of horizontal and vertical tree canopy structure in mitigating daytime and nighttime urban heat island effects. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 89(December 2019), 102060. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102060>
- Chen, Y., Zheng, B., & Hu, Y. (2020). Mapping local climate zones using arcGIS-based method and exploring land surface temperature characteristics in Chenzhou, China. *Sustainability (Switzerland)*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/su12072974>
- Cheng, X., Peng, J., Dong, J., Liu, Y., & Wang, Y. (2022). Non-linear effects of meteorological variables on cooling efficiency of African urban trees. *Environment International*, 169(5), 107489. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107489>
- Cheung, P. K., Jim, C. Y., & Hung, P. L. (2021). Preliminary study on the temperature relationship at remotely-sensed tree canopy and below-canopy air and ground surface. *Building and Environment*, 204(July), 108169. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108169>
- Collaboration for Environmental Evidence. (2013). *Guidelines for Systematic Review and Evidence Synthesis in Environmental Management*. March, 80. <http://www.environmentalevidence.org/wp-content/uploads/2014/06/Review-guidelines-version-4.2-final.pdf>
- Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI). (s/f). *Selvas cálidas secas. Paleta de especies*.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (s/f-a). *EncicloVida*. <https://enciclovida.mx/>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (s/f-b). *Prosopis juliflora*.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (s/f-c). *Tecoma stans*. [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info\\_especies/arboles/doctos/12-bigno8m.PDF](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/12-bigno8m.PDF)
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. (s/f). *Cambio climático afecta los sectores agrícola y de salud en Baja California*. <https://centrosconacyt.mx/objeto/cambio-climatico-afecta->

a-los-sectores-agricola-y-de-salud-en-baja-california/

- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCYT). (2022). *Energía y Cambio climático*. <https://conacyt.mx/pronaces/pronaces-energia-y-cambio-climatico/>
- Costanzini, S., Despini, F., Beltrami, L., Fabbi, S., Muscio, A., & Teggi, S. (2022). Identification of SUHI in Urban Areas by Remote Sensing Data and Mitigation Hypothesis through Solar Reflective Materials. *Atmosphere*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/atmos13010070>
- Crank, P. J., Middel, A., Wagner, M., Hoots, D., Smith, M., & Brazel, A. (2020). Validation of seasonal mean radiant temperature simulations in hot arid urban climates. *Science of the Total Environment*, 749, 141392. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141392>
- Cubas Martins, R. (s/f). *Arquitectura paisajista*.
- Das, S., Ghosh, A., Hazra, S., Ghosh, T., Safra de Campos, R., & Samanta, S. (2020). Linking IPCC AR4 & AR5 frameworks for assessing vulnerability and risk to climate change in the Indian Bengal Delta. *Progress in Disaster Science*, 7, 100110. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2020.100110>
- Degirmenci, K., Desouza, K. C., Fieuw, W., Watson, R. T., & Yigitcanlar, T. (2021). Understanding policy and technology responses in mitigating urban heat islands: A literature review and directions for future research. *Sustainable Cities and Society*, 70(March), 102873. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102873>
- Deilami, Kaveh, Kamruzzaman, MD, & Liu, Y. (2018). Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures School of Earth and Environmental Sciences, The University of Queensland, Australia School of Civil Engineering and Built Environment,. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 67, 30–42.
- Del Rio, M. A., Asawa, T., & Hirayama, Y. (2020). Modeling and validation of the cool summer microclimate formed by passive cooling elements in a semi-outdoor building space. *Sustainability (Switzerland)*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/su12135360>
- Delgado, M., Pérez, C., García, C., Martínez, I., Acosta, M., & López, O. (2021). *Paleta Vegetal*.

*Guía de plantas nativas. Tijuana, Baja California* (Primera Ed).

- Derdouri, A., Wang, R., Murayama, Y., & Osaragi, T. (2021). Understanding the links between land use changes and urban heat island in cities: Insights from two-decadal studies (2001–2020). *Remote Sensing*, *13*(18). <https://doi.org/10.3390/rs13183654>
- Duan, S. B., Li, Z. L., Wang, C., Zhang, S., Tang, B. H., Leng, P., & Gao, M. F. (2019). Land-surface temperature retrieval from Landsat 8 single-channel thermal infrared data in combination with NCEP reanalysis data and ASTER GED product. *International Journal of Remote Sensing*, *40*(5–6), 1763–1778. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1460513>
- Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (2021). *Landsat Collection 2 Data Dictionary*. [https://www.usgs.gov/centers/eros/science/landsat-collection-2-data-dictionary#image\\_quality\\_landsat\\_8-9](https://www.usgs.gov/centers/eros/science/landsat-collection-2-data-dictionary#image_quality_landsat_8-9)
- Ejiagha, I. R., Ahmed, M. R., Hassan, Q. K., Dewan, A., Gupta, A., & Rangelova, E. (2020). Use of remote sensing in comprehending the influence of Urban landscape's composition and configuration on land surface temperature at neighbourhood scale. *Remote Sensing*, *12*(15). <https://doi.org/10.3390/RS12152508>
- ENVI-met. (2023). *ENVI-met Applications Homepage*. <https://envi-met.info/doku.php?id=apps:start>
- ENVI-met GmbH. (2023). *Software ENVI-met*. <https://www.envi-met.com/es/>
- European Space Agency. (s/f). *MultiSpectral Instrument (MSI) Overview*. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>
- EXOS. (2024). *Schinus terebinthifolia Raddi*. <https://www.biodiversidadcanarias.es/exos/especie/E06784>
- Fan, H., Yu, Z., Yang, G., Liu, T. Y., Liu, T. Y., Hung, C. H., & Vejre, H. (2019). How to cool hot-humid (Asian) cities with urban trees? An optimal landscape size perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, *265*(November 2018), 338–348. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.027>
- Feng, L., Shuai, L., Zhou, Y., Zhang, X., & Sun, J. (2024). Improving the green space

- arrangement in residential areas from the perspective of tree leaf temperature utilizing scenario simulation in ENVI-met. *Science of the Total Environment*, 918(January), 170650. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170650>
- Feng, L., Yang, S., Zhou, Y., & Shuai, L. (2021). Exploring the effects of the spatial arrangement and leaf area density of trees on building wall temperature. *Building and Environment*, 205(August), 108295. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108295>
- Ferrini, F., Fini, A., Mori, J., & Gori, A. (2020). Role of vegetation as a mitigating factor in the urban context. *Sustainability (Switzerland)*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/su12104247>
- Fischer, E., Detommaso, M., Martinico, F., Nocera, F., & Costanzo, V. (2022). A risk index for assessing heat stress mitigation strategies. An application in the Mediterranean context. *Journal of Cleaner Production*, 346(March), 131210. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131210>
- Forouzandeh, A. (2018). Numerical modeling validation for the microclimate thermal condition of semi-closed courtyard spaces between buildings. *Sustainable Cities and Society*, 36(July 2017), 327–345. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.07.025>
- Gallo, K. P., McNab, A. L., Karl, T. R., Brown, J. F., Hood, J. J., & Tarpley, J. D. (1993). The use of a vegetation index for assessment of the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing*, 14(11), 2223–2230. <https://doi.org/10.1080/01431169308954031>
- García-Santos, V., Cuxart, J., Martínez-Villagrasa, D., Jiménez, M. A., & Simó, G. (2018). Comparison of three methods for estimating land surface temperature from Landsat 8-TIRS Sensor data. *Remote Sensing*, 10(9), 1–13. <https://doi.org/10.3390/rs10091450>
- Gobierno Autónomo Municipal de Santa Cruz de la Sierra. (s/f). *Tocotoco*. [https://gmsantacruz.gob.bo/alboles\\_de\\_mi\\_ciudad/tocotoco/](https://gmsantacruz.gob.bo/alboles_de_mi_ciudad/tocotoco/)
- Goodess, C., Berk, S., Ratna, S. B., Brousse, O., Davies, M., Heaviside, C., Moore, G., & Pineo, H. (2021). Climate change projections for sustainable and healthy cities. *Buildings and Cities*, 2(1), 812. <https://doi.org/10.5334/bc.111>
- Google. (s/f). *Google Earth*. <https://earth.google.com/web/?hl=es-419>

- Grupo Banco Mundial. (2022). *Desarrollo urbano: Panorama general*. <https://www.bancomundial.org/es/topic/urbandevelopment/overview#:~:text=En la actualidad%2C alrededor del,10 personas vivirán en ciudades>
- Guo, S., Yang, F., & Jiang, Z. (2022). Thermal environmental effects of vertical greening and building layout in open residential neighbourhood design: a case study in Shanghai. *Architectural Science Review*, 65(1), 72–88. <https://doi.org/10.1080/00038628.2021.1916427>
- Haber, I., & Bencsik, G. (2018). Designing measuring instrument for validation of city simulations. *4th International Interdisciplinary 3D Conference, December*. [https://www.researchgate.net/publication/329512102\\_Designing\\_measuring\\_instrument\\_for\\_validation\\_of\\_city\\_simulations](https://www.researchgate.net/publication/329512102_Designing_measuring_instrument_for_validation_of_city_simulations)
- Halper, E. B., Scott, C. A., & Yool, S. R. (2012). Correlating Vegetation, Water Use, and Surface Temperature in a Semiarid City: A Multiscale Analysis of the Impacts of Irrigation by Single-Family Residences. *Geographical Analysis*, 44(3), 235–257. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2012.00846.x>
- Hashim, B. M., Al Maliki, A., Sultan, M. A., Shahid, S., & Yaseen, Z. M. (2022). Effect of land use land cover changes on land surface temperature during 1984–2020: a case study of Baghdad city using landsat image. *Natural Hazards*, 112(2), 1223–1246. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05224-y>
- Hasnat, G. N. T. (2021). A Time Series Analysis of Forest Cover and Land Surface Temperature Change Over Dudpukuria-Dhopachari Wildlife Sanctuary Using Landsat Imagery. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4(August), 1–12. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.687988>
- Hayes, A. T., Jandaghian, Z., Lacasse, M. A., Gaur, A., Lu, H., Laouadi, A., Ge, H., & Wang, L. (2022). Nature-Based Solutions (NBSs) to Mitigate Urban Heat Island (UHI) Effects in Canadian Cities. *Buildings*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/buildings12070925>
- He, C., Zhou, L., Yao, Y., Ma, W., & Kinney, P. L. (2021). Cooling effect of urban trees and its spatiotemporal characteristics: A comparative study. *Building and Environment*, 204(June), 108103. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108103>

- Herath, P., Bai, X., Jin, H., & Thatcher, M. (2024). Does the spatial configuration of urban parks matter in ameliorating extreme heat? *Urban Climate*, 53(May 2023), 101756. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101756>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación* (McGRAW-HIL Education (ed.)).
- Hidalgo-García, D., & Arco-Díaz, J. (2022). *Modeling the Surface Urban Heat Island (SUHI) to study of its relationship with variations in the thermal field and with the indices of land use in the metropolitan area of Granada (Spain)*. 87(May). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104166>
- Hou, H., & Estoque, R. C. (2020). Detecting Cooling Effect of Landscape from Composition and Configuration: An Urban Heat Island Study on Hangzhou. *Urban Forestry and Urban Greening*, 53(November 2019), 126719. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126719>
- Houspanossian, J., Giménez, R., Jobbágy, E., & Noretto, M. (2017). Surface albedo raise in the South American Chaco: Combined effects of deforestation and agricultural changes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.015>
- Hu, Y., Dai, Z., & Guldmann, J. M. (2021). Greenspace configuration impact on the urban heat island in the Olympic Area of Beijing. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(25), 33096–33107. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12086-z>
- HUBBLESITE. (2022). *The Electromagnetic Spectrum*. [https://hubblesite.org/contents/articles/the-electromagnetic-spectrum#:~:text=The electromagnetic spectrum describes all,portion of the electromagnetic spectrum.](https://hubblesite.org/contents/articles/the-electromagnetic-spectrum#:~:text=The%20electromagnetic%20spectrum%20describes%20all,portion%20of%20the%20electromagnetic%20spectrum.)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (s/f-a). *[Mapa Digital de México]*. Recuperado el 12 de octubre de 2022, de <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjZlZlMyMDA4LGxvbjotMTAxLjUwMDAwLHo6MSxsOmMxMTFzZXJ2aWNpb3N8dGMxMTFzZXJ2aWNpb3M=>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (s/f-b). *Espacio y datos de México*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (s/f-c). *Geografía y Medio Ambiente. Edafología*. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/#mapas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (s/f-d). *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)*. [https://www.inegi.org.mx/investigacion/ndvi/#:~:text=El NDVI es el más,e infrarroja \(infrarrojo cercano\)](https://www.inegi.org.mx/investigacion/ndvi/#:~:text=El NDVI es el más,e infrarroja (infrarrojo cercano))
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). Panorama sociodemográfico de México 2020. Baja California. *Censo de Población y Vivienda 2020.*, 48. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825197858.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197858.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022a). *Aspectos geográficos. Baja California. 2021*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022b). *Mapa digital de México*.
- ISO 7726. (1998). Iso 7726. *Ergonomics of the thermal environment, 1998*.
- Jabbar, & Yusoff, M. M. (2022). Assessing the Spatiotemporal Urban Green Cover Changes and Their Impact on Land Surface Temperature and Urban Heat Island in Lahore (Pakistan) Research Paper. *Geography, Environment, Sustainability*, 15(1), 122–140. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-005>
- Jamei, E., Seyedmahmoudian, M., Horan, B., & Stojcevski, A. (2019). Verification of a bioclimatic modeling system in a growing suburb in Melbourne. *Science of the Total Environment*, 689, 883–898. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.399>
- Janhäll, S. (2015). Review on urban vegetation and particle air pollution - Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, 105, 130–137. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.052>
- Ji, H., Liu, D., Cheng, H., Zhang, C., & Yang, L. (2018). Vanadium dioxide nanopowders with tunable emissivity for adaptive infrared camouflage in both thermal atmospheric windows. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 175(July 2017), 96–101. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.10.013>

- Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *108*(22). <https://doi.org/10.1029/2003jd003480>
- Kamali, E., Hashemi, H., Berndtsson, R., Daneshkar Arasteh, P., & Kazemi, M. (2021). Impact of spatiotemporal land-use and land-cover changes on surface urban heat islands in a semiarid region using Landsat data. *International Journal of Digital Earth*, *14*(2), 250–270. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1813210>
- Karunaratne, S., Athukorala, D., Murayama, Y., & Morimoto, T. (2022). Assessing Surface Urban Heat Island Related to Land Use/Land Cover Composition and Pattern in the Temperate Mountain Valley City of Kathmandu, Nepal. *Remote Sensing*, *14*(16). <https://doi.org/10.3390/rs14164047>
- Khoshnoodmotlagh, S., Daneshi, A., Gharari, S., Verrelst, J., Mirzaei, M., & Omrani, H. (2021). Urban morphology detection and its linking with land surface temperature: A case study for Tehran Metropolis, Iran. *Sustainable Cities and Society*, *74*(October 2020), 103228. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103228>
- Konarska, J., Holmer, B., Lindberg, F., & Thorsson, S. (2016). Influence of vegetation and building geometry on the spatial variations of air temperature and cooling rates in a high-latitude city. *International Journal of Climatology*, *36*(5), 2379–2395. <https://doi.org/10.1002/joc.4502>
- Krayenhoff, E. S., Jiang, T., Christen, A., Martilli, A., Oke, T. R., Bailey, B. N., Nazarian, N., Voogt, J. A., Giometto, M. G., Stastny, A., & Crawford, B. R. (2020). A multi-layer urban canopy meteorological model with trees (BEP-Tree): Street tree impacts on pedestrian-level climate. *Urban Climate*, *32*(January), 100590. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100590>
- Krelaus, L., Apfel, J., & Rienow, A. (2021). Satellite-based investigation on the surface cooling effects of urban parks and their range – a case study for north rhine-westphalia, germany. *Erdkunde*, *75*(3), 209–223. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2021.03.03>
- Kumari, B., Tayyab, M., Shahfahad, Salman, Mallick, J., Khan, M. F., & Rahman, A. (2018). Satellite-Driven Land Surface Temperature (LST) Using Landsat 5, 7 (TM/ETM+ SLC)

