

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

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

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO



IMPACTO DE LA VEGETACIÓN Y CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE CAÑONES URBANOS, SOBRE EL CONFORT TÉRMICO.

T E S I S

que para obtener el grado de

MAESTRA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

Presenta

GLADYS ADRIANA ACOSTA FERNÁNDEZ

Directora de Tesis

DRA. KAREN ESTRELLA MARTÍNEZ TORRES

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, JUNIO 2022

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

IMPACTO DE LA VEGETACIÓN Y CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE CAÑONES
URBANOS, SOBRE EL CONFORT TÉRMICO.

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

GLADYS ADRIANA ACOSTA FERNÁNDEZ

Correo electrónico: gladys.acosta@uabc.edu.mx
Identificador ORCID: 0000-0003-0935-7471

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

Co-Director de tesis: Mtro. Peter Chung Alonso
Identificador ORCID: 0000-0002-3724-1938

Revisor de tesis: Mtro. Jesús Abelardo Licón Portillo
Revisor de tesis: Dr. Marcos Eduardo González Trevizo
Revisor de tesis: Dr. Francisco Fernández Melchor

Ensenada, B.C. Junio de 2022

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

**Impacto de la vegetación y configuración espacial de cañones
urbanos, sobre el confort térmico.**

TESIS

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

Gladys Adriana Acosta Fernández

Aprobada por:



Dra. Karen Estrella Martínez Torres
Directora de tesis



Mtro. Peter Chung Alonso
Co-director de tesis



Mtro. Jesús Abelardo Licón Portillo
Miembro del comité tutorial



Dr. Marcos Eduardo González Trevizo
Miembro del comité tutorial



Dr. Francisco Fernández Melchor
Miembro del comité tutorial

Ensenada, Baja California, México. Junio 2022

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., 17 de junio de 2022



**Gladys Adriana Acosta
Fernández**

AVAL DE TERMINACIÓN DE TESIS

Fecha: 17 de junio de 2022

DR. MIGUEL ENRÍQUE MARTÍNEZ ROSAS
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:

GLADYS ADRIANA ACOSTA FERNÁNDEZ

ha concluido su tesis de grado titulada:

**IMPACTO DE LA VEGETACIÓN Y CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE CAÑONES URBANOS,
SOBRE EL CONFORT TÉRMICO.**

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.

DIRECTOR DE TESIS

DRA. KAREN ESTRELLA MARTÍNEZ TORRES


FIRMA

DEDICATORIA

A mis padres,

*Quienes me ha enseñado que la educación y la perseverancia es pieza clave
para el éxito, y que con amor todo es posible.*

A mi esposo

Quien día con día, me contagia del amor al conocimiento

A mi hermano

Quien siempre apoya mis decisiones

Y a Sam, Petite y Kiara ♡

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**, por la beca otorgada para que esta investigación fuera posible.

A la **Dra. Karen Estrella Martínez Torres**, por transmitir su conocimiento, por siempre contar con la mejor disposición de apoyar y ser un valioso ser humano.

A mi comité tutorial por sus observaciones y aportaciones para el desarrollo de este proyecto: **Mtro. Peter Chung Alonso, Mtro. Jesús Abelardo Licón Portillo, Dr. Francisco Fernández Melchor y Dr. Marcos Eduardo González Trevizo**

A mi **Mamá** por su apoyo incondicional en cada proyecto emprendido, y por encontrar siempre la palabra precisa, que me impulsa a seguir adelante. Gracias por ser ejemplo de fortaleza, y sobre todo gracias por siempre tener oídos para mí.

A mi **Papá**, quien me demuestra que el trabajo constante, trae consigo grandes recompensas. Gracias por ser un ejemplo de superación, te admiro mucho.

A mi **Esposo**, por acompañarme en esta aventura llamada vida, y apoyarme a lo largo de esta experiencia. Por su comprensión, y paciencia en los momentos de ausencia. Gracias por tu cariño y amor incondicional.

A mi **hermano** por escucharme, y aconsejarme, valoro cada una de tus palabras.

A **Dios** por llenar mi vida de amor, esperanza y fortaleza.