- and Landsat 8 (OLI/TIRS) Data and Its Association with Built-Up and Green Cover Over Urban Delhi, India. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 1(3–4), 63–78. <https://doi.org/10.1007/s41976-018-0004-2>
- Kumari, M., & Kitchley, J. L. (2024). A framework to assess the contextual composite heat vulnerability index for a heritage city in India- A case study of Madurai. *Sustainable Cities and Society*, 101(August 2023), 105119. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105119>
- Lachapelle, J. A., Krayenhoff, E. S., Middel, A., Meltzer, S., Broadbent, A. M., & Georgescu, M. (2022). A microscale three-dimensional model of urban outdoor thermal exposure (TUF-Pedestrian). *International Journal of Biometeorology*, 66(4), 833–848. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02241-1>
- Lai, D., Liu, W., Gan, T., Liu, K., & Chen, Q. (2019). A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. *Science of the Total Environment*, 661, 337–353. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.062>
- Landsat Missions. (2024). *Spectral Bandpasses for all Landsat Sensors*. <https://www.usgs.gov/media/images/spectral-bandpasses-all-landsat-sensors>
- Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L., Falfán, I., & MacGregor-Fors, I. (2022). Too hot to handle? On the cooling capacity of urban green spaces in a Neotropical Mexican city. En *Urban Forestry and Urban Greening* (Vol. 74). <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127633>
- Li, X., Stringer, L. C., & Dallimer, M. (2022). The role of blue green infrastructure in the urban thermal environment across seasons and local climate zones in East Africa. *Sustainable Cities and Society*, 80(December 2021), 103798. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103798>
- Liu, Z., Cheng, W., Jim, C. Y., Morakinyo, T. E., Shi, Y., & Ng, E. (2021). Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: A systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4. *Building and Environment*, 200, 107939. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.107939>
- López, J. (2017). *Coeficiente de determinación (R cuadrado)*. <https://economipedia.com/definiciones/r-cuadrado-coeficiente-determinacion.html>

- Ma, X., Fukuda, H., Zhou, D., & Wang, M. (2019). The evaluation of outdoor thermal sensation and outdoor energy efficiency of a commercial pedestrianized zone. *Energies*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/en12071324>
- Manickathan, L., Defraeye, T., Allegrini, J., Derome, D., & Carmeliet, J. (2018). Parametric study of the influence of environmental factors and tree properties on the transpirative cooling effect of trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248(May 2017), 259–274. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.10.014>
- Mehdipour, A., Sharifi, E., Hill, K., Hayter, J., Soebarto, V., Bartesaghi Koc, C., & Hawken, S. (2023). Multi-criteria Street Tree Selection SA EI-2023 + Tool (Version 3). *The university of Adelaide*. <https://doi.org/https://doi.org/10.25909/22597120.v3>
- Meili, N., Manoli, G., Burlando, P., Carmeliet, J., Chow, W. T. L., Coutts, A. M., Roth, M., Velasco, E., Vivoni, E. R., & Fatichi, S. (2021). Tree effects on urban microclimate: Diurnal, seasonal, and climatic temperature differences explained by separating radiation, evapotranspiration, and roughness effects. *Urban Forestry and Urban Greening*, 58, 126970. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126970>
- Mengist, W., Soromessa, T., & Legese, G. (2020). Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. *MethodsX*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.100777>
- METEOTEST Genossenschaft. (2020). *Handbook part I: Software Global Meteorological Database Version 8 Software and Data for Engineers , Planers and Education*.
- Mohammad, P., Aghlmand, S., Fadaei, A., Gachkar, S., Gachkar, D., & Karimi, A. (2021). Evaluating the role of the albedo of material and vegetation scenarios along the urban street canyon for improving pedestrian thermal comfort outdoors. *Urban Climate*, 40(April), 100993. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100993>
- Moisa, M. B., Gabissa, B. T., Hinkosa, L. B., Dejene, I. N., & Gemed, D. O. (2022). Analysis of land surface temperature using Geospatial technologies in Gida Kiremu, Limu, and Amuru District, Western Ethiopia. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 6, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2022.06.002>
- Morakinyo, T. E., Ouyang, W., Lau, K. K. L., Ren, C., & Ng, E. (2020). Right tree, right place

- (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation - development and evaluation. *Science of the Total Environment*, 719, 137461. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137461>
- National Aeronautics and Space Administration Science Mission Directorate. (2010a). *Infrared Waves*. [https://science.nasa.gov/ems/07\\_infraredwaves/](https://science.nasa.gov/ems/07_infraredwaves/)
- National Aeronautics and Space Administration Science Mission Directorate. (2010b). *The Earth's Radiation Budget*. [https://science.nasa.gov/ems/13\\_radiationbudget/](https://science.nasa.gov/ems/13_radiationbudget/)
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2023). *The Atmospheric Window*. <https://www.noaa.gov/jetstream/satellites/absorb#:~:text=The places with limited or,the atmosphere at various wavelengths.>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2024). *The Transfer of Heat Energy*. <https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/transfer-of-heat-energy>
- Nice, K. A., Coutts, A. M., & Tapper, N. J. (2018). Development of the VTUF-3D v1.0 urban micro-climate model to support assessment of urban vegetation influences on human thermal comfort. *Urban Climate*, 24(January 2017), 1052–1076. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.12.008>
- Oke, T. R. (2002). *Boundary Layer Climates*. En *Routledge* (2a ed.). Routledge.
- Omar, P. J., & Kumar, V. (2021). Land surface temperature retrieval from TIRS data and its relationship with land surface indices. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(18), 0–14. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08255-0>
- Onáčillová, K., Gallay, M., Paluba, D., Péliová, A., Tokarčík, O., & Laubertová, D. (2022). Combining Landsat 8 and Sentinel-2 Data in Google Earth Engine to Derive Higher Resolution Land Surface Temperature Maps in Urban Environment. *Remote Sensing*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/rs14164076>
- Organización de las Naciones Unidas. (s/f). *La Agenda para el Desarrollo Sostenible*.
- Organización Meteorológica Mundial. (2022). *Cambio climático: una amenaza para el bienestar de la humanidad y la salud del planeta*. <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/cambio-climático-una-amenaza->

para-el-bienestar-de-la-humanidad-y-la

- Ouyang, W., Morakinyo, T. E., Ren, C., & Ng, E. (2020). The cooling efficiency of variable greenery coverage ratios in different urban densities: A study in a subtropical climate. *Building and Environment*, *174*(December 2019), 106772. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106772>
- Palmasur. (s/f). *Washingtonia robusta*. <https://www.palmerasyjardines.com/catalogo-especies/palmera-washingtonia-robusta/>
- Paschotta, R. (s/f). Infrared Light. En *RP Photonics Encyclopedia*. <https://doi.org/https://doi.org/10.61835/gvw>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, *11*(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Peng, J., Ma, J., Liu, Q., Liu, Y., Hu, Y., Li, Y., & Yue, Y. (2018). Spatial-temporal change of land surface temperature across 285 cities in China: An urban-rural contrast perspective. *Science of the Total Environment*, *635*, 487–497. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.105>
- Periódico oficial del Estado de Baja California. (2020). Decreto No. 46. En *Periodico oficial del Estado de Baja California* (pp. 1–12).
- Periódico Oficial del Estado de Baja California. (2024). *Plan Municipal de Desarrollo Urbano. Municipio de San Quintín, Baja California*. <https://www.sanquintin.gob.mx/copia-de-normatividad>
- Photography, S., Walker, C., Matthews, G., Shutterstock, & Bock, G. (s/f). *Platanus racemosa (California Sycamore)*.
- Pramanik, S., & Punia, M. (2019). Assessment of green space cooling effects in dense urban landscape: a case study of Delhi, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, *5*(3), 867–884. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00573-3>
- Qi, Y., Li, H., Pang, Z., Gao, W., & Liu, C. (2022). A Case Study of the Relationship Between Vegetation Coverage and Urban Heat Island in a Coastal City by Applying Digital Twins.

- Frontiers in Plant Science*, 13(April), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.861768>
- Qin, Z., Karnieli, A., & Berliner, P. (2001). A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), 3719–3746. <https://doi.org/10.1080/01431160010006971>
- Quan, S. J., & Bansal, P. (2021). A systematic review of GIS-based local climate zone mapping studies. *Building and Environment*, 196(March), 107791. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107791>
- Rahaman, S., Jahangir, S., Haque, M. S., Chen, R., & Kumar, P. (2021). Spatio-temporal changes of green spaces and their impact on urban environment of Mumbai, India. *Environment, Development and Sustainability*, 23(4), 6481–6501. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00882-z>
- Ramos, C. R. (2019). *Guía del arbolado y otras formas vegetales en situación de banqueta. Ciudad de San Luis Potosí.*
- Rehman, A. U., Ullah, S., Liu, Q., & Khan, M. S. (2021). Comparing different space-borne sensors and methods for the retrieval of land surface temperature. *Earth Science Informatics*, 14(2), 985–995. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00578-6>
- Rodríguez-Estrella, R., Pérez, J. ., Sánchez, A. A., Ferrer, Y., Muñoz, S., Falcón, A., & Pérez, C. J. (2019). Análisis de riesgo de cinco especies de palmas con potencial invasor en México. Informe final. Proyecto GEF 0089333 “Aumentar las Capacidades Nacionales para el Manejo de las Especies Exóticas Invasoras (EEI) a través de la Implementación de la Estrategia. *PNUD México (Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo).*
- Rongali, G., Keshari, A. K., Gosain, A. K., & Khosa, R. (2018). Split-Window Algorithm for Retrieval of Land Surface Temperature Using Landsat 8 Thermal Infrared Data. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 2(2). <https://doi.org/10.1007/s41651-018-0021-y>
- Rosas, M., & García, V. (2014). La influencia de la configuración de los cañones urbanos en el confort del peatón. *Nova Scientia*, 6(11), 228. <https://doi.org/10.21640/ns.v6i11.81>

- Ru, C., Duan, S. B., Jiang, X. G., Li, Z. L., Jiang, Y., Ren, H., Leng, P., & Gao, M. (2022). Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Thermal Infrared Data over Urban Areas Considering Geometry Effect: Method and Application. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3088482>
- Saha, M., Kafy, A. Al, Bakshi, A., Faisal, A. Al, Almulhim, A. I., Rahaman, Z. A., Al Rakib, A., Fattah, M. A., Akter, K. S., Rahman, M. T., Zhang, M., & Rathi, R. (2022). Modelling microscale impacts assessment of urban expansion on seasonal surface urban heat island intensity using neural network algorithms. En *Energy and Buildings* (Vol. 275). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112452>
- Santamaría, A. (2010). Forzamiento radiativo y cambios químicos en la atmósfera. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Esp)*, 4(1), 149–173.
- ScienceDirect. (s/f). *Atmospheric Window*. Recuperado el 25 de junio de 2024, de <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/atmospheric-window>
- Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (SEDATU). (s/f). *Manual de calles. Diseño vial para ciudades mexicanas*.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Sustentabilidad. (2014). *Catálogo de especies permitidas para la restitución de la masa vegetal de la cobertura perdida*. 143. <https://www.pueblacapital.gob.mx/images/transparencia/obl/01marco/mun/linea.ambientales.anexo.pdf>
- Secretaría de economía. (2015). *NMX-AA-166/2-SCFI-2015: Estaciones Meteorológicas, Climatológicas E Hidrológicas. Parte 2: Especificaciones Técnicas Que Deben Cumplir El Emplazamiento Y Exposición De Los Instrumentos De Medición De Las Estaciones Meteorológicas Automáticas Y Convenciona*.
- Secretaría del Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial (SMAOT). (2020). *Documento técnico base del inventario de especies vegetales nativas del Estado de Guanajuato*.
- Sekertekin, A., & Bonafoni, S. (2020). Land surface temperature retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over rural areas: Assessment of different retrieval algorithms and emissivity models and toolbox implementation. *Remote Sensing*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/rs12020294>

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (s/f-a). *Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS)*.

[https://smn.conagua.gob.mx/es/?option=com\\_content&view=article&id=38&Itemid=102](https://smn.conagua.gob.mx/es/?option=com_content&view=article&id=38&Itemid=102)

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (s/f-b). *Glosario Técnico*.

<https://smn.conagua.gob.mx/es/smn/glosario>

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (s/f-c). *Servicio Meteorológico Nacional: Normales Climatológicas*. Recuperado el 21 de abril de 2022, de

<https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales8110/NORMAL02111.TXT>

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2021). *El 2020 fue el segundo año más cálido a nivel global*.

Shi, D., Song, J., Huang, J., Zhuang, C., Guo, R., & Gao, Y. (2020). Synergistic cooling effects (SCEs) of urban green-blue spaces on local thermal environment: A case study in Chongqing, China. *Sustainable Cities and Society*, 55(January), 102065. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102065>

SIRE-Paquetes Tecnológicos. (s/f-a). *Acacia retinodes Schlttdl.* 5, 3–8.

SIRE-Paquetes Tecnológicos. (s/f-b). *Washingtonia robusta Wendl.*

Speak, A., Montagnani, L., Wellstein, C., & Zerbe, S. (2020). The influence of tree traits on urban ground surface shade cooling. *Landscape and Urban Planning*, 197(July 2019), 103748. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103748>

Stewart, I., & Mills, G. (2018). The Urban Heat Island A Guidebook. En *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.

Sun, Y., Gao, C., Li, J., Gao, M., & Ma, R. (2021). Assessing the cooling efficiency of urban parks using data envelopment analysis and remote sensing data. *Theoretical and Applied Climatology*, 145(3–4), 903–916. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03665-2>

Szagri, D., Nagy, B., & Szalay, Z. (2023). How can we predict where heatwaves will have an impact? – A literature review on heat vulnerability indexes. *Urban Climate*, 52(September). <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101711>

Taleghani, M. (2018). Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies- A

- review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(March 2017), 2011–2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.010>
- Tan, P. Y., Wong, N. H., Tan, C. L., Jusuf, S. K., Chang, M. F., & Chiam, Z. Q. (2018). *A method to partition the relative effects of evaporative cooling and shading on air temperature within vegetation canopy*. 1–11. <https://doi.org/10.1093/jue/juy012>
- Tan, X., Sun, X., Huang, C., Yuan, Y., & Hou, D. (2021). Comparison of cooling effect between green space and water body. *Sustainable Cities and Society*, 67(June 2020), 102711. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102711>
- Tariq, A., Riaz, I., Ahmad, Z., Yang, B., Amin, M., Kausar, R., Andleeb, S., Farooqi, M. A., & Rafiq, M. (2020). Land surface temperature relation with normalized satellite indices for the estimation of spatio-temporal trends in temperature among various land use land cover classes of an arid Potohar region using Landsat data. *Environmental Earth Sciences*, 79(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8766-2>
- Tepanosyan, G., Muradyan, V., Hovsepyan, A., Pinigin, G., Medvedev, A., & Asmaryan, S. (2020). Studying spatial-temporal changes and relationship of land cover and surface Urban Heat Island derived through remote sensing in Yerevan, Armenia. *Building and Environment*, 187(June 2020), 107390. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107390>
- Teshnehdel, S., Akbari, H., Di Giuseppe, E., & Brown, R. D. (2020). Effect of tree cover and tree species on microclimate and pedestrian comfort in a residential district in Iran. *Building and Environment*, 178(May), 106899. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106899>
- Thom, J. K., Coutts, A. M., Broadbent, A. M., & Tapper, N. J. (2016). The influence of increasing tree cover on mean radiant temperature across a mixed development suburb in Adelaide, Australia. *Urban Forestry and Urban Greening*, 20, 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.08.016>
- Tomé, C. (2016). *El espectro electromagnético*. <https://culturacientifica.com/2016/08/16/el-espectro-electromagnetico/>
- Tumini, I., & Higuera-García, E. (2013). *Alcance y limitaciones de las herramientas de simulación para el estudio del microclima urbano*. 1–17.

- U.S. Geological Survey. (2023). *Landsat Collection 2 Surface Temperature*. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-temperature>
- U.S. Geological Survey (USGS). (s/f). *EarthExplorer*. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Ubilla-Bravo, G. (2020). Rururbanización, suburbanización y reconcentración de la tierra: efectos espaciales de instrumentos rurales en las áreas periurbanas de Chile. *Ager*, 2020(28), 75–106. <https://doi.org/10.4422/ager.2019.07>
- Unal Cilek, M., & Cilek, A. (2021). Analyses of land surface temperature (LST) variability among local climate zones (LCZs) comparing Landsat-8 and ENVI-met model data. *Sustainable Cities and Society*, 69(March), 102877. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102877>
- Unal Cilek, M., & Uslu, C. (2022). Modeling the relationship between the geometric characteristics of urban green spaces and thermal comfort: The case of Adana city. *Sustainable Cities and Society*, 79(September 2021), 103748. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103748>
- USGS. (s/f). *ASTER Overview*. <https://lpdaac.usgs.gov/data/get-started-data/collection-overview/missions/aster-overview/#introduction>
- Vanhellemont, Q. (2020). Combined land surface emissivity and temperature estimation from Landsat 8 OLI and TIRS. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166(December 2019), 390–402. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.06.007>
- Vásquez, A. (2016). Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 63, 63–86. <https://doi.org/10.3987/COM-09-11865>
- Wang, J., Zhou, W., Zheng, Z., Jiao, M., & Qian, Y. (2023). Interactions among spatial configuration aspects of urban tree canopy significantly affect its cooling effects. *Science of the Total Environment*, 864(18), 160929. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160929>
- Wang, M., Li, M., Zhang, Z., Hu, T., He, G., Zhang, Z., Wang, G., Li, H., Tan, J., & Liu, X.

- (2023). Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 9 TIRS-2 Data Using Radiance-Based Split-Window Algorithm. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16, 1100–1112. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3232621>
- Wang, T., Tu, H., Min, B., Li, Z., Li, X., & You, Q. (2022). The Mitigation Effect of Park Landscape on Thermal Environment in Shanghai City Based on Remote Sensing Retrieval Method. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(5). <https://doi.org/10.3390/ijerph19052949>
- Wang, X., Dallimer, M., Scott, C. E., Shi, W., & Gao, J. (2021). Tree species richness and diversity predicts the magnitude of urban heat island mitigation effects of greenspaces. *Science of the Total Environment*, 770, 145211. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145211>
- Wang, Y., Ni, Z., Hu, M., Chen, S., & Xia, B. (2021). A practical approach of urban green infrastructure planning to mitigate urban overheating: A case study of Guangzhou. *Journal of Cleaner Production*, 287, 124995. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124995>
- 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), 166–181. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00129-5>
- World Meteorological Organization (WMO). (2021). *Guide to Instruments and Methods of Observation: Vol. I* (Número 8).
- World Meteorological Organization (WMO). (2022). *Climate*. <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate>
- Wu, Z., Dou, P., & Chen, L. (2019). Comparative and combinative cooling effects of different spatial arrangements of buildings and trees on microclimate. *Sustainable Cities and Society*, 51(December 2018). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101711>
- Xu, C., Chen, G., Huang, Q., Su, M., Rong, Q., Yue, W., & Haase, D. (2022). Can improving the spatial equity of urban green space mitigate the effect of urban heat islands? An empirical study. *Science of the Total Environment*, 841(June), 156687. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156687>

XXIV Ayuntamiento Tijuana. (s/f). *Plantas de Sombra*.

Yang, Q., Huang, X., Tong, X., Xiao, C., Yang, J., Liu, Y., & Cao, Y. (2022). Global assessment of urban trees' cooling efficiency based on satellite observations. *Environmental Research Letters*, 17(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4c1c>

Yu, Q., Ji, W., Pu, R., Landry, S., Acheampong, M., O' Neil-Dunne, J., Ren, Z., & Tanim, S. H. (2020). A preliminary exploration of the cooling effect of tree shade in urban landscapes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92(October 2019), 102161. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102161>

Zhang, J., Khoshbakht, M., Liu, J., Zhonghua, G., Xiong, J., & Jiang, M. (2022). A clustering review of vegetation-indicating parameters in urban thermal environment studies towards various factors. *Journal of Thermal Biology*, 110(July), 103340. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2022.103340>

Zhang, M., You, W., Qin, Q., Peng, D., Hu, Y., Gao, Z., & Buccolieri, R. (2022). Investigation of typical residential block typologies and their impact on pedestrian-level microclimate in summers in Nanjing, China. *Frontiers of Architectural Research*, 11(2), 278–296. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.10.008>

Zhao, J., Zhao, X., Liang, S., Zhou, T., Du, X., Xu, P., & Wu, D. (2020). Assessing the thermal contributions of urban land cover types. *Landscape and Urban Planning*, 204(19), 103927. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103927>

Zhao, J., Zhao, X., Wu, D., Meili, N., & Fatichi, S. (2023). Satellite-based evidence highlights a considerable increase of urban tree cooling benefits from 2000 to 2015. *Global Change Biology, March*. <https://doi.org/10.1111/gcb.16667>

Zhou, D., Xiao, J., Bonafoni, S., Berger, C., Deilami, K., Zhou, Y., Frohking, S., Yao, R., Qiao, Z., & Sobrino, J. A. (2019). Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives. *Remote Sensing*, 11(1), 1–36. <https://doi.org/10.3390/rs11010048>

Zhou, X., Okaze, T., Ren, C., Cai, M., Ishida, Y., Watanabe, H., & Mochida, A. (2020). Evaluation of urban heat islands using local climate zones and the influence of sea-land breeze. *Sustainable Cities and Society*, 55(October 2019), 102060.

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102060>

Zölch, T., Rahman, M. A., Pfeleiderer, E., Wagner, G., & Pauleit, S. (2019). Designing public squares with green infrastructure to optimize human thermal comfort. *Building and Environment*, *149*(December 2018), 640–654. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.051>

Žurovec, O., Čadro, S., & Sitaula, B. K. (2017). Quantitative assessment of vulnerability to climate change in rural municipalities of Bosnia and Herzegovina. *Sustainability (Switzerland)*, *9*(7), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su9071208>





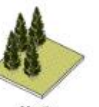
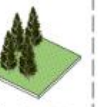

























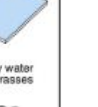

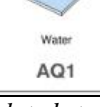


**ANEXOS Y APÉNDICES**

---

# Anexo 1 Clasificación de la infraestructura verde

## Anexo 1.1

Streamlined <b>GIT</b> for remotely sensed applications		Ground surfaces (from spectral imagery)						
		Impervious	Mixed	Pervious	Aquatic			
Height of vegetated features (from LIDAR)	High Vegetation (trees)	Dense			 Dense trees with shrubs and grasses <b>PV11</b>			
		Clustered	 Mostly impervious with clustered trees <b>IM6</b>	 Mixed surfaces with clustered trees <b>MX9</b>	 Mixed grasses with clustered trees <b>MX10</b>	 Mostly non-irrigated grasses with clustered trees <b>PV9</b>	 Mostly irrigated grasses with clustered trees <b>PV10</b>	 Water with clustered trees <b>AQ7</b>
		Scattered	 Mostly impervious with scattered trees <b>IM5</b>	 Mixed surfaces with scattered trees <b>MX7</b>	 Mixed grasses with scattered trees <b>MX8</b>	 Mostly non-irrigated grasses with scattered trees <b>PV7</b>	 Mostly irrigated grasses with scattered trees <b>PV8</b>	 Water with scattered trees <b>AQ6</b>
	Aligned	 Mostly impervious with aligned trees <b>IM4</b>	 Mixed surfaces with aligned trees <b>MX5</b>	 Mixed grasses with aligned trees <b>MX6</b>	 Mostly non-irrigated grasses with aligned trees <b>PV5</b>	 Mostly irrigated grasses with aligned trees <b>PV6</b>	 Water with aligned trees <b>AQ5</b>	
	Medium Vegetation (shrubs)	 Mostly impervious with shrubs <b>IM3</b>	 Mixed surfaces without trees <b>MX3</b>	 Mixed grasses and bare soils <b>MX4</b>	 Mixed grasses with shrubs and trees <b>PV3</b>	 Mostly shrubs <b>PV4</b>	 Mixed surfaces with water <b>AQ4</b>	
	Low Vegetation (grasses)	 Mostly impervious with grasses <b>IM2</b>	 Mostly non-irrigated grasses with impervious <b>MX1</b>	 Mostly irrigated grasses with impervious <b>MX2</b>	 Mostly non-irrigated grasses <b>PV1</b>	 Mostly irrigated grasses <b>PV2</b>	 Mostly grasses with water <b>AQ3</b>	 Mostly water with grasses <b>AQ2</b>
	No vegetation	 Highly impervious <b>IM1</b>					 Water <b>AQ1</b>	

Nota. Adaptado de “Mapping and classifying green infrastructure typologies for climate-related studies based on remote sensing data” (p. 157) por Bartesaghi-Koc et al. (2019), Urban Forestry & Urban Greening.

## Anexo 2 Mapa de vulnerabilidad social

### Anexo 2.1








*Nota.* Acercamiento del mapa de grados de vulnerabilidad social para el municipio de San Quintín, B. C. Adaptado y modificado de “Plan de Municipal de Desarrollo Urbano de San Quintín” por Periódico Oficial del Estado de Baja California (2024).

## Apéndice 1 Selección de especie de arbolado

**Tabla A1.1**

Especies de arbolado identificadas

Especie ( <i>nombre científico / nombre común</i> )	Imagen *1	Ubicación	
		Sitio	Literatura *2
<i>Prosopis glandulosa</i> / Mezquite			X
<i>Platanus racemosa</i> / Aliso			X
<i>Prunus ilicifolia</i> / Islay			X
<i>Populus fremontii</i> / Álamo			X
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> / Eucalipto rojo		X	
<i>Tecoma stans</i> / Tronadora		X	

*Acacia retinodes* / Acacia



X

*Washingtonia robusta* / Palmera de abanico mexicana



X

*Phoenix canariensis* / Palma canaria



X

*Schinus terebinthifolius* / Pimentero brasileño



X

*Nota.* \*<sup>1</sup> EncicloVida por CONABIO (s/f-a). \*<sup>2</sup> “Paleta Vegetal. Guía de plantas nativas. Tijuana, Baja California” por Delgado et al. (2021).

**Tabla A1.2**

Análisis de especies de arbolado identificadas en base a los criterios de selección

Especie	Sitios apropiados para plantar	Preferencia de suelo	Potencial de malezas	Tolerancia a la sequía	Tolerancia a los vientos	Tolerancia a la salinidad	Presencia en la unidad de observación	Provisión de sombra (área en m <sup>2</sup> )	Tipo de hoja	Fuente de consulta autor (año)
<i>Prosopis glandulosa</i> / Mezquite	B, P, T, G	Arena-arcilla	Bajo	Alta	Moderada	Alta	No	254.47	Caduca	Delgado et al. (2021); CONABIO (s/f-b)
<i>Platanus racemosa</i> / Aliso	B, C, P, T, G	Arena-arcilla	Bajo	Moderada	S/D	Moderada	No	254.47	Caduca	Delgado et al. (2021); Photography et al. (s/f)
<i>Prunus ilicifolia</i> / Islay	B, P, T, G	Arena	Bajo	Moderada	S/D	Moderada	No	113.10	Perenne	Delgado et al. (2021)
<i>Populus fremontii</i> / Álamo	B, C, P, T, G	Arena-arcilla	Bajo	Baja	S/D	S/D	No	314.16	Caduca	Delgado et al. (2021)
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> / Eucalipto rojo	BO	S/D	Bajo	Moderada	Moderada	Moderada	Si	314.15	Perenne	Cubas Martins (s/f)
<i>Tecoma stans</i> / Tronadora	B, C, P, PL, BO	Negro, café-arcilloso, rojizo, somero, calizo, arenoso, pedregoso.	S/D	Alta	Baja	S/D	Si	28.27	Sub-perennifolia	Secretaría del Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial (SMAOT) (2020); Ramos (2019); CONABIO (s/f-c); CONAVI (s/f).
<i>Acacia retinodes</i> / Acacia	C, P, J	Cambisol, leptosol, regosol	S/D	S/D	Baja	Moderada	Si		Perenne	Secretaría de Desarrollo Urbano y Sustentabilidad (2014); SIRE-Paquetes Tecnológicos (s/f-a)
<i>Washingtonia robusta</i> / Palmera de abanico mexicana	P, PL	Franco-arcillosa-limosa, arcilla-arenosa	S/D	Alta	Alta	Alta	Si	28.27	Perenne	Cubas Martins (s/f); Palmasur (s/f); SIRE-Paquetes Tecnológicos (s/f-b)
<i>Phoenix canariensis</i> / Palma canaria	A, P, PL, J	Sin exigencias	Alto	Alta	Alta	Alta	Si	63.61	Perenne	Cubas Martins (s/f); Rodríguez-Estrella et al. (2019)
<i>Schinus terebinthifolius</i> / Pimentero brasileño	S/D	S/D	Alto	Alta	Alta	Moderada	Si	50.26	Perenne	EXOS (2024); Ramos (2019); XXIV Ayuntamiento Tijuana (s/f)

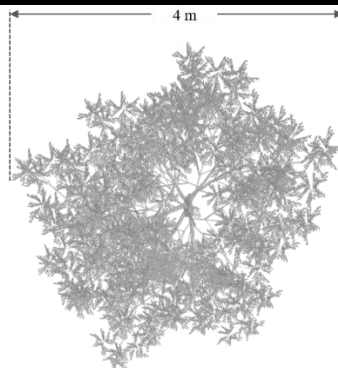
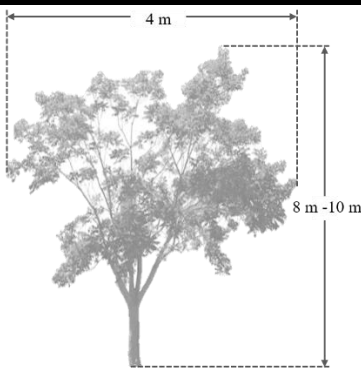
*Nota.* Criterios de selección ordenados por prioridad de más alta (izquierda) a baja (derecha). B= banqueta, C= camellón, A= avenida ancha, P= parque, T= talud, J= jardín, G= glorieta, PL= plaza, BO= bosque urbano, S/I= sin datos. Elaborado a partir de información consultada en las fuentes indicadas en la tabla.

**Tabla A1.3**

Ficha técnica de especie de arbolado seleccionada para simulación

**TECOMA STANS**

**TRONADORA**

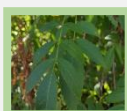


**DESCRIPCIÓN**

Arbusto o árbol pequeño de crecimiento rápido (3 a 5 años) alcanzando de 8 m a 10 m de altura. Uso ornamental y medicinal.

**Forma de dosel**

Copa irregular y follaje de densidad regular que va de los 4 m a 6 m de ancho.



Hojas perennes o caducas compuestas, opuestas e imparipinnadas, cinco a trece folioladas; los folíolos aserrados y lanceolados, el folíolo terminal de 2.4 cm a 15 cm de largo.



Flor con corola amarilla con líneas rojizas en la garganta, campanulado-infundibuliforme con un tubo angosto de aproximadamente 1 cm de longitud, una garganta larga y los lóbulos de 1 cm a 1.5 cm de longitud, glabra por fuera; estambres insertos a más o menos 1 cm de la base de la corola, tecas de las anteras pubescentes, de 3 mm a 4 mm de largo, estaminodio; ovario angostamente cilíndrico, disco nectarífero de 1 mm de diámetro.



Fruto o vaina alargada (7 cm a 21 cm) de color verde-marrón, en seco de color café, más o menos lustrosa.

**Tronco/ramas**

Diámetro del tronco de 25 cm a 36 cm.

**Raíz**

Tipo de raíz pivotante. Se caracteriza por una raíz profunda por lo que no afecta las banquetas.

**Longevidad**

35 años.

**Necesidad de poda**

De formación para obtener un solo fuste.

**ORIGEN**

Especie nativa de México y del sur de Estados Unidos hasta el norte de Sudamérica.

**DISTRIBUCIÓN**

Casi en toda la República Mexicana.



**HABITAD**

Clima: árido, semiárido y cálido subhúmedo  
Suelo: negro, café-arcilloso, rojizo, somero, calizo, arenoso, pedregoso, bien drenados.  
Tolera las sequías al necesitar agua de manera moderada (cinco litros cada tres días) y es susceptible a las heladas.

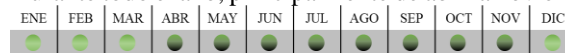
**SITIOS APROPIADOS**

Se puede desarrollar en banquetas de 1.2 m a 1.7 m, camellones de 1.7 m a 12 m, parques, plazas y bosques urbanos.

**FENOLOGÍA**

**Floración**

Durante todo el año, principalmente de abril a noviembre.



**Fructificación**



**PALETA CROMÁTICA**



*Nota:* Ficha técnica de la especie seleccionada para simulación generada a partir de información consultada de los autores SMAOT (2020), Ramos (2019), Secretaría de Desarrollo Urbano y Sustentabilidad (2014), CONABIO (s/f-c), CONAVI (s/f) y Gobierno Autónomo Municipal de Santa Cruz de la Sierra (s/f). Fotografías recuperadas del sitio EncicloVida por CONABIO (s/f-a).

## Apéndice 2 Vegetación incluida en escenarios base de ENVI-met

**Tabla A2.1**

Especificaciones de vegetación incluida en el modelo BA

Tipo	Alto (m)	Ancho (m)	Cantidad
Árbol	1	1	1
Árbol	2	1	11
Árbol	2	2	5
Árbol	2	3	2
Árbol	3	2	3
Árbol	3	3	4
Árbol	3	4	2
Árbol	3	5	1
Árbol	3	7	1
Árbol	4	3	3
Árbol	4	4	6
Árbol	4	5	3
Árbol	4	6	3
Árbol	4	7	2
Árbol	4	8	1
Árbol	4	9	1
Árbol	5	4	1
Árbol	5	5	5
Árbol	5	6	3
Árbol	5	7	1
Árbol	6	2	1
Árbol	6	6	1
Árbol	6	14	1
Árbol	9	4	2
Palma	1	1	3
Palma	2	3	8
Palma	3	3	4
Palma	4	3	5
Palma	5	5	2
Palma	6	5	2

*Nota.* Vegetación incluida en el modelado del cañón BA en ENVI-met, correspondiente al levantamiento de la unidad de observación.