RESUMEN

En los últimos años, los entornos urbanos han presentado un aumento en la temperatura del aire relacionado al crecimiento poblacional, configuración urbana y urbanización de las ciudades, lo que se vincula directamente con los efectos de la Isla de Calor Urbana. Estas temperaturas se intensifican debido al incremento de edificación y a la reducción de la cobertura de vegetación. Por lo que los cañones urbanos son considerados pequeñas unidades del microclima urbano, en donde interactúan múltiples variables relacionadas al confort térmico. El propósito de este estudio es analizar diversas propuestas de configuración espacial en un cañón urbano, para identificar el modelo que mejores condiciones de confort térmico presente, por lo que las propuestas se centran en el aumento de relación aspecto e incremento del porcentaje de vegetación. Los escenarios propuestos se simularon en el programa ENVI-met, considerando los datos meteorológicos y el factor de cielo visible, los cuales posteriormente sirvieron como información de entrada para realizar las simulaciones y comparar los resultados obtenidos, con la finalidad de realizar un análisis de los principales parámetros que influyen en la temperatura fisiológica equivalente (PET). Se demostró que el escenario donde se aumentó la relación aspecto presentó una temperatura media de 36.03 °C PET, mientras que el escenario donde se incrementó la relación aspecto y la vegetación, presentó una temperatura media de 35.44 °C PET, por lo que este escenario tiene potencial para mejorar las condiciones de confort en un cañón con orientación noroeste - sureste, ya que mejora las condiciones de confort 0.6 °C. Sin embargo, es recomendable realizar modificaciones en cuanto la propuesta de vegetación, en búsqueda de optimizar los resultados. Este estudio tiene la finalidad de contribuir a la planeación urbana local, para establecer estrategias de planeación que ayuden a la mitigación de las Islas de Calor Urbana.

Palabras clave: *Vegetación, cañón urbano, relación aspecto, Factor de Cielo Visible.*

ABSTRACT

Recently an increase in the temperature of urban environments has been detected, linked to population growth, urban configuration, and cities urbanization, which is directly related to the effects of Urban Heat Island. These temperatures are intensified due to the increase in buildings and the reduction of the vegetation cover. Therefore, urban canyons are considered small units of the urban microclimate, where multiple thermal comfort variables interact. The current study analyzes different proposals of spatial configuration in an urban canyon, to identify the model with the best thermal comfort, so the proposals focus on increasing the aspect ratio and vegetation percentage. Proposed scenarios were simulated in the ENVI-met software, considering meteorological data and the visible sky factor, which later served as input information to perform the simulations and compare the results. Results were used to analyze the main parameters influencing the physiological equivalent temperature (PET). This showed that the scenario where the aspect ratio was increased presented an average temperature of 36.03 °C PET, in comparison, the scenario where the aspect ratio and vegetation were increased presented an average temperature of 35.44 °C PET, so this scenario can improve comfort conditions in a canyon with a northwest-southeast orientation since it improves comfort conditions 0.6 °C. However, for future research it is advisable to make modifications to the vegetation proposal to optimize the results. This study aims to contribute to local urban planning and establish planning strategies that help mitigate Urban Heat Island.

Keywords: Vegetation, Urban Canyon, Aspect Ratio, Sky View Factor.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE ECUACIONES	VII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1. Justificación	4
1.2. Antecedentes.....	5
1.3. Pregunta de investigación e hipótesis.....	10
1.4. Objetivos de investigación	10
1.4.1. Objetivo general.....	10
1.4.2. Objetivos específicos.....	11
1.5. Alcances y Limitaciones.....	11
CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO	12
2.1. Confort térmico exterior	13
2.1.1. Índices térmicos.....	13
2.1.1.1. Temperatura Fisiológica Equivalente	15
2.2. Parámetros meteorológicos	18
2.2.1. Temperatura radiante media.....	18
2.2.2. Temperatura del aire	19
2.2.3. Velocidad del viento.....	20
2.2.4. Humedad relativa.....	20
2.3. Isla de Calor Urbana	20
2.3.1. Causas de la presencia de Isla de Calor Urbana	21
2.3.2. Efectos generados por la Isla de Calor Urbana	24
2.4. Zonas Climáticas Locales	26
2.5. Configuración del cañón urbano	27
2.5.1. Relación aspecto	29
2.5.2. Orientación de los cañones urbanos	31
2.5.3. Factor de Cielo Visible.....	32
2.5.3.1. Herramientas para evaluar el Factor de Cielo Visible.....	34
2.6. Vegetación como estrategia de mitigación de las ICU.....	36
2.6.1. Tipo de vegetación	36
2.6.2. Efecto de enfriamiento la vegetación.....	37

2.6.3.	Evapotranspiración	38
2.6.4.	Índice del Área Foliar	38
2.6.5.	Densidad del área Foliar	39
2.7.	Modelo Energético de edificios urbanos (UBEM)	39
2.7.1.	ENVI-met	41
2.7.1.1.	Simulación de escenarios	42
2.8.	Marco Normativo	43
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA		47
3.1.	Diseño de la investigación.	48
3.2.	Diseño del experimento	48
3.2.1.	Área de estudio	49
3.2.2.	Procedimiento experimental	51
3.2.2.1.	Criterios de selección del área de estudio	52
3.2.2.2.	Tipología de cañones urbanos	56
3.2.2.3.	Volumetría y características de los cañones urbanos	58
3.2.2.4.	Periodo y tiempo de monitoreo	61
3.2.2.5.	Herramientas para monitoreo	62
3.2.2.6.	Precisión de los instrumentos	62
3.2.2.7.	Monitoreo y recolección de datos	63
3.2.2.8.	Precisiones metodológicas	65
3.2.2.9.	Cálculo del Factor de Cielo Visible con Rayman	66
3.2.2.10.	ENVI-met	68
3.2.2.11.	Diseño de escenarios	72
3.2.2.12.	Validación de datos y RMSE.	73
3.2.2.13.	Plan de evaluación de resultados	74
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		75
4.1.	Validación del modelo	76
4.2.	Estadística descriptiva	77
4.3.	Temperatura Fisiológica Equivalente	80
4.3.1.	Temperatura Fisiológica Equivalente en cañones poco profundos..	80
4.3.2.	Temperatura Fisiológica Equivalente en escenarios sin vegetación	82
4.3.3.	Temperatura Fisiológica Equivalente en cañones poco profundos con aumento de vegetación	84
4.3.4.	Temperatura Fisiológica Equivalente en cañones uniformes	86