**Tabla A2.2**

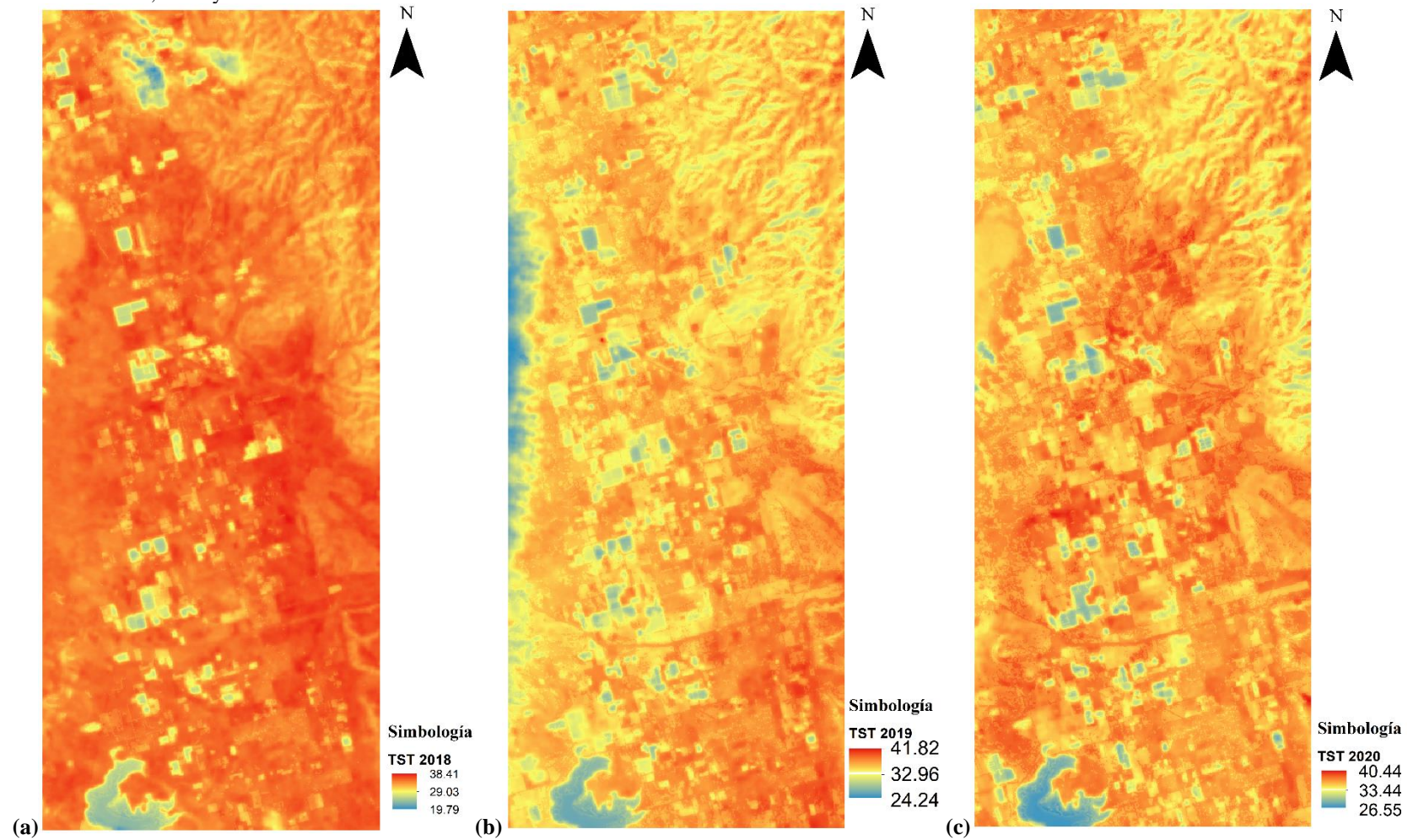
Especificaciones de vegetación incluida en el modelo BB

Tipo	Alto (m)	Ancho (m)	Cantidad
Árbol	1	2	1
Árbol	2	1	1
Árbol	2	2	14
Árbol	2	3	5
Árbol	3	2	9
Árbol	3	3	6
Árbol	4	2	1
Árbol	4	3	1
Árbol	4	4	5
Árbol	4	5	1
Árbol	4	6	1
Árbol	4	9	1
Árbol	5	6	1
Árbol	5	7	1
Árbol	6	2	1
Árbol	6	4	1
Árbol	6	7	3
Árbol	7	7	3
Árbol	7	8	4
Árbol	9	4	1
Palma	1	1	14
Palma	2	3	7
Palma	3	3	22
Palma	4	3	5
Palma	5	5	3
Palma	6	5	8
Palma	7	7	4
Palma	8	7	4
Pino	5	2	1

*Nota.* Vegetación incluida en el modelado del cañón BB en ENVI-met, correspondiente al levantamiento de la unidad de observación.

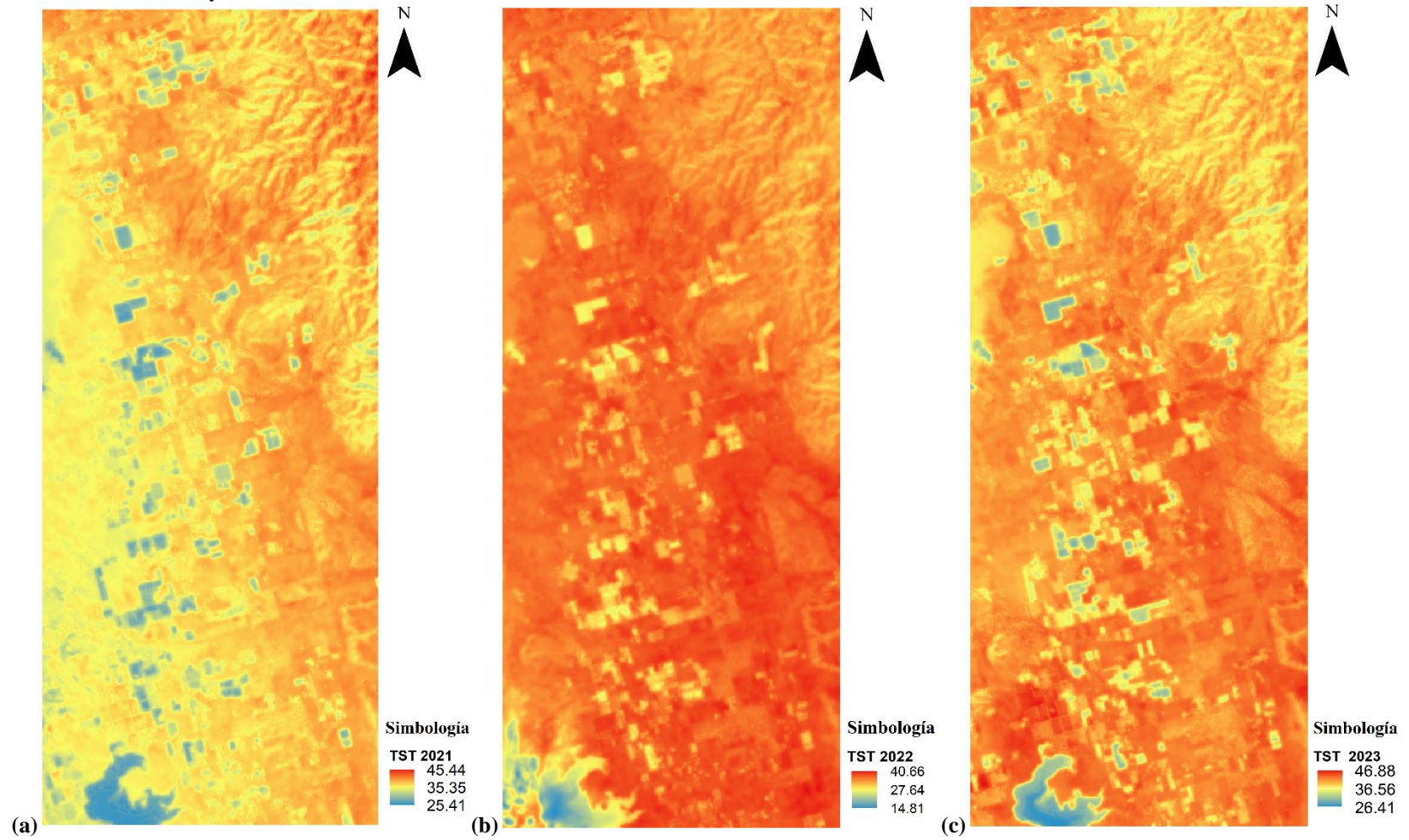
### Apéndice 3 Mapas de resultado de TST del polígono de análisis

**Figura A3.1**  
TST del año 2018, 2019 y 2020



*Nota.* Mapa de TST del polígono analizado con visualización de mínimos y máximos, a: 2018, b: 2019 y c: 2020.

**Figura A3.2**  
TST del año 2021, 2022 y 2023

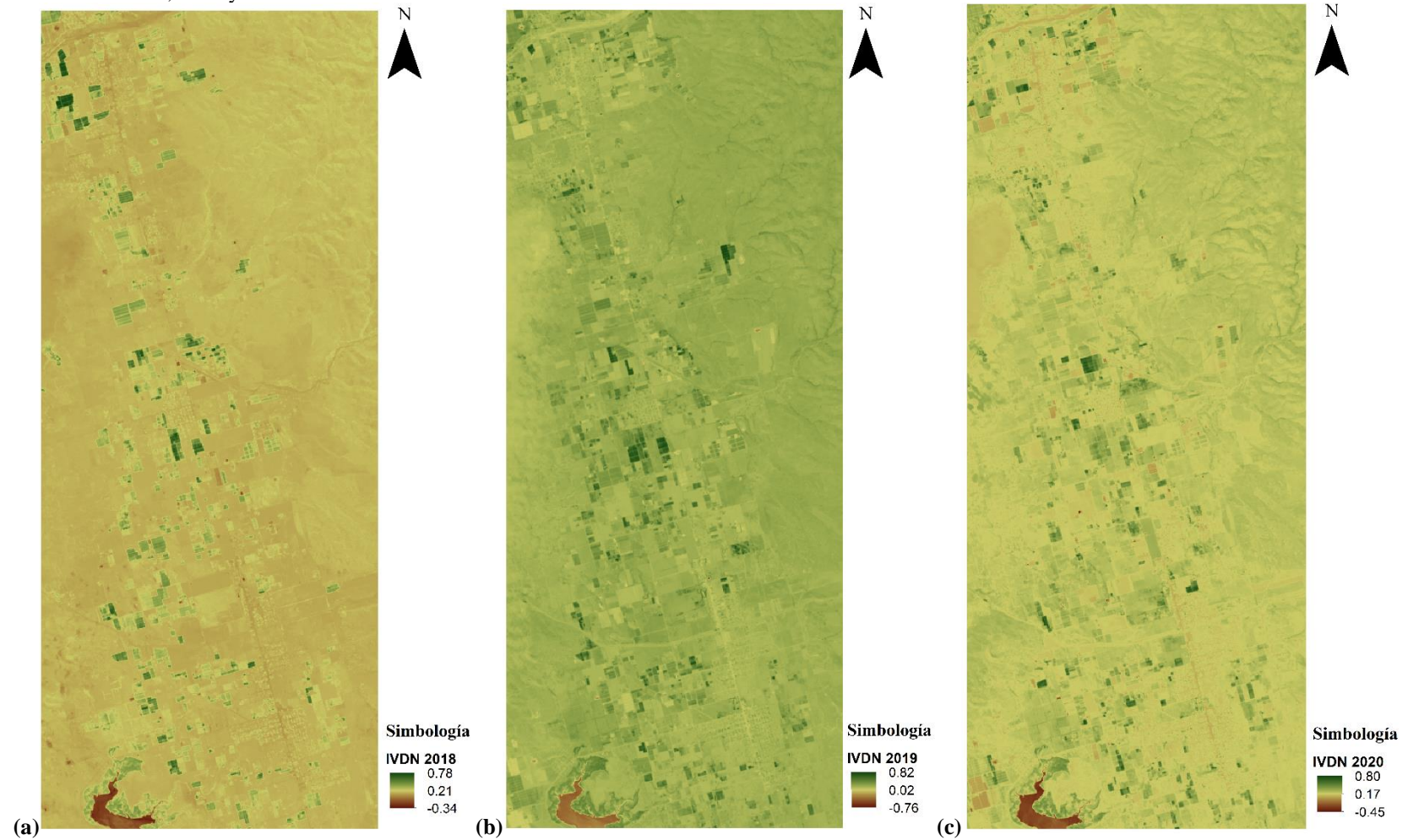


*Nota.* Mapa de TST del polígono analizado con visualización de mínimos y máximos, a: 2021, b: 2022 y c: 2023.

## Apéndice 4 Mapas de resultado del IVDN del polígono de análisis

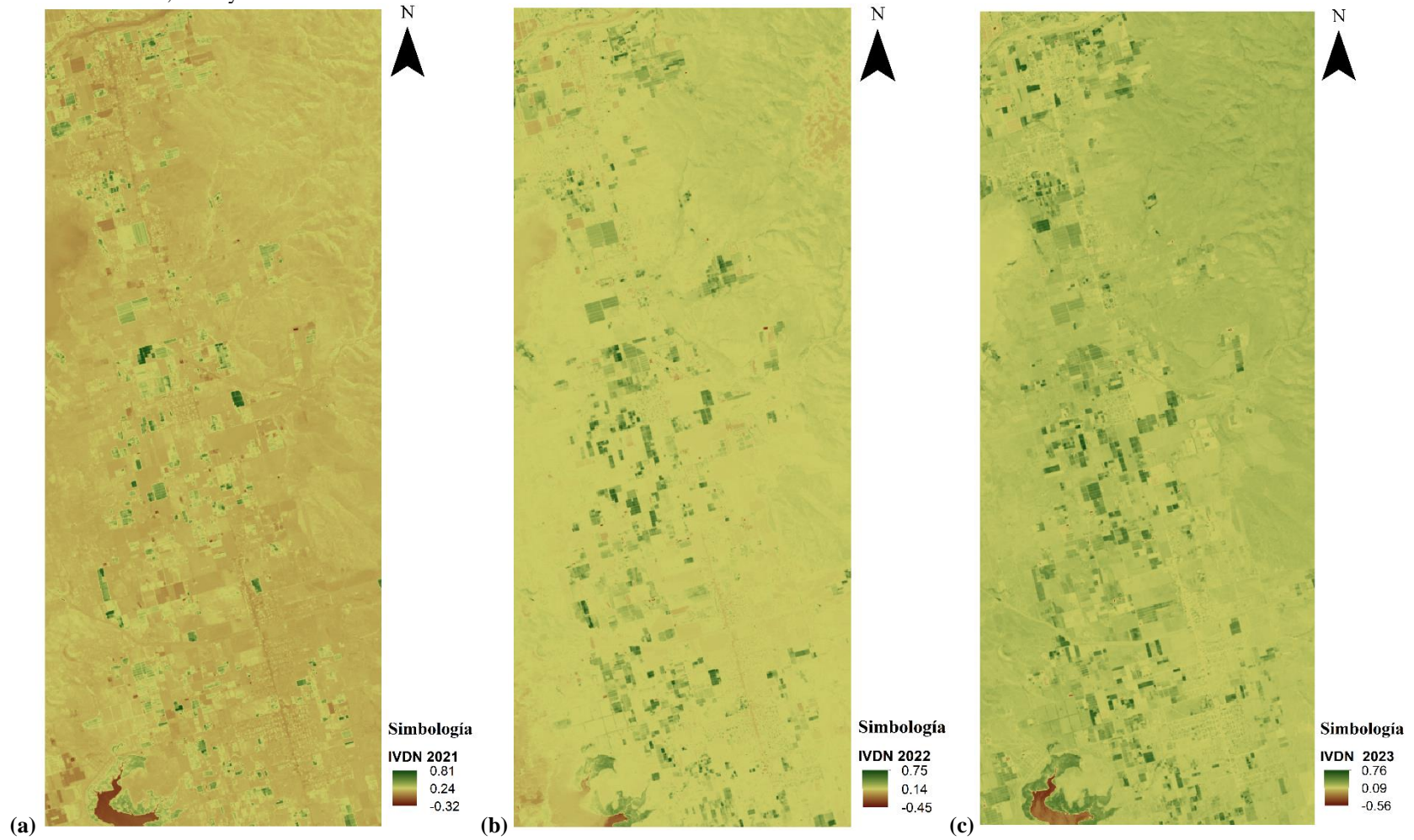
**Figura A4.1**

IVDN del año 2018, 2019 y 2020



*Nota.* Mapa de IVDN del polígono analizado con visualización de mínimos y máximos, a: 2018, b: 2019 y c: 2020.

**Figura A4.2**  
IVDN del año 2021, 2022 y 2023



*Nota.* Mapa de IVDN del polígono analizado con visualización de mínimos y máximos, a: 2021, b: 2022 y c: 2023.

## Apéndice 5 Base de datos del monitoreo en la unidad de observación (punto E)

**Tabla A5.1**

Resultados de la estación meteorológica (E)

Fecha y hora (mm/dd/aaaa hh:mm)	Temperatura del aire (°C)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento
10/01/2023 00:00	17.1	88.3	0	
10/01/2023 01:00	16.9	86	0.5	N
10/01/2023 02:00	16.6	88.4	0	
10/01/2023 03:00	16.7	88.6	0.5	E
10/01/2023 04:00	16.7	85	0.3	NE
10/01/2023 05:00	16.1	90.9	0.9	S
10/01/2023 06:00	15.7	90.7	0.6	ESE
10/01/2023 07:00	15.4	93.2	0.4	SSE
10/01/2023 08:00	17.3	89.7	--	--
10/01/2023 09:00	20.9	72.8	0.8	ENE
10/01/2023 10:00	22.6	66.1	1.4	S
10/01/2023 11:00	22.9	67.4	2.8	SW
10/01/2023 12:00	22.4	65.9	2.8	SW
10/01/2023 13:00	22.7	71.8	3.9	W
10/01/2023 14:00	21.3	73.9	4.5	N
10/01/2023 15:00	20.4	74.7	2.6	N
10/01/2023 16:00	20.2	66.2	2.3	N
10/01/2023 17:00	20.5	58.6	1.3	N
10/01/2023 18:00	19.9	61	3.4	N
10/01/2023 19:00	18.7	65.3	2.7	WNW
10/01/2023 20:00	17.8	69.3	1.8	NW
10/01/2023 21:00	16.9	76.6	0.9	NW
10/01/2023 22:00	16	77.9	0.4	NW
10/01/2023 23:00	15.8	78.3	0.8	NW
10/02/2023 00:00	14.7	80.3	0	
10/02/2023 01:00	14	80.5	0	
10/02/2023 02:00	12.9	82.9	0	
10/02/2023 03:00	12.4	82.9	0.2	NW
10/02/2023 04:00	11.8	83.9	0.1	NW
10/02/2023 05:00	11.6	83.9	0.4	NNW
10/02/2023 06:00	11.4	83.9	0	
10/02/2023 07:00	11.2	84.2	0	
10/02/2023 08:00	15.3	73	1	ENE
10/02/2023 09:00	18.7	64.1	0.3	NNW
10/02/2023 10:00	20.6	58.5	1.5	NW
10/02/2023 11:00	21.8	53.2	2	NW
10/02/2023 12:00	22.4	52.2	6.7	W
10/02/2023 13:00	22.8	52.5	4.1	NW
10/02/2023 14:00	22.4	55.4	4.7	WNW

10/02/2023 15:00	22.1	57	3.6	N
10/02/2023 16:00	21.6	60.9	4.9	WNW
10/02/2023 17:00	20.8	65.1	4.4	NW
10/02/2023 18:00	19.4	73.8	3.7	NW
10/02/2023 19:00	18.1	79.4	2.3	WNW
10/02/2023 20:00	17.5	82.4	1.5	WNW
10/02/2023 21:00	16.7	83.5	0.3	NW
10/02/2023 22:00	16.1	84.8	0	
10/02/2023 23:00	15.2	85.2	0.1	NNE
10/03/2023 00:00	14.6	85.4	0.2	NNE
10/03/2023 01:00	14.1	85.3	0	
10/03/2023 02:00	13.7	85.1	0.4	NE
10/03/2023 03:00	13.4	85.7	0	
10/03/2023 04:00	13.2	86.5	0.5	N
10/03/2023 05:00	12.7	85.9	0	
10/03/2023 06:00	12.6	85.6	0.4	NNE
10/03/2023 07:00	12.6	85.8	0	
10/03/2023 08:00	16.8	74.4	0	
10/03/2023 09:00	18.4	74.2	0.3	WNW
10/03/2023 10:00	20.6	67.4	2.1	WSW
10/03/2023 11:00	22.2	64.6	2.4	WNW
10/03/2023 12:00	23.2	60.6	2.2	NW
10/03/2023 13:00	23.4	60.5	2.5	NW
10/03/2023 14:00	23.3	65.9	2.6	NW
10/03/2023 15:00	23.4	66.7	3	NW
10/03/2023 16:00	22.9	69.1	3.1	NW
10/03/2023 17:00	21.7	73.2	3.6	WNW
10/03/2023 18:00	20.3	78.2	3	NW
10/03/2023 19:00	18.7	84.4	1.1	WNW
10/03/2023 20:00	18	86.7	1.3	NW
10/03/2023 21:00	17.4	88.3	0.6	N
10/03/2023 22:00	16.9	89.1	0	
10/03/2023 23:00	16.5	89.3	0.6	N
10/04/2023 00:00	15.7	90	0.2	WNW
10/04/2023 01:00	15.1	89.7	0	
10/04/2023 02:00	15.8	90.1	0.5	N
10/04/2023 03:00	16.8	91.8	1.2	NW
10/04/2023 04:00	16.5	92.9	0.9	NW
10/04/2023 05:00	16.2	94	0.3	N
10/04/2023 06:00	15.2	94.2	0.9	N
10/04/2023 07:00	14.9	94.7	0.9	N
10/04/2023 08:00	15.8	95	1.2	NNW
10/04/2023 09:00	16.2	94.5	0.3	N
10/04/2023 10:00	19.8	81.8	1	NW

10/04/2023 11:00	22.9	70.3	1.4	W
10/04/2023 12:00	25.1	62.1	1.6	WNW
10/04/2023 13:00	23.3	66.6	3.1	WNW
10/04/2023 14:00	23.4	67.2	2.3	NW
10/04/2023 15:00	24.1	64	3.2	NW
10/04/2023 16:00	23.8	65.8	3.4	WNW
10/04/2023 17:00	23.4	67.6	1.3	NW
10/04/2023 18:00	21.6	75.6	1.1	N
10/04/2023 19:00	19.6	84.2	1	NW
10/04/2023 20:00	18.8	87.5	0.8	NW
10/04/2023 21:00	18.1	89.1	0.3	WNW
10/04/2023 22:00	17.5	90	0.1	WNW
10/04/2023 23:00	16.6	89	0	
10/05/2023 00:00	16.8	93.4	0.3	N
10/05/2023 01:00	16.2	93.5	0	
10/05/2023 02:00	16	94.3	0.4	N
10/05/2023 03:00	15.3	94.6	0	
10/05/2023 04:00	14.3	94.6	--	--
10/05/2023 05:00	14.2	94.8	0.2	NNW
10/05/2023 06:00	12.6	94.1	0.6	N
10/05/2023 07:00	12.7	94.7	0	
10/05/2023 08:00	14.9	94.6	0.9	NNW
10/05/2023 09:00	17.9	87.5	0.6	NW
10/05/2023 10:00	22.2	74.5	0.8	NW
10/05/2023 11:00	26.6	54.2	1.1	NW
10/05/2023 12:00	28.8	50	1.4	NW
10/05/2023 13:00	28.6	47.6	1.8	WNW
10/05/2023 14:00	27.1	49.4	3.4	WNW
10/05/2023 15:00	26.7	49.1	3.3	WNW
10/05/2023 16:00	26.4	51.6	1.6	NW
10/05/2023 17:00	25.1	62	2.8	WNW
10/05/2023 18:00	22.6	72.3	1.4	NW
10/05/2023 19:00	20.6	84.1	0.9	WNW
10/05/2023 20:00	19.7	88	0.9	W
10/05/2023 21:00	18.4	91.2	0.5	SW
10/05/2023 22:00	17.3	92.8	0.4	WNW
10/05/2023 23:00	16.9	93	0.2	NNE
10/06/2023 00:00	16.7	93.8	0.2	N
10/06/2023 01:00	15.8	94	0	
10/06/2023 02:00	15.1	93.8	0.1	NNE
10/06/2023 03:00	15.1	94.4	0.1	NNE
10/06/2023 04:00	14.6	94.5	0.1	NNE
10/06/2023 05:00	12.3	86.9	0	
10/06/2023 06:00	13.2	91.8	0.6	NNE

10/06/2023 07:00	13.1	92.6	0	
10/06/2023 08:00	14.3	94.9	0.1	N
10/06/2023 09:00	16.7	94.6	1.3	NW
10/06/2023 10:00	20.4	80.2	1.7	WNW
10/06/2023 11:00	24.6	69.3	1.5	WNW
10/06/2023 12:00	25.3	57	2.8	WNW
10/06/2023 13:00	27.4	45.3	3	WNW
10/06/2023 14:00	25	60.5	3	W
10/06/2023 15:00	24.5	60.6	4.4	WNW
10/06/2023 16:00	23.4	70.6	2.5	NW
10/06/2023 17:00	21.4	76.2	2	NW
10/06/2023 18:00	18.7	85.5	2.3	WNW
10/06/2023 19:00	17.7	89.5	2.5	WNW
10/06/2023 20:00	17.5	90.8	1.1	WNW
10/06/2023 21:00	17.2	91.6	0.7	NNE
10/06/2023 22:00	16.7	93.1	0.2	NW
10/06/2023 23:00	16.6	93.7	0.5	NW
10/07/2023 00:00	16.4	93.9	1.5	WNW
10/07/2023 01:00	16.2	94.3	1	WNW
10/07/2023 02:00	16.1	94.8	1	NNW
10/07/2023 03:00	15.8	94.9	0.8	WNW
10/07/2023 04:00	15.4	94.9	1.2	NW
10/07/2023 05:00	15.4	95	0.6	NNW
10/07/2023 06:00	15.6	95.1	0.7	WNW
10/07/2023 07:00	15.3	95.2	0.4	NW
10/07/2023 08:00	15.4	95.2	0.7	NNW
10/07/2023 09:00	16.1	95.3	1.2	WNW
10/07/2023 10:00	18.7	85.4	0.4	WNW
10/07/2023 11:00	21.2	76	1.8	WSW
10/07/2023 12:00	22.3	71.9	2.2	W
10/07/2023 13:00	23.9	65.8	2.6	WNW
10/07/2023 14:00	24.2	63.1	2.7	WNW
10/07/2023 15:00	23.6	68.8	2.3	NW
10/07/2023 16:00	23.3	71	3	WNW
10/07/2023 17:00	21.8	75.2	2.5	NNW
10/07/2023 18:00	19.6	83.4	1.4	N
10/07/2023 19:00	18.3	87.7	0.7	N
10/07/2023 20:00	17.6	90.5	0.6	NW
10/07/2023 21:00	17.3	92.8	1.1	NW
10/07/2023 22:00	16.9	93.3	0.9	NW
10/07/2023 23:00	16.7	93.7	0.6	NW

*Nota.* Datos horarios obtenidos de la campaña de monitoreo por la estación meteorológica (E).

## Apéndice 6 Base de datos del monitoreo en la unidad de observación (puntos A y B)

**Tabla A6.1**

Resultados horarios obtenidos del registrador de datos (A)

Fecha y hora (mm/dd/aaaa hh:mm)	Temperatura del aire (°C)	Humedad relativa (%)	Fecha y hora (mm/dd/aaaa hh:mm)	Temperatura del aire (°C)	Humedad relativa (%)
10/01/2023 00:00	18.18	75.84	10/02/2023 15:00	25.70	48.42
10/01/2023 01:00	17.44	75.91	10/02/2023 16:00	24.65	51.78
10/01/2023 02:00	17.44	76.85	10/02/2023 17:00	23.11	58.40
10/01/2023 03:00	17.46	76.85	10/02/2023 18:00	21.25	63.49
10/01/2023 04:00	16.96	75.76	10/02/2023 19:00	19.77	66.82
10/01/2023 05:00	16.94	79.36	10/02/2023 20:00	19.01	69.94
10/01/2023 06:00	16.13	79.32	10/02/2023 21:00	18.15	71.35
10/01/2023 07:00	16.34	80.34	10/02/2023 22:00	16.96	72.97
10/01/2023 08:00	18.79	75.85	10/02/2023 23:00	16.15	73.69
10/01/2023 09:00	23.14	60.43	10/03/2023 00:00	15.25	74.93
10/01/2023 10:00	24.56	54.79	10/03/2023 01:00	14.91	74.75
10/01/2023 11:00	26.30	51.24	10/03/2023 02:00	14.17	75.78
10/01/2023 12:00	25.91	50.75	10/03/2023 03:00	13.93	76.21
10/01/2023 13:00	26.45	53.87	10/03/2023 04:00	13.67	76.43
10/01/2023 14:00	25.87	54.85	10/03/2023 05:00	13.31	76.69
10/01/2023 15:00	24.17	57.48	10/03/2023 06:00	13.19	76.58
10/01/2023 16:00	23.11	52.99	10/03/2023 07:00	12.92	76.89
10/01/2023 17:00	22.82	48.08	10/03/2023 08:00	17.65	65.26
10/01/2023 18:00	21.92	53.41	10/03/2023 09:00	22.63	54.42
10/01/2023 19:00	20.13	58.43	10/03/2023 10:00	25.45	48.38
10/01/2023 20:00	19.15	61.67	10/03/2023 11:00	27.58	48.85
10/01/2023 21:00	18.27	66.02	10/03/2023 12:00	27.88	48.63
10/01/2023 22:00	17.65	66.44	10/03/2023 13:00	28.17	48.12
10/01/2023 23:00	16.89	67.63	10/03/2023 14:00	27.55	53.10
10/02/2023 00:00	15.44	70.63	10/03/2023 15:00	27.06	55.78
10/02/2023 01:00	14.82	70.98	10/03/2023 16:00	25.99	57.69
10/02/2023 02:00	14.05	71.60	10/03/2023 17:00	24.15	61.91
10/02/2023 03:00	13.14	73.18	10/03/2023 18:00	21.56	67.29
10/02/2023 04:00	12.68	73.96	10/03/2023 19:00	20.29	71.35
10/02/2023 05:00	12.17	75.57	10/03/2023 20:00	19.51	73.90
10/02/2023 06:00	11.90	75.20	10/03/2023 21:00	18.68	75.94
10/02/2023 07:00	11.90	75.29	10/03/2023 22:00	17.99	76.71
10/02/2023 08:00	17.08	60.79	10/03/2023 23:00	17.23	77.73
10/02/2023 09:00	20.20	53.58	10/04/2023 00:00	16.89	77.07
10/02/2023 10:00	24.99	46.91	10/04/2023 01:00	15.63	78.55
10/02/2023 11:00	26.16	43.85	10/04/2023 02:00	16.51	78.20
10/02/2023 12:00	26.97	43.71	10/04/2023 03:00	17.63	79.47