4.3.5. Temperatura Fisiológica Equivalente en cañones uniformes con aumento de vegetación.....	89
4.3.6. Temperatura Fisiológica Equivalente en cañones profundos	91
4.4. Variables de los escenarios	94
4.4.1. Temperatura del aire	95
4.4.2. Temperatura Radiante media	103
4.4.3. Humedad Relativa	112
4.4.4. Velocidad del viento.....	116
4.4.5. Factor del Cielo Visible	119
4.5. Discusión	120
4.5.1. Influencia de las características de la geometría urbana y la vegetación.....	120
4.5.2. Confort térmico (PET).....	121
4.5.3. Temperatura radiante media.....	122
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	124
5.1. Efecto de la relación aspecto sobre la Tmrt y el SVF	125
5.2. Relación entre el aumento de vegetación y las variables ambientales.	126
5.3. Configuración espacial óptima para reducir niveles de PET	127
5.4. Recomendaciones	128
5.5. Futuras investigaciones	129
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130
APÉNDICES	141
Apéndice A. Tabla de comparación de datos monitoreados y simulados... ..	142
Apéndice B. Mapas de distribución de humedad.....	143
Apéndice C. Mapas de distribución de velocidad del viento	149
ANEXOS	155
Anexo A. Informe de originalidad	156

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Principales índices térmicos.....	14
Figura 2 Frecuencia del uso de índices térmicos.	15
Figura 3 Clases y subclases de las Zonas Climáticas Locales.	27
Figura 4 Clasificación de cañones urbanos.....	29
Figura 5 Relación aspecto de distintos cañones urbanos.	30
Figura 6 Orientación de los cañones urbanos.	31
Figura 7 Relación del factor de cielo visible, y relación aspecto.....	33
Figura 8 Herramientas para evaluar el Factor de Cielo Visible.	35
Figura 9 Esquema de los enfoques UBEM.....	40
Figura 10 Ruta del proceso en ENVI-met.....	42
Figura 11 Escalas del juicio, referente a la ISO 10551.....	46
Figura 12 Diseño de la investigación.....	48
Figura 13 Diagrama de la metodología.	49
Figura 14 Ubicación del sitio de estudio.....	50
Figura 15 Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen.	50
Figura 16 Sistema de agrupación bioclimática local.....	51
Figura 17 Criterios para la selección de cañones urbanos.....	52
Figura 18 Puntos de monitoreo.	53
Figura 19 Clasificación de la mancha urbana, de la ciudad de La Paz.	54
Figura 20 Traza urbana del centro poblacional de La Paz y colonias seleccionadas.	56
Figura 21 Ubicación de las LCZ.	57
Figura 22 Ubicación de cañones urbanos seleccionados.	59

Figura 23	Volumetría del primer cañón urbano seleccionado.	59
Figura 24	Volumetría del segundo cañón urbano seleccionado.	60
Figura 25	Colocación de los instrumentos de monitoreo en el sitio de estudio. ..	65
Figura 26	Colocación de equipo para captura de imágenes.	66
Figura 27	Datos de entrada de Rayman.	67
Figura 28	Procesamiento de imágenes en Rayman.	67
Figura 29	Ventanilla de resultados.	68
Figura 30	Modelos de cañón urbano.	69
Figura 31	Mapa de PET a las 12h, del día 07 de agosto de 2021.	72
Figura 32	Comparación de la Temperatura del aire.	76
Figura 33	Correlación entre datos monitoreados y datos simulados.	76
Figura 34	Boxplot temperatura del aire	78
Figura 35	Boxplot de Tmrt.	79
Figura 36	Boxplot de PET	80
Figura 37	PET en escenario base	81
Figura 38	Mapas comparativos de PET en escenario base.	82
Figura 39	PET en escenario 1.	83
Figura 40	Mapas comparativos de PET en E1	84
Figura 41	PET en escenario 2.	85
Figura 42	Mapas comparativos de PET en escenario E2.	86
Figura 43	PET en escenario 3.	87
Figura 44	Mapas comparativos de PET en escenario 3.	88
Figura 45	PET en escenario 4.	89
Figura 46	Mapas comparativos de PET en escenario 4.	91

Figura 47	PET en Escenario 5	92
Figura 48	Mapas comparativos de PET en escenario 5.....	93
Figura 49	Ubicación de receptores.....	94
Figura 50	Temperatura del aire en EB.	95
Figura 51	Mapas comparativos de la temperatura del aire en escenario EB.	96
Figura 52	Temperatura del aire en E1.....	97
Figura 53	Mapas comparativos de la temperatura del aire en escenario E1.....	97
Figura 54	Temperatura del aire en E2.....	98
Figura 55	Mapas comparativos de la temperatura del aire en escenario E2.....	99
Figura 56	Temperatura del aire en E3.....	99
Figura 57	Mapas comparativos de la temperatura del aire en escenario E3.....	100
Figura 58	Temperatura del aire en E4.....	101
Figura 59	Mapa comparativo de la temperatura del aire en escenario E4.	102
Figura 60	Temperatura del aire en E5.....	102
Figura 61	Mapa comparativo de la temperatura del aire en escenario E5.	103
Figura 62	Tmrt de escenario base.....	104
Figura 63	Mapas comparativos de la Tmrt en escenario EB.....	105
Figura 64	Tmrt de E1.	105
Figura 65	Mapas comparativos de la Tmrt en escenario E1.	106
Figura 66	Tmrt de E2.	107
Figura 67	Mapas comparativos de la Tmrt en escenario E2.	108
Figura 68	Tmrt de E3.	108
Figura 69	Mapas comparativos de la Tmrt en escenario E3.	109
Figura 70	Tmrt de E4.	110

Figura 71	Mapas comparativos de la Tmrt en escenario E4.	111
Figura 72	Tmrt de E5	111
Figura 73	Mapas comparativos de la Tmrt en escenario E5.	112
Figura 74	Humedad relativa en el escenario base.	113
Figura 75	Humedad relativa en el E1.	113
Figura 76	Humedad relativa en el E2.	114
Figura 77	Humedad relativa en el E3.	114
Figura 78	Humedad relativa en el E4.	115
Figura 79	Humedad relativa en el E5.	115
Figura 80	Velocidad del viento en el EB.....	116
Figura 81	Velocidad del viento en el E1.	116
Figura 82	Velocidad del viento en el E2.	117
Figura 83	Velocidad del viento en el E3.	117
Figura 84	Velocidad del viento en el E4	118
Figura 85	Velocidad del viento en el E5.	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Recomendaciones de los autores.....	7
Tabla 2	Rangos de confort, evaluados con PET.....	16
Tabla 3	Hallazgos de la temperatura fisiológica equivalente.	17
Tabla 4	Principales hallazgos de la temperatura radiante media.....	19
Tabla 5	Hallazgos obtenidos, en relación con las altas temperaturas.	23
Tabla 6	Rangos de temperatura fisiológica equivalente y estrés fisiológico.	26
Tabla 7	Relación de estudio enfocado a la relación aspecto y vegetación.....	30
Tabla 8	Descripción del factor de cielo visible por diversos autores.....	34
Tabla 9	Clasificación de las características físicas de los árboles.....	39
Tabla 10	Variables climáticas e instrumentos de medición, según la ISO-7726..	45
Tabla 11	Principales LCZ en la ciudad de La Paz.	54
Tabla 12	Tipologías y subtipologías de los cañones urbanos.....	56
Tabla 13	Ubicación de los puntos de monitoreo.	58
Tabla 14	Caracterización de las zonas de estudio.	60
Tabla 15	Vegetación predominante en áreas de estudio.....	61
Tabla 16	Herramientas y dispositivos para realizar mediciones.	62
Tabla 17	Precisión de los dispositivos.	63
Tabla 18	Temperaturas de la ciudad de La Paz	63
Tabla 19.	Ubicación de dispositivos en la primera campaña de monitoreo.	64
Tabla 20	Ubicación de dispositivos en la segunda campaña de monitoreo.....	65
Tabla 21	Datos de entrada del módulo Spaces (ENVI-met).	69
Tabla 22	Características de la selección de vegetación.	70
Tabla 23	Parámetros de entrada ENVI-guide.	70

Tabla 24	Parámetros para el uso de biomet.	71
Tabla 25	Propuestas para el diseño de escenarios.	72
Tabla 26	Concentrado de resultados de temperatura del aire.	77
Tabla 27	Concentrado de resultados de Tmrt.	78
Tabla 28	Concentrado de resultados de PET.	79
Tabla 29	Valores del factor de cielo visible.	119

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	Equilibrio energético	15
Ecuación 2	Raíz del error cuadrático medio.	73
Ecuación 3	Error absoluto medio.	73