10/02/2023 13:00	27.04	43.53	10/04/2023 04:00	17.46	79.52
10/02/2023 14:00	26.35	46.24	10/04/2023 05:00	16.99	82.11
10/04/2023 06:00	16.08	83.34	10/06/2023 03:00	15.53	67.88
10/04/2023 07:00	15.99	83.35	10/06/2023 04:00	16.15	66.09
10/04/2023 08:00	17.53	78.53	10/06/2023 05:00	14.29	61.53
10/04/2023 09:00	18.91	76.87	10/06/2023 06:00	13.76	66.57
10/04/2023 10:00	24.41	57.02	10/06/2023 07:00	13.59	67.96
10/04/2023 11:00	28.12	51.30	10/06/2023 08:00	16.42	65.25
10/04/2023 12:00	29.44	50.12	10/06/2023 09:00	20.22	62.27
10/04/2023 13:00	28.72	51.02	10/06/2023 10:00	26.06	49.68
10/04/2023 14:00	28.10	53.84	10/06/2023 11:00	30.22	48.05
10/04/2023 15:00	27.19	53.14	10/06/2023 12:00	30.42	46.80
10/04/2023 16:00	27.33	54.94	10/06/2023 13:00	31.38	38.36
10/04/2023 17:00	25.82	58.16	10/06/2023 14:00	30.07	47.28
10/04/2023 18:00	23.62	60.87	10/06/2023 15:00	28.35	50.23
10/04/2023 19:00	21.08	66.67	10/06/2023 16:00	27.26	56.19
10/04/2023 20:00	20.65	67.66	10/06/2023 17:00	24.82	59.06
10/04/2023 21:00	19.89	68.76	10/06/2023 18:00	21.84	60.53
10/04/2023 22:00	18.51	70.78	10/06/2023 19:00	20.51	63.46
10/04/2023 23:00	17.53	70.22	10/06/2023 20:00	19.48	64.54
10/05/2023 00:00	17.49	74.01	10/06/2023 21:00	18.91	65.63
10/05/2023 01:00	16.75	75.91	10/06/2023 22:00	19.13	65.43
10/05/2023 02:00	17.06	77.16	10/06/2023 23:00	17.84	67.62
10/05/2023 03:00	16.53	78.01	10/07/2023 00:00	17.44	67.79
10/05/2023 04:00	15.61	76.95	10/07/2023 01:00	17.32	69.80
10/05/2023 05:00	14.82	76.19	10/07/2023 02:00	17.46	66.03
10/05/2023 06:00	13.83	76.33	10/07/2023 03:00	16.77	68.45
10/05/2023 07:00	13.81	76.07	10/07/2023 04:00	17.01	67.06
10/05/2023 08:00	17.23	70.34	10/07/2023 05:00	16.61	69.90
10/05/2023 09:00	22.97	57.14	10/07/2023 06:00	16.92	71.00
10/05/2023 10:00	24.85	54.58	10/07/2023 07:00	16.25	70.15
10/05/2023 11:00	31.54	43.65	10/07/2023 08:00	17.18	69.95
10/05/2023 12:00	32.85	38.65	10/07/2023 09:00	18.11	65.08
10/05/2023 13:00	32.51	39.32	10/07/2023 10:00	24.29	54.13
10/05/2023 14:00	31.05	42.86	10/07/2023 11:00	26.97	47.64
10/05/2023 15:00	30.90	40.85	10/07/2023 12:00	27.92	45.98
10/05/2023 16:00	29.27	46.17	10/07/2023 13:00	27.43	52.86
10/05/2023 17:00	27.65	53.18	10/07/2023 14:00	29.17	50.15
10/05/2023 18:00	24.36	59.55	10/07/2023 15:00	27.68	55.52
10/05/2023 19:00	22.99	60.90	10/07/2023 16:00	26.87	57.38
10/05/2023 20:00	21.96	63.19	10/07/2023 17:00	24.80	58.81
10/05/2023 21:00	20.60	65.00	10/07/2023 18:00	22.06	60.08
10/05/2023 22:00	18.56	66.96	10/07/2023 19:00	20.03	63.71
10/05/2023 23:00	17.53	66.25	10/07/2023 20:00	19.77	64.17

10/06/2023 00:00	17.27	68.43	10/07/2023 21:00	18.63	65.37
10/06/2023 01:00	17.42	65.52	10/07/2023 22:00	18.49	65.56
10/06/2023 02:00	15.77	65.88	10/07/2023 23:00	18.70	65.33

**Tabla A6.2**

Resultados horarios obtenidos del registrador de datos (B)

Fecha y hora (mm/dd/aaaa hh:mm)	Temperatura del aire (°C)	Humedad relativa (%)	Fecha y hora (mm/dd/aaaa hh:mm)	Temperatura del aire (°C)	Humedad relativa (%)
10/01/2023 00:00	18.34	83.22	10/02/2023 17:00	23.76	55.49
10/01/2023 01:00	17.42	84.03	10/02/2023 18:00	21.56	64.78
10/01/2023 02:00	17.46	84.64	10/02/2023 19:00	20.08	70.93
10/01/2023 03:00	17.23	85.22	10/02/2023 20:00	19.20	75.41
10/01/2023 04:00	16.80	84.43	10/02/2023 21:00	18.70	75.63
10/01/2023 05:00	16.80	90.42	10/02/2023 22:00	17.13	79.45
10/01/2023 06:00	15.80	91.31	10/02/2023 23:00	15.96	81.61
10/01/2023 07:00	15.94	93.61	10/03/2023 00:00	15.63	80.96
10/01/2023 08:00	17.58	91.02	10/03/2023 01:00	14.79	81.74
10/01/2023 09:00	21.65	70.97	10/03/2023 02:00	14.12	83.58
10/01/2023 10:00	23.42	61.36	10/03/2023 03:00	13.62	84.55
10/01/2023 11:00	24.90	57.96	10/03/2023 04:00	13.28	86.13
10/01/2023 12:00	25.14	56.53	10/03/2023 05:00	12.80	86.39
10/01/2023 13:00	24.97	61.61	10/03/2023 06:00	12.73	86.14
10/01/2023 14:00	24.85	61.53	10/03/2023 07:00	12.41	87.05
10/01/2023 15:00	23.93	62.06	10/03/2023 08:00	14.75	82.90
10/01/2023 16:00	23.16	56.12	10/03/2023 09:00	19.94	67.29
10/01/2023 17:00	22.87	50.66	10/03/2023 10:00	23.18	57.67
10/01/2023 18:00	21.82	53.31	10/03/2023 11:00	27.24	48.68
10/01/2023 19:00	20.08	58.79	10/03/2023 12:00	27.51	47.55
10/01/2023 20:00	19.01	63.56	10/03/2023 13:00	28.44	45.00
10/01/2023 21:00	18.18	71.44	10/03/2023 14:00	29.79	45.03
10/01/2023 22:00	17.39	72.50	10/03/2023 15:00	29.12	47.42
10/01/2023 23:00	16.49	74.70	10/03/2023 16:00	27.09	53.29
10/02/2023 00:00	15.18	78.48	10/03/2023 17:00	25.23	59.38
10/02/2023 01:00	14.46	78.96	10/03/2023 18:00	22.68	68.17
10/02/2023 02:00	13.57	79.90	10/03/2023 19:00	20.94	75.13
10/02/2023 03:00	12.80	82.33	10/03/2023 20:00	19.89	79.45
10/02/2023 04:00	12.36	82.20	10/03/2023 21:00	19.27	81.48
10/02/2023 05:00	11.81	84.02	10/03/2023 22:00	18.25	83.86
10/02/2023 06:00	11.25	84.64	10/03/2023 23:00	17.39	86.67
10/02/2023 07:00	11.39	85.10	10/04/2023 00:00	16.99	86.87
10/02/2023 08:00	14.67	75.15	10/04/2023 01:00	15.99	86.88
10/02/2023 09:00	20.13	59.65	10/04/2023 02:00	16.84	86.00
10/02/2023 10:00	23.64	47.58	10/04/2023 03:00	17.63	89.91
10/02/2023 11:00	25.82	41.43	10/04/2023 04:00	17.34	90.96
10/02/2023 12:00	27.55	38.87	10/04/2023 05:00	16.92	92.07
10/02/2023 13:00	27.97	38.82	10/04/2023 06:00	15.80	93.21

10/02/2023 14:00	27.46	40.42	10/04/2023 07:00	15.58	95.52
10/02/2023 15:00	27.70	41.50	10/04/2023 08:00	16.77	95.62
10/02/2023 16:00	25.38	47.06	10/04/2023 09:00	18.34	89.11
10/04/2023 10:00	22.78	71.74	10/06/2023 07:00	13.76	89.17
10/04/2023 11:00	25.96	58.31	10/06/2023 08:00	15.27	91.81
10/04/2023 12:00	28.49	51.79	10/06/2023 09:00	19.84	84.05
10/04/2023 13:00	29.52	46.04	10/06/2023 10:00	24.12	66.51
10/04/2023 14:00	30.42	46.34	10/06/2023 11:00	28.44	51.31
10/04/2023 15:00	30.55	45.25	10/06/2023 12:00	30.52	43.23
10/04/2023 16:00	28.84	49.30	10/06/2023 13:00	33.57	31.84
10/04/2023 17:00	27.21	53.40	10/06/2023 14:00	31.84	40.02
10/04/2023 18:00	24.44	64.42	10/06/2023 15:00	30.72	42.03
10/04/2023 19:00	22.32	73.90	10/06/2023 16:00	27.95	53.09
10/04/2023 20:00	21.25	78.63	10/06/2023 17:00	26.04	60.24
10/04/2023 21:00	20.46	81.12	10/06/2023 18:00	22.30	72.46
10/04/2023 22:00	18.91	84.09	10/06/2023 19:00	20.91	78.28
10/04/2023 23:00	18.37	79.91	10/06/2023 20:00	20.51	79.72
10/05/2023 00:00	18.44	89.14	10/06/2023 21:00	19.67	82.82
10/05/2023 01:00	17.11	90.92	10/06/2023 22:00	18.87	86.58
10/05/2023 02:00	16.92	92.70	10/06/2023 23:00	18.94	86.76
10/05/2023 03:00	16.42	93.89	10/07/2023 00:00	18.39	87.61
10/05/2023 04:00	15.44	93.90	10/07/2023 01:00	17.96	90.25
10/05/2023 05:00	14.86	94.24	10/07/2023 02:00	17.53	90.39
10/05/2023 06:00	13.50	93.32	10/07/2023 03:00	17.13	92.81
10/05/2023 07:00	13.28	91.89	10/07/2023 04:00	16.82	92.89
10/05/2023 08:00	15.13	93.06	10/07/2023 05:00	16.73	93.65
10/05/2023 09:00	19.94	81.57	10/07/2023 06:00	16.61	94.20
10/05/2023 10:00	26.26	59.07	10/07/2023 07:00	16.44	94.10
10/05/2023 11:00	30.42	43.75	10/07/2023 08:00	16.87	94.35
10/05/2023 12:00	33.50	35.46	10/07/2023 09:00	18.46	88.11
10/05/2023 13:00	34.81	33.39	10/07/2023 10:00	21.68	74.03
10/05/2023 14:00	34.52	33.50	10/07/2023 11:00	24.00	65.32
10/05/2023 15:00	32.92	34.21	10/07/2023 12:00	26.77	57.40
10/05/2023 16:00	30.90	39.39	10/07/2023 13:00	30.09	46.31
10/05/2023 17:00	28.92	47.59	10/07/2023 14:00	30.85	43.30
10/05/2023 18:00	25.82	59.90	10/07/2023 15:00	29.79	48.97
10/05/2023 19:00	23.30	73.13	10/07/2023 16:00	28.35	53.53
10/05/2023 20:00	22.13	79.30	10/07/2023 17:00	25.77	61.13
10/05/2023 21:00	21.08	82.21	10/07/2023 18:00	22.71	71.55
10/05/2023 22:00	19.48	85.35	10/07/2023 19:00	21.27	76.38
10/05/2023 23:00	18.03	88.58	10/07/2023 20:00	20.37	80.65
10/06/2023 00:00	18.30	86.36	10/07/2023 21:00	19.70	83.88
10/06/2023 01:00	17.89	88.25	10/07/2023 22:00	19.15	86.95
10/06/2023 02:00	16.70	86.48	10/07/2023 23:00	18.56	89.00

10/06/2023 03:00	16.27	89.47
10/06/2023 04:00	15.89	87.45
10/06/2023 05:00	14.41	74.34
10/06/2023 06:00	14.12	84.50

---

## Apéndice 7 Resultados de TST de simulaciones del cañón BA

**Tabla A7.1**

Resultados de TST horarios por receptor, de simulación de escenarios del cañón BA

Hora	R1 - Contiguo a edificio				R2 - Entre arbolado				R3 - Cercano a árbol				R4 - Bajo sombra de árbol			
	Base	Disp	Alin int	Agr int	Base	Disp	Alin int	Agr int	Base	Disp	Alin int	Agr int	Base	Disp	Alin int	Agr int
01:00	17.27	17.31	17.32	17.33	15.53	15.52	15.54	15.57	15.58	15.65	15.63	15.63	15.57	15.66	15.66	15.68
02:00	16.43	16.47	16.48	16.49	14.99	14.97	15.00	15.02	15.02	15.09	15.06	15.06	14.99	15.08	15.09	15.10
03:00	15.73	15.77	15.79	15.80	14.34	14.32	14.35	14.38	14.36	14.43	14.41	14.41	14.34	14.43	14.43	14.45
04:00	14.99	15.04	15.06	15.07	13.50	13.48	13.51	13.54	13.52	13.60	13.57	13.57	13.50	13.60	13.61	13.62
05:00	14.45	14.50	14.52	14.53	13.13	13.11	13.15	13.18	13.15	13.22	13.19	13.19	13.13	13.22	13.23	13.24
06:00	13.85	13.90	13.92	13.93	12.29	12.27	12.29	12.32	12.30	12.37	12.35	12.35	12.31	12.38	12.39	12.40
07:00	15.84	15.67	14.57	14.64	14.90	13.63	13.35	14.78	13.99	14.01	14.01	14.00	15.08	13.46	14.66	13.39
08:00	21.31	17.57	17.10	15.96	20.43	16.55	18.85	19.86	20.14	20.25	20.26	20.22	20.77	20.40	20.46	20.41
09:00	27.46	19.91	19.48	18.47	25.54	24.86	24.91	25.08	25.21	24.33	24.34	24.30	25.90	25.66	25.71	25.65
10:00	33.36	30.08	29.63	29.10	30.13	29.62	29.70	29.82	29.81	24.75	24.75	24.73	30.46	30.21	30.27	30.13
11:00	38.38	36.59	36.20	35.86	33.68	33.13	33.29	33.45	33.46	26.81	26.84	26.82	33.96	31.78	31.20	27.80
12:00	41.57	40.39	40.03	39.80	36.32	35.70	35.90	36.11	36.20	28.65	28.67	28.63	36.49	32.94	32.90	28.89
13:00	37.72	36.77	36.45	36.36	37.67	36.76	37.03	37.38	37.66	33.45	33.50	33.45	37.75	31.96	31.95	28.56
14:00	33.59	32.70	32.45	32.46	37.72	36.51	36.75	37.14	37.80	33.06	33.09	33.02	37.75	31.05	31.03	29.37
15:00	31.88	30.99	30.80	30.86	36.46	34.85	29.71	29.01	36.69	31.94	31.96	31.91	36.32	32.57	32.47	30.44
16:00	30.06	29.20	29.04	29.11	32.11	30.47	30.01	26.75	32.54	28.83	28.82	28.83	31.87	29.10	29.00	27.44
17:00	27.74	27.05	26.94	26.96	24.80	24.15	23.99	23.86	25.31	23.39	23.34	23.37	24.82	23.52	23.46	22.66
18:00	24.99	24.53	24.44	24.45	20.92	20.60	20.57	20.57	21.31	20.43	20.37	20.39	20.89	20.44	20.42	20.04
19:00	22.88	22.58	22.51	22.51	18.90	18.72	18.75	18.78	19.20	18.86	18.81	18.82	18.87	18.78	18.78	18.66
20:00	21.38	21.18	21.13	21.12	17.76	17.65	17.71	17.75	17.99	17.89	17.84	17.85	17.73	17.80	17.81	17.80
21:00	20.04	19.90	19.86	19.85	16.53	16.47	16.53	16.59	16.72	16.75	16.70	16.71	16.50	16.67	16.68	16.73
22:00	18.86	18.78	18.75	18.74	15.49	15.45	15.52	15.58	15.63	15.75	15.70	15.71	15.46	15.68	15.69	15.77
23:00	17.99	17.94	17.92	17.91	14.92	14.89	14.97	15.04	15.02	15.19	15.15	15.15	14.89	15.14	15.15	15.26
Min	13.85	13.90	13.92	13.93	12.29	12.27	12.29	12.32	12.30	12.37	12.35	12.35	12.31	12.38	12.39	12.40
Max	41.57	40.39	40.03	39.80	37.72	36.76	37.03	37.38	37.80	33.45	33.50	33.45	37.75	32.94	32.90	30.44
Med	24.25	23.25	23.06	22.93	22.52	21.90	21.80	21.81	22.55	20.81	20.80	20.79	22.58	21.37	21.39	20.59

Nota. Gradiente de color (de menor a mayor) de valores de TST (°C).