LISTADO DE ABREVIATURAS

CONCEPTO	ABREVIATURA
Isla de calor urbana	ICU
Gases de efecto invernadero	GEI
Factor de cielo visible	SVF
Temperatura fisiológica equivalente	PET
Índice del área foliar	LAI
Área de densidad de la hoja	LAD
Error cuadrático medio	RMSE
Error absoluto medio	MAE
Aire acondicionado	A/C
Modelo de balance de calor termo fisiológico	MEMI
Voto Medio Previsto	PMV
Índice universal de confort térmico	UTCI
Clasificación climática semi árido frío	Bsk
Clasificación climática árido cálido	Bwh
Temperatura radiante media	Tmrt
Temperatura mínima	T min
Temperatura máxima	T max
Temperatura media	Tm
Metros sobre segundo	m/s
Humedad Relativa	HR
Grados centígrados	°C
Clasificación climática subtropical húmedo	Cfa
Clasificación climática Oceanico	Cfb
Zona climática local	LCZ
Relación aspecto	H/W
Altura de los edificios	H
Ancho de la calle	W
Modelo Energético de Edificios Urbanos	UBEM
Escenario base	EB
Escenario 1	E1
Escenario 2	E2
Escenario 3	E3
Escenario 4	E4
Escenario 5	E5
Receptor 1	R1
Receptor 2	R2
Receptor 3	R3

INTRODUCCIÓN

La Isla de Calor Urbana (ICU) es una consecuencia evidente del cambio climático, generado por la reducción de la vegetación, la prevalencia de superficies con alta capacidad térmica y el crecimiento de la población que se presenta en las ciudades (Abdulateef & Al-alwan, 2022; Aflaki et al., 2017; Jamei et al., 2020), y ha generado grandes consecuencias para la salud pública, aumentando los casos de morbilidad generados por las altas temperaturas que se presentan (Heaviside et al., 2017; Patz et al., 2005). Además, también acarrea problemas económicos debido a que el incremento de la temperatura del aire, genera una alta demanda de consumo eléctrico para el enfriamiento de los espacios, y una reducción del confort térmico (Aboelata & Sodoudi, 2020). Por lo tanto es importante recurrir a estrategias de mitigación que ayuden a aminorar las altas temperaturas que se presentan en las ciudades, como el uso de vegetación, la cual acarrea consigo beneficios ambientales ya que, a través de la evapotranspiración y la proyección de sombras, se puede lograr un efecto refrescante, mejorando las condiciones de confort (Aram et al., 2019; Davtalab et al., 2020; Klemm et al., 2015).

El propósito del estudio es comparar el potencial de reducción de calor urbano, a través del uso de la vegetación para mejorar las condiciones de confort térmico. Lo anterior permitirá tener datos de valor para la planeación de mitigación de Islas de Calor Urbanas (ICU) en clima cálido seco. Además, permitirá a Instituciones de Planeación Urbana del Gobierno del Estado y Gobierno Municipal establecer bases sólidas de planeación para beneficio de la población en general.

El presente documento se divide en cinco capítulos: I. Planteamiento del problema; II. Marco Teórico; III. Metodología; IV. Resultados y discusión, V. Conclusiones y recomendaciones, además de las referencias y una sección de apéndices. En el documento se exponen las teorías y avances en el estudio de los cañones urbanos, además se aborda el tema de las simulaciones con el programa ENVI-met, como herramienta para evaluar diferentes escenarios, lo anterior con la finalidad de exponer la relevancia del uso de la vegetación como estrategia para mitigar la ICU en cañones urbanos.

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente capítulo incluye una semblanza del planteamiento del problema, los antecedentes y casos análogos que se han manifestado en diversas ciudades del mundo, así como la justificación de la investigación, pregunta, objetivos de investigación, alcances y limitaciones.

El confort térmico es un aspecto necesario para que la población obtenga una vida saludable y eficiente, se puede considerar como una respuesta subjetiva en el que una persona expresa satisfacción con el entorno térmico (Olesen & Brager, 2004). Sin embargo, debido a la creciente urbanización de las ciudades, el confort térmico se ha visto afectado, ya que se han presentado casos de estrés por calor y golpes de calor generado por el sobrecalentamiento en las ciudades, las cuales se caracterizan principalmente por el desarrollo de altas temperaturas provocadas por la reducción de vegetación y evapotranspiración, así como la prevalencia de superficies de bajo albedo, y la influencia de la morfología urbana que afecta a la sombra y a la temperatura del aire (Golasi et al., 2018). Esta morfología urbana genera los cañones urbanos que se encuentran en las ciudades, los cuales son caminos rodeados por las fachadas de los edificios, y que además se ven afectados por los múltiples reflejos de radiación que atrapa la calle, generando un sobrecalentamiento a nivel de microescala (Mohajerani et al., 2017).

En el periodo comprendido de 2015 al 2019, las olas de calor fueron el riesgo meteorológico más letal, afectando a todos los continentes y ocasionando récords en las temperaturas de varias ciudades, generando una alza en los casos de mortalidad y morbilidad, provocados por altas temperaturas (ONU, 2020). Las ciudades más afectadas por el incremento de temperatura son las ciudades con climas cálidos, y un ejemplo de esto es la ciudad de La Paz, Baja California Sur, una ciudad con tendencia de crecimiento poblacional, localizada al Noroeste de México, y que en 2019 alcanzó un récord histórico de temperaturas, al llegar a los 49°C (bcsnoticias, 2019).

Además, el incremento poblacional acelerado, el crecimiento de zonas deforestadas y la escasa planificación para el crecimiento y ordenamiento urbano que existen en el sitio, han ocasionado un cambio en el ambiente de la región (INECC, n.d.). Lo que ha generado preocupación a nivel Municipal y Estatal, así como múltiples cuestionamientos sobre el devenir de la ciudad, por lo que se ha realizado el Plan de Acción contra el Cambio Climático, para Baja California Sur (PEAC) (Gámez et al., 2012), y el Plan de Desarrollo Urbano 2018-2021 para el municipio de La Paz, el cual aborda estrategias sustentables (H. Ayuntamiento, 2018).

Por otra parte, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) pronostica que para el año 2030, este fenómeno pueda incrementarse, lo cual se convertiría en un desafío para la vida urbana; generando una mayor frecuencia e intensidad de temperaturas extremas en verano, que ocasionará un incremento de mortalidad relacionada con el sobrecalentamiento, y un incremento en la demanda de refrigeración de espacios (Morakinyo et al., 2019).

El no tomar las acciones necesarias para la mitigación de ICU, se verá reflejado en el microclima urbano. Al respecto, Aflaki et al. (2017) argumentan que la ICU puede generar repercusiones en la salud de la población debido al estrés térmico, lo que se reflejaría en casos de morbilidad como golpes de calor, e incluso se podrían presenciar casos de mortalidad. En cuanto al tema económico, las repercusiones se observan directamente en la economía de la población, debido que al presentarse altas temperaturas se incrementa la demanda energética por el uso de aire acondicionado (A/C) en oficinas, comercios y viviendas (Jamei et al., 2020; Li et al., 2019).

1.1. Justificación

El crecimiento de las ciudades y el sobrecalentamiento urbano, son problemáticas permanentes que seguirán en aumento para el futuro, manifestando afectaciones a la salud (Patz et al., 2005). La presente investigación acerca de la configuración espacial y de vegetación surge a partir de la creciente preocupación a las posibles afectaciones que las ICU tiene sobre la salud y las repercusiones económica y sociales que trae consigo el sobrecalentamiento urbano.

Por lo que se pretende identificar a través de diversos escenarios, la configuración que optimice los rangos de confort en el cañón urbano, de la ciudad de La Paz, a través del uso de la vegetación urbana como estrategia pasiva de enfriamiento, ya que la presencia de árboles, como infraestructura urbana permite absorber contaminantes, contribuir a la infiltración de agua y enfriar la temperatura del aire a través de la transpiración y el sombreado (Stepani & Emmanuel, 2022). Por lo que se puede considerar que las estrategias viables para mitigar las altas temperaturas que se presentan hoy en día, son las estrategias basadas en la naturaleza, a través del uso de vegetación, que trae consigo la mejora del confort térmico, y conlleva al

aumento de la calidad de vida, la cual depende del entorno urbano así como de la naturaleza que habita en ella (Yilmaz et al., 2021). No obstante, Shashua-Bar et al. (2009) menciona que la vegetación urbana toma un papel relevante para disminuir las consecuencias de ICU, generando un efecto de enfriamiento pasivo, y progreso del confort térmico.

Sin embargo, en búsqueda de obtener los mejores resultados los escenarios propuestos, no solo consideran el uso de la vegetación urbana como estrategia única para la mejora del confort, si no que los modelos propuestos emplean la modificación de relación aspecto, la cual es una característica principal de la geometría del cañón urbano, y será un factor elemental para determinar la relación que existe entre la geometría del cañón y la vegetación, por lo que a través de las simulaciones se pretende identificar los factores que influyen sobre los niveles de estrés térmico que se presentan en cañones urbanos como efecto de la ICU. Lo que ayudará a fomentar soluciones de planeación urbana bajo un fundamento teórico, que permitan hacer frente a la problemática principal del sobrecalentamiento urbano y estrés térmico que se presenta en la ciudad.

1.2. Antecedentes

En el estudio del microclima de las ciudades, se considera que la configuración de las superficies urbanas y los materiales empleados en la construcción, contribuyen al cambio climático, actualmente más de la mitad de la población mundial vive en entornos urbanos, y su demanda energética ocasiona, más del 70% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI), que repercuten en el incremento del calentamiento de la tierra (Vollmann, 2019).