## Apéndice 8 Resultados de Tair de simulaciones del cañón BA

**Tabla A8.1**

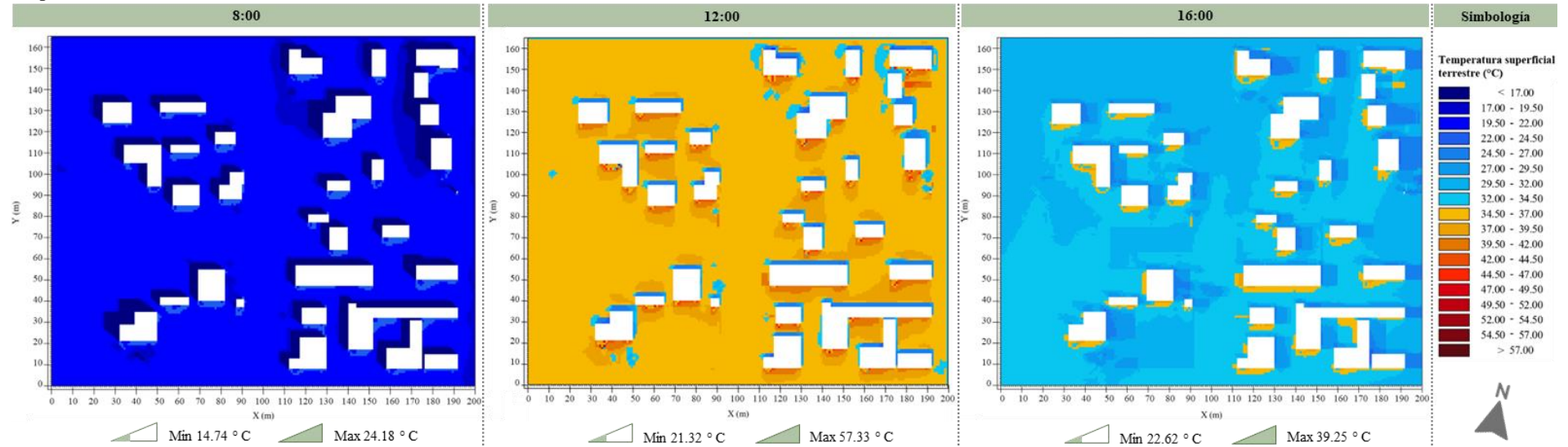
Resultados de Tair horarios por receptor, de simulación de escenarios del cañón BA

Hora	R1 - Contiguo a edificio				R2 - Entre arbolado				R3 - Cercano a árbol				R4 - Bajo sombra de árbol			
	Base	Disp	Alin int	Agr int	Base	Disp	Alin int	Agr int	Base	Disp	Alin int	Agr int	Base	Disp	Alin int	Agr int
01:00	16.1	16.0	16.0	16.0	15.9	15.9	15.9	15.9	16.0	15.9	16.0	16.0	15.8	15.8	15.8	15.8
02:00	15.6	15.6	15.6	15.6	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.4	15.4	15.4	15.4
03:00	15.0	14.9	14.9	14.9	14.8	14.8	14.8	14.8	14.9	14.8	14.8	14.8	14.7	14.7	14.7	14.7
04:00	14.0	14.0	14.0	14.0	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.8	13.8	13.8	13.8
05:00	13.8	13.7	13.7	13.7	13.7	13.6	13.6	13.6	13.7	13.6	13.7	13.7	13.6	13.5	13.5	13.5
06:00	12.6	12.5	12.5	12.5	12.5	12.4	12.4	12.4	12.5	12.5	12.5	12.5	12.4	12.4	12.4	12.4
07:00	14.2	13.6	13.4	13.4	13.6	13.5	13.5	13.5	13.4	13.4	13.4	13.4	13.8	13.5	13.5	13.5
08:00	18.4	17.6	17.1	17.2	17.4	17.0	16.8	16.8	17.3	17.3	17.3	17.3	18.0	17.5	17.5	17.6
09:00	22.5	21.6	21.1	21.1	21.5	21.1	20.9	21.0	21.4	21.4	21.4	21.4	22.1	21.8	21.7	21.8
10:00	26.9	26.2	25.8	25.9	26.0	25.7	25.6	25.6	26.1	25.9	25.9	25.9	26.6	26.2	26.2	26.2
11:00	30.8	30.2	30.0	30.1	30.1	29.8	29.7	29.7	30.3	30.0	30.1	30.1	30.6	30.1	30.1	30.1
12:00	33.0	32.3	32.2	32.3	32.6	32.3	32.2	32.2	32.9	32.5	32.6	32.7	33.1	32.3	32.4	32.4
13:00	33.0	32.2	32.1	32.2	33.1	32.6	32.5	32.6	33.5	32.9	33.0	33.1	33.5	32.4	32.5	32.5
14:00	31.8	30.9	30.8	30.9	32.4	31.6	31.5	31.5	32.6	32.0	32.1	32.1	32.6	31.2	31.2	31.3
15:00	30.7	29.6	29.6	29.7	31.6	30.4	30.1	30.0	31.9	31.1	31.2	31.3	31.5	30.0	29.9	30.0
16:00	28.9	27.9	27.9	28.0	29.4	28.1	27.9	27.9	29.9	29.1	29.1	29.2	29.2	27.9	27.9	27.9
17:00	25.6	25.1	25.1	25.2	25.2	24.7	24.7	24.8	25.8	25.4	25.3	25.4	25.0	24.4	24.4	24.4
18:00	22.6	22.3	22.3	22.3	22.0	21.8	21.8	21.8	22.4	22.2	22.2	22.2	21.7	21.4	21.4	21.4
19:00	20.6	20.4	20.4	20.4	20.0	19.8	19.8	19.8	20.3	20.1	20.1	20.1	19.7	19.5	19.5	19.5
20:00	19.5	19.4	19.4	19.4	18.9	18.8	18.8	18.8	19.2	19.0	19.0	19.0	18.6	18.6	18.6	18.6
21:00	18.2	18.1	18.1	18.1	17.6	17.6	17.6	17.6	17.8	17.7	17.7	17.7	17.4	17.3	17.3	17.3
22:00	17.0	16.9	17.0	16.9	16.5	16.5	16.5	16.5	16.7	16.6	16.6	16.6	16.3	16.3	16.3	16.3
23:00	16.4	16.4	16.4	16.4	16.0	16.0	16.0	16.0	16.1	16.1	16.1	16.1	15.8	15.8	15.8	15.8
Min	12.575	12.521	12.533	12.530	12.465	12.424	12.426	12.427	12.494	12.468	12.478	12.479	12.429	12.373	12.373	12.371
Max	33.021	32.348	32.165	32.255	33.142	32.645	32.531	32.583	33.451	32.913	33.027	33.095	33.525	32.412	32.453	32.518
Med	21.6	21.2	21.1	21.1	21.3	21.0	21.0	21.0	21.5	21.3	21.3	21.3	21.4	21.0	20.9	21.0

Nota. Gradiente de color (de menor a mayor) de valores de Tair (°C).

## Apéndice 9 Mapas de isotermas de TST - cañón BA

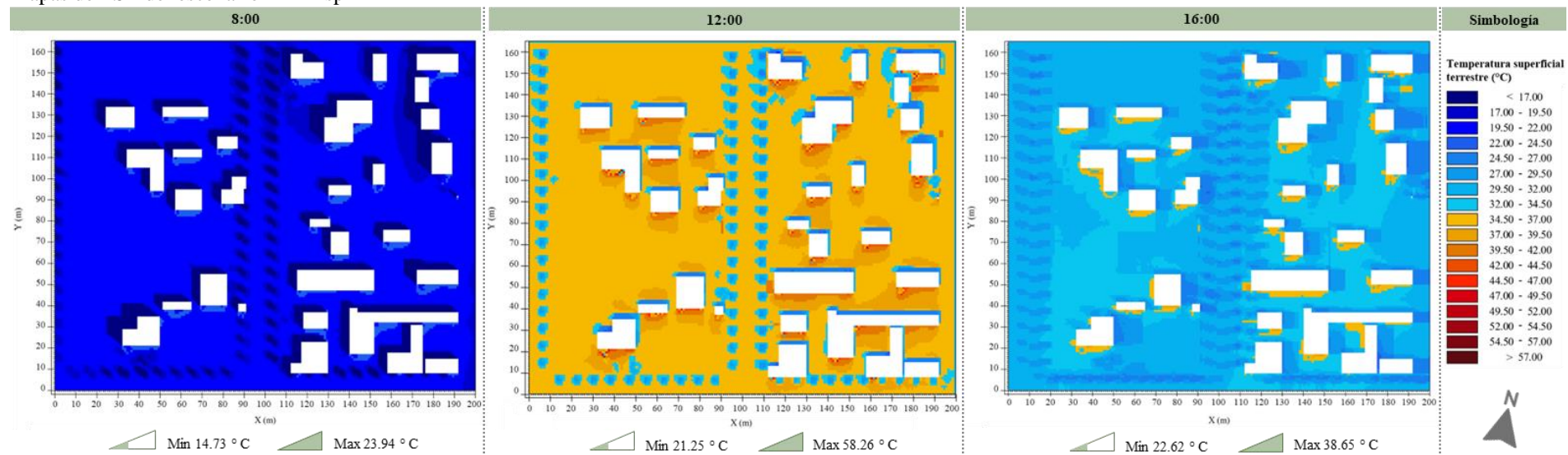
**Figura A9.1**  
Mapas de TST del escenario BA



*Nota.* Mapas de isotermas sobre los resultados de la TST de la simulación del escenario BA. Indicación de TST mínima y máxima registrada en cada mapa.

**Figura A9.2**

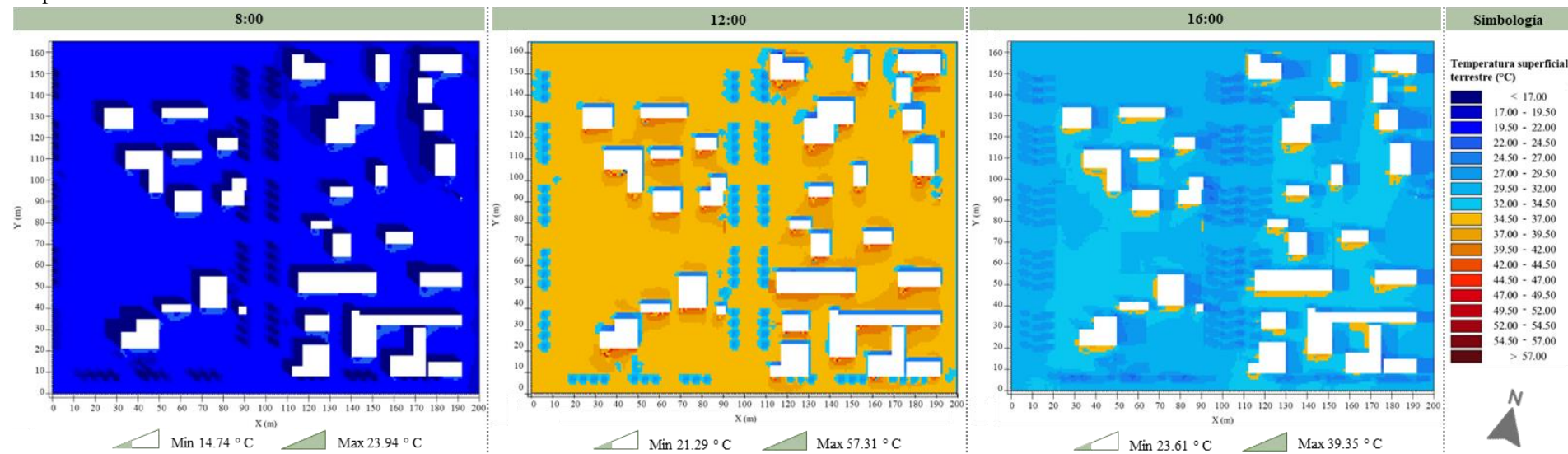
Mapas de TST del escenario BA-Disp



*Nota.* Mapas de isotermas sobre los resultados de la TST de la simulación del cañón BA disperso. Indicación de TST mínima y máxima registrada en cada mapa.

**Figura A9.3**

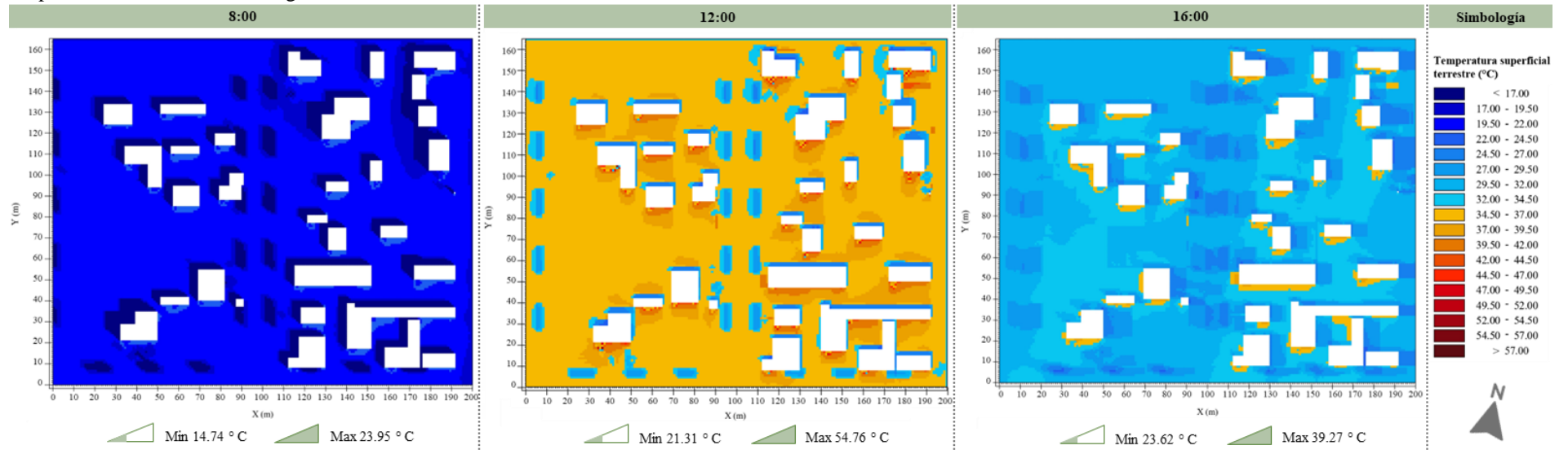
Mapas de TST del cañón BA-Alin int



*Nota.* Mapas de isotermas sobre los resultados de la TST de la simulación del escenario BA alineado intercalado. Indicación de TST mínima y máxima registrada en cada mapa.

**Figura A9.4**

Mapas de TST del cañón BA-Agr int



*Nota.* Mapas de isotermas sobre los resultados de la TST de la simulación del escenario BA agrupado intercalado. Indicación de TST mínima y máxima registrada en cada mapa.

## Apéndice 10 Resultados de TST de simulaciones del cañón BB

**Tabla A10.1**

Resultados de TST horarios por receptor, de simulación de escenarios del cañón BB

Hora	R1 - Contiguo a edificio				R2 - Entre arbolado				R3 - Cercano a árbol				R4 - Bajo sombra de árbol			
	Base	Disp	Alin int	Agr int	Base	Disp	Alin int	Agr int	Base	Disp	Alin int	Agr int	Base	Disp	Alin int	Agr int
01:00	15.72	15.72	15.70	15.69	15.57	15.55	15.58	15.59	15.60	15.67	15.61	15.60	15.55	15.56	15.59	15.58
02:00	15.21	15.21	15.18	15.18	15.05	15.03	15.07	15.07	15.08	15.14	15.09	15.08	15.08	15.09	15.12	15.12
03:00	14.57	14.56	14.54	14.53	14.40	14.38	14.42	14.42	14.43	14.49	14.43	14.43	14.44	14.46	14.48	14.48
04:00	13.72	13.72	13.70	13.69	13.56	13.53	13.57	13.58	13.58	13.65	13.59	13.58	13.58	13.60	13.63	13.62
05:00	13.38	13.37	13.34	13.34	13.20	13.18	13.22	13.23	13.23	13.29	13.23	13.22	13.26	13.28	13.31	13.30
06:00	12.46	12.46	12.44	12.43	12.32	12.30	12.33	12.33	12.33	12.40	12.35	12.34	12.31	12.33	12.35	12.34
07:00	14.79	14.50	14.19	14.13	14.68	13.22	13.23	13.18	13.30	13.33	13.32	13.31	14.12	12.79	12.83	12.82
08:00	20.02	16.84	19.03	19.84	19.96	16.17	16.11	16.23	18.13	18.20	18.20	18.17	19.37	15.58	17.98	17.98
09:00	24.98	20.50	22.81	24.86	24.97	24.32	24.29	24.20	24.56	23.81	24.82	24.70	24.38	23.65	23.81	23.85
10:00	29.63	28.49	29.15	29.55	29.54	29.06	29.08	28.99	29.13	24.20	29.43	29.30	28.84	28.27	28.44	28.47
11:00	33.38	32.24	32.90	33.30	33.09	32.61	32.67	32.56	32.70	26.11	33.01	32.88	32.27	31.66	31.91	31.92
12:00	36.44	35.08	35.77	36.34	35.96	35.36	35.46	35.33	35.54	27.98	35.85	35.71	35.03	34.33	34.63	34.62
13:00	38.28	36.40	37.22	37.98	37.63	36.70	36.86	36.72	37.23	32.98	37.37	37.28	36.50	35.54	35.98	35.96
14:00	38.31	36.32	37.09	37.83	37.94	36.69	36.85	36.66	37.64	32.73	37.49	37.50	36.51	35.34	35.81	35.73
15:00	36.53	34.86	35.41	35.94	36.74	35.16	30.98	28.87	36.68	31.69	36.20	36.30	35.13	33.70	28.98	27.92
16:00	32.05	30.88	31.22	31.54	32.40	30.88	27.31	26.88	32.58	28.69	31.91	32.06	31.00	29.73	29.54	26.25
17:00	25.77	25.07	25.23	25.39	25.25	24.59	24.30	24.12	25.62	23.56	25.16	25.26	24.59	24.14	24.12	23.84
18:00	22.21	21.84	21.89	21.97	21.32	20.96	20.89	20.82	21.68	20.69	21.41	21.46	21.00	20.81	20.86	20.72
19:00	20.15	19.94	19.94	19.99	19.23	19.02	19.03	19.01	19.57	19.14	19.38	19.41	19.06	18.98	19.04	18.96
20:00	18.93	18.79	18.77	18.80	18.05	17.90	17.95	17.95	18.34	18.16	18.19	18.21	18.01	17.98	18.04	17.99
21:00	17.64	17.55	17.52	17.54	16.79	16.68	16.75	16.76	17.05	17.02	16.93	16.95	16.80	16.81	16.87	16.83
22:00	16.53	16.48	16.44	16.45	15.71	15.63	15.72	15.74	15.95	16.01	15.85	15.86	15.77	15.79	15.86	15.83
23:00	15.89	15.86	15.81	15.81	15.12	15.06	15.15	15.17	15.32	15.44	15.23	15.24	15.25	15.29	15.35	15.33
Min	12.46	12.46	12.44	12.43	12.32	12.30	12.33	12.33	12.33	12.40	12.35	12.34	12.31	12.33	12.35	12.34
Max	38.31	36.40	37.22	37.98	37.94	36.70	36.86	36.72	37.64	32.98	37.49	37.50	36.51	35.54	35.98	35.96
Med	22.90	22.03	22.40	22.70	22.54	21.91	21.60	21.45	22.40	20.63	22.35	22.34	22.08	21.51	21.50	21.28

Nota. Gradiente de color (de menor a mayor) de valores de TST (°C).