A pesar de esto el incremento de temperaturas en los entornos urbanos no es un tema reciente, ya que ha tomado relevancia desde principio del siglo XIX en los campos de climatología y meteorología, debido a que Howard (1833) observó una tendencia del incremento de temperatura en la ciudad de Londres, en comparación con tres sitios distintos de un entorno campirano, después de 20 años de observación de este fenómeno, dedujo que el incremento de temperatura era proporcional a la densidad y desarrollo urbanos (Iain, 2019). De igual forma años más tarde en la ciudad

de México se realizó un ejercicio similar llevado a cabo por Moreno (1899), en donde comparó las temperaturas medidas en el palacio nacional con las temperaturas de un observatorio rural de las colinas circundantes, su principal hallazgo fue que en la ciudad se presentaba temperaturas más cálidas durante todo el año.

Estos hallazgos inspiraron al investigador Hann (1908), para formalizar el término alemán *Stadttemperatur* (temperatura de ciudad, por su traducción al español), para describir el calor en los centros urbanos. Sin embargo, el término que actualmente se usa para describir el fenómeno del incremento de temperatura, mejor conocido como ICU aparece por primera vez en una publicación del *Quartely Journal of Royal Meteorological society*, publicado por Manley (1958).

Tomando en cuenta lo anterior, surgen algunos sucesores en el estudio de ICU como Landsberg (1982) quien al comparar diversos estudios previos en diferentes latitudes identificó que existía una diferencia de temperatura máxima, entre 2 y 3 horas después de la puesta del sol, lo cual estaba vinculado al fenómeno de ICU. De la misma forma Oke (1981), también contribuyó al estudio de ICU, él se enfocó en determinar una metodología que incluyera tasas de enfriamiento urbana y rural, sin embargo, su principal hallazgo fue detectar que la geometría urbana toma un papel relevante en la intensidad de las ICU.

Actualmente se han incrementado los estudios sobre el confort térmico en distintas zonas climáticas, en búsqueda de estrategias que puedan contrarrestar los efectos generados por ICU, ya que proyecciones para los próximos años, indican que aumentará la población que habita en las ciudades, lo que ocasionará un sobrecalentamiento urbano o ICU, las cuales se caracterizan principalmente por el aumento de temperatura en el área urbana a diferencia de sus alrededores (Aflaki et al., 2017). Por consiguiente este fenómeno no solo tendrá repercusiones mortales en la población y el confort térmico, también impactará en la salud y generará un aumento en los casos de morbilidad (Zittis et al., 2016), tales como deshidratación, enfermedades cardíacas y enfermedades cerebrovasculares (Paravantis et al., 2017).

Por consiguiente Kumar & Sharma (2020), realizaron un estudio, que reveló que la mayor parte de los estudios realizados sobre confort térmico se han enfocado

en climas templados, seguido de estudios en climas tropicales y en tercer lugar en climas áridos. Además, encontraron que el 71% de las investigaciones realizadas a nivel mundial, se han enfocado a entender las condiciones de confort térmico, el 12% se centra en estrategias de mitigación del calor, y solo el 5% de las investigaciones se han enfocado en revisar la influencia de la vegetación sobre el confort térmico.

Como puede apreciarse en la Tabla 1, diversos autores han desarrollado investigaciones para abordar estrategias de mitigación a las ICU relacionadas al confort térmico, tomando en cuenta la morfología urbana y la presencia de vegetación, por lo que, basado en los hallazgos encontrados, los autores realizan recomendaciones para abordar el tema de la vegetación como estrategia de mitigación al efecto de ICU en futuras investigaciones.

Tabla 1
Recomendaciones de los autores.

Autor, Año	Ciudad	Clima	Futuras Investigaciones y Recomendaciones del autor
Kaluarachichi et al. (2020)	Sydney, Australia	Cfa	Realizar estudios para determinar los efectos acumulativos del material de la superficie y la evapotranspiración de los árboles sobre el enfriamiento de la superficie.
Taleghani, (2018)	N/A	N/A	Investigar estrategias de mitigación de calor urbano a nivel peatonal y encontrar una correlación entre las estrategias de mitigación de calor en distintos climas y latitudes.
Morakinyo et al. (2020)	Hong Kong, China	Cfa	Investigar y comparar el potencial de reducción de calor en distintas zonas climáticas, para desarrollar una base de datos de selección arbórea.
Colunga et al. (2015)	Querétaro, México	BSk	Considerar la composición fisiológica del árbol y tomar en cuenta el clima para la adaptación de las especies.
Bartesaghi Koc et al. (2018)	N/A	N/A	- Abordar el tema de vegetación mediante el desarrollo de protocolos estandarizados y sistemas de clasificación relacionados con el clima. - Incluir parámetros funcionales, estructurales y de configuración para el análisis térmico integral de la infraestructura verde. - Correlacionar el efecto de las tasas de riego y evaporación y transpiración en áreas urbanas con la reducción de temperatura del aire y de la superficie.
Kumar & Sharma (2020)	N/A	N/A	Adoptar el uso de vegetación como mejora a las condiciones de confort térmico, y para desarrollo de ciudades sostenibles.
Jamei & Rajagopalan (2019)	Melbourne, Australia	Cfb	Definir el tipo de árbol en la realización de estudios, ayudará a tener una comprensión completa del microclima, por lo que debe realizarse investigación de campo para investigar la gama de plantas y materiales de la superficie.