## Apéndice 11 Resultados de Tair de simulaciones del cañón BB

**Tabla A11.1**

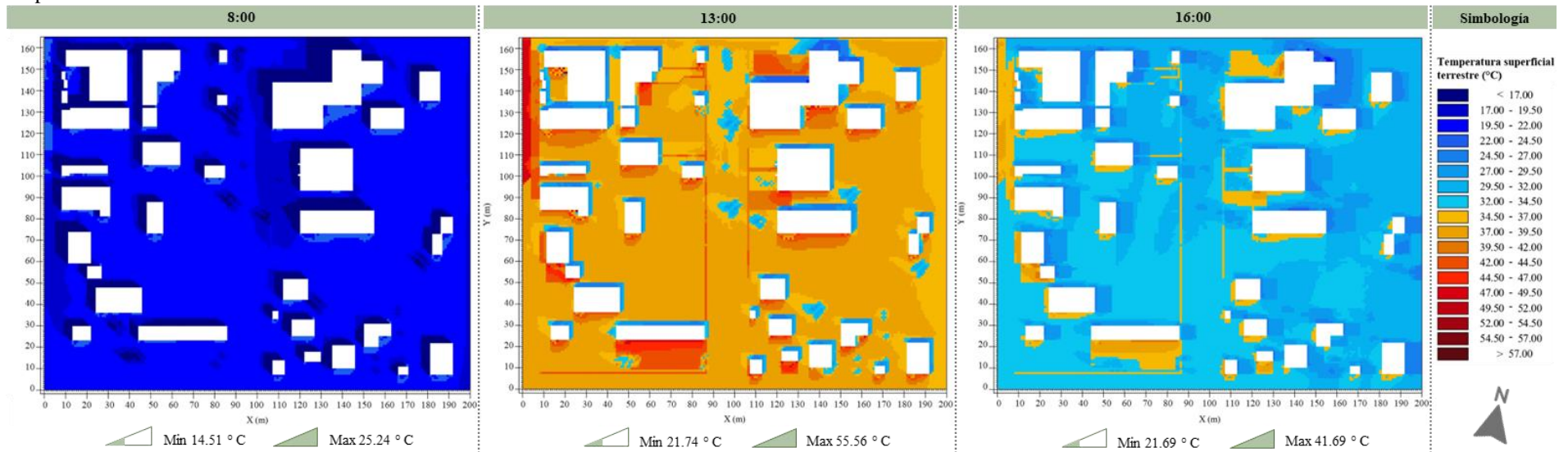
Resultados de Tair horarios por receptor, de simulación de escenarios del cañón BB

Hora	R1 - Contiguo a edificio				R2 - Entre arbolado				R3 - Cercano a árbol				R4 - Bajo sombra de árbol			
	Base	Disp	Alin int	Agr int	Base	Disp	Alin int	Agr int	Base	Disp	Alin int	Agr int	Base	Disp	Alin int	Agr int
01:00	16.1	16.0	16.0	16.0	16.0	15.9	15.9	15.9	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
02:00	15.7	15.6	15.6	15.6	15.6	15.5	15.5	15.5	15.6	15.6	15.6	15.6	15.7	15.7	15.7	15.7
03:00	15.0	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	15.0	15.0	15.0	15.0
04:00	14.1	14.0	14.0	14.0	14.0	13.9	13.9	13.9	14.0	14.0	14.0	14.0	14.1	14.1	14.1	14.1
05:00	13.8	13.8	13.8	13.8	13.7	13.7	13.7	13.7	13.8	13.7	13.7	13.7	13.9	13.9	13.9	13.9
06:00	12.6	12.6	12.6	12.6	12.5	12.5	12.5	12.5	12.6	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
07:00	13.8	13.4	13.5	13.6	13.4	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	12.9	12.9	12.9	12.9
08:00	17.7	17.0	17.3	17.4	17.1	16.6	16.5	16.4	17.0	17.0	17.0	17.0	16.2	15.8	15.8	15.8
09:00	21.8	21.0	21.4	21.5	21.2	20.7	20.7	20.6	21.1	21.0	21.1	21.1	20.1	19.7	19.7	19.8
10:00	26.4	25.7	26.0	26.0	25.7	25.4	25.4	25.4	25.7	25.6	25.7	25.7	24.5	24.2	24.3	24.4
11:00	30.5	29.9	30.1	30.1	29.9	29.6	29.6	29.6	30.0	29.7	29.9	30.0	28.6	28.3	28.4	28.5
12:00	32.8	32.3	32.4	32.4	32.5	32.2	32.2	32.2	32.7	32.3	32.5	32.6	31.0	30.8	30.9	30.9
13:00	33.0	32.4	32.5	32.5	33.2	32.7	32.6	32.6	33.5	32.8	33.0	33.2	31.4	31.0	31.2	31.3
14:00	31.9	31.1	31.2	31.3	32.4	31.7	31.6	31.6	32.7	31.9	32.1	32.3	30.3	29.8	30.0	30.1
15:00	30.8	30.0	30.0	30.1	31.6	30.5	30.3	30.2	32.0	31.1	31.2	31.4	29.4	28.7	28.7	28.8
16:00	28.8	28.0	28.1	28.2	29.6	28.4	28.3	28.2	30.1	29.1	29.2	29.3	27.8	27.0	27.2	27.4
17:00	25.5	25.1	25.1	25.2	25.7	25.2	25.2	25.2	26.2	25.7	25.7	25.8	24.9	24.7	24.8	24.9
18:00	22.6	22.3	22.3	22.4	22.5	22.2	22.2	22.2	22.9	22.7	22.7	22.7	22.1	22.0	22.1	22.1
19:00	20.5	20.4	20.4	20.4	20.4	20.2	20.2	20.2	20.8	20.6	20.6	20.6	20.2	20.1	20.1	20.1
20:00	19.5	19.3	19.4	19.4	19.2	19.1	19.1	19.1	19.6	19.5	19.5	19.5	19.2	19.2	19.2	19.2
21:00	18.2	18.1	18.1	18.1	17.9	17.8	17.8	17.8	18.2	18.1	18.1	18.1	17.9	17.9	17.9	17.9
22:00	17.1	17.0	17.0	17.0	16.8	16.7	16.7	16.7	17.1	17.0	17.0	17.0	16.9	16.9	16.9	16.9
23:00	16.5	16.4	16.4	16.5	16.3	16.2	16.2	16.2	16.5	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4
Min	12.631	12.583	12.583	12.583	12.523	12.485	12.484	12.483	12.556	12.534	12.535	12.542	12.530	12.532	12.537	12.537
Max	33.046	32.387	32.462	32.539	33.170	32.697	32.631	32.636	33.457	32.798	33.000	33.198	31.390	31.008	31.176	31.255
Med	21.5	21.1	21.2	21.3	21.4	21.1	21.1	21.0	21.6	21.3	21.4	21.4	20.7	20.5	20.6	20.6

Nota. Gradiente de color (de menor a mayor) de valores de Tair (°C).

## Apéndice 12 Mapas de isotermas de TST - cañón BB

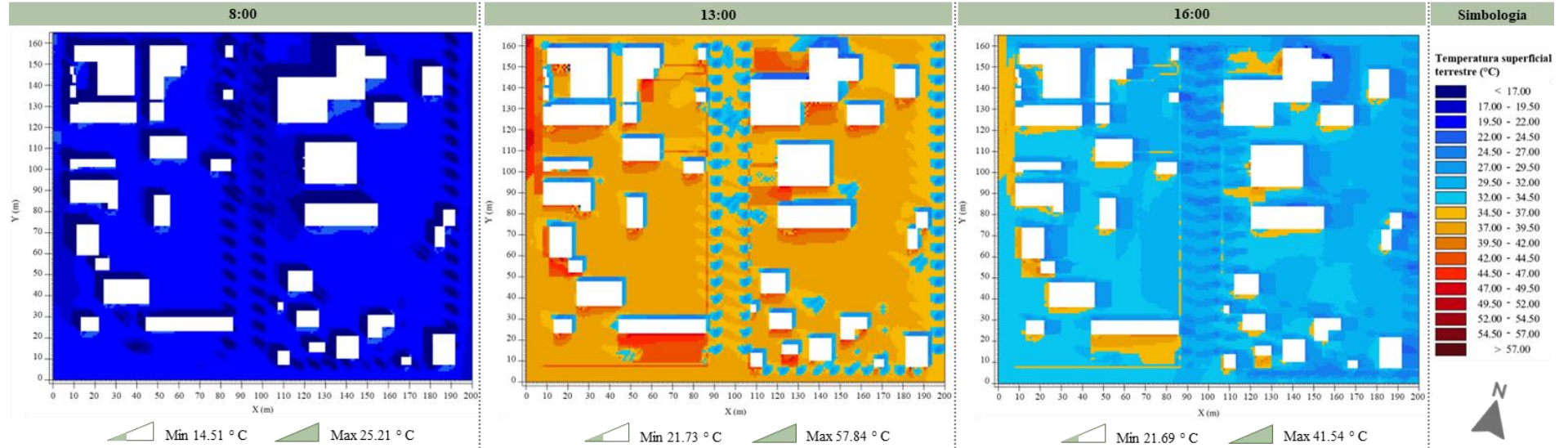
**Figura A12.1**  
Mapas de TST del escenario BB



*Nota.* Mapas de isotermas sobre los resultados de la TST de la simulación del escenario BB. Indicación de TST mínima y máxima registrada en cada mapa.

**Figura A12.2**

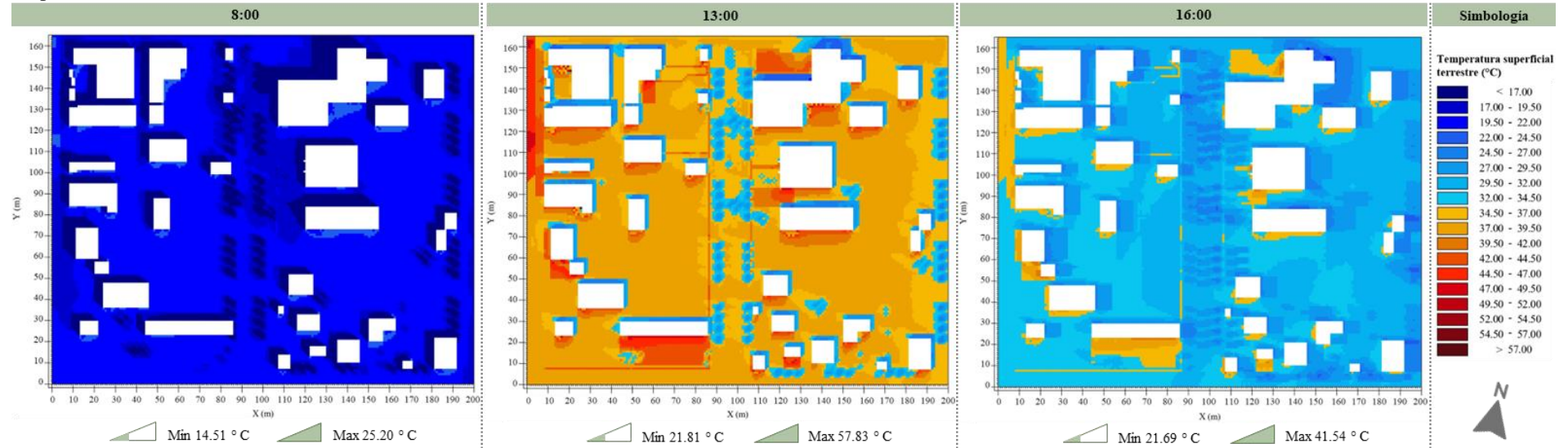
Mapas de TST del escenario BB-Disp



*Nota.* Mapas de isotermas sobre los resultados de la TST de la simulación del escenario BB disperso. Indicación de TST mínima y máxima registrada en cada mapa.

**Figura A12.3**

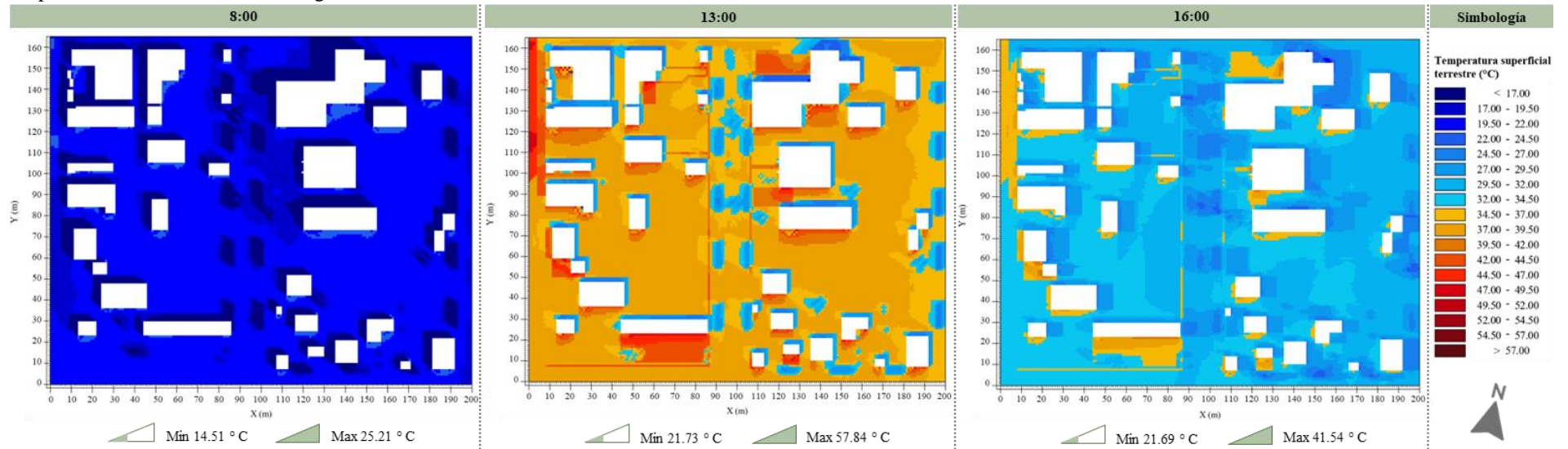
Mapas de TST del escenario BB- Alin int



*Nota.* Mapas de isotermas sobre los resultados de la TST de la simulación del escenario BB alineado intercalado. Indicación de TST mínima y máxima registrada en cada mapa.

**Figura A12.4**

Mapas de TST del escenario BB-Agr int



*Nota.* Mapas de isotermas sobre los resultados de la TST de la simulación del escenario BB agrupado intercalado. Indicación de TST mínima y máxima registrada en cada mapa.



---

BRENDA YADIRA GONZÁLEZ LÓPEZ  
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO  
9 DE AGOSTO 2024