Considerando una exhaustiva revisión de literatura se identificaron diversos estudios en múltiples ciudades alrededor del mundo que fueron evaluados en diferentes contextos climáticos. A continuación, se presentan algunos:

En una investigación, llevada a cabo por Jamei et al. (2020), se desarrolló un estudio de diversas estrategias de diseño urbano que influyen sobre el clima, a manera de indagar en investigaciones sobre el confort térmico y su relación con la ICU, el estudio menciona que el uso de alto albedo en pavimentos pueden reducir significativamente la temperatura, también se identificó que el impacto de la relación aspecto y la orientación del cañón urbano influye en el confort térmico.

Mientras que un estudio realizado por Jamei & Rajagopalan (2019) en la ciudad de Melbourne, Australia, tuvo como objetivo crear una base de datos correspondientes a la morfología de la calle, como la relación de aspecto, orientación y el Factor de Cielo Visible (SVF, por sus siglas en inglés) con la finalidad de lograr modelos más precisos y evaluar las consecuencias de los parámetros climáticos y el confort térmico. Esto con la intención de elaborar políticas que reduzcan la vulnerabilidad al estrés térmico. Los hallazgos obtenidos en esta investigación reflejaron que las variaciones térmicas del sitio varían de acuerdo con la tipología de relación aspecto del cañón urbano, el SVF y la cobertura de la sombra de los árboles.

Asimismo, Karimi et al. (2020) efectuaron un estudio en la ciudad de Teherán, Irán cuyo objetivo consistió en investigar los indicadores y parámetros asociados con el confort térmico en un parque urbano. Los hallazgos de la investigación permitieron identificar que la combinación de pavimentos de bajo albedo y árboles de copas anchas y troncos altos, son los indicados para lograr mejores condiciones de confort. Además, los resultados mostraron que el uso del SVF para evaluar el confort térmico en relación con la ICU, como factor determinante de radiación y sombreado, no presentó una alta correlación con la Temperatura Fisiológica Equivalente (PET, por sus siglas en inglés). Sin embargo, la temperatura de la superficie, la cual es un indicador de la ICU, mostró la relación más significativa con el PET durante el día, y la correlación máxima encontrada con la velocidad del viento y el PET durante la noche.

De igual forma se realizó una investigación en la ciudad de Sídney, Australia por Kaluarachichi et al. (2020), cuyo objetivo fue validar que las características del dosel relacionados con la sombra de los árboles, puedan usarse para predecir el potencial de enfriamiento, en una variedad de materiales de la superficie urbana. Los hallazgos reflejaron que el material de la superficie tiene un papel relevante debido a que está relacionado a la absorción y reflexión de radiación, por lo que influye directamente en la temperatura superficial y por ende al enfriamiento que deriva de la sombra de la vegetación.

Otro estudio realizado en Manchester, Reino Unido, por Taleghani (2018), abordó el impacto de distintas estrategias de mitigación de calor sobre el confort térmico. En este estudio se analizó el uso de vegetación y superficies de alto albedo como soluciones para mejorar el confort térmico exterior. El estudio demostró que las superficies juegan un papel importante en el confort térmico, ya que la T_{mrt} (temperatura radiante media) influye sobre el confort térmico más que las otras variables meteorológicas. De este modo el estudio concluyó que la vegetación en espacios urbanos es una opción para mejorar el confort térmico en conjunto con el alto albedo, ya que se demostró un decremento en la temperatura del aire y T_{mrt} .

En forma similar, se efectuó una investigación realizada por Davtalab et al. (2020) en Sistán, Irán, donde se realizaron mediciones de campo en los días más calurosos de junio y julio 2016, y se analizaron los diferentes comportamientos térmicos de los espacios verdes a microescala. La investigación mostró que, en espacios con vegetación, la temperatura media (T_m) del aire fue menor en 1°C , la humedad relativa (HR) fue mayor en 2%, la T_{mrt} fue menor en 6°C y el PET fue menor en 7°C en comparación con los espacios analizados sin vegetación.

Otro estudio llevado a cabo por Morakinyo et al. (2020), en la ciudad de Hong Kong, China, se realizó para desarrollar, evaluar e implementar una metodología general que permitiera a los proyectistas, utilizar las especies de árboles correctos en el lugar indicado, como estrategia de mitigación de calor. A través de la relación de la morfología urbana caracterizada por el SVF y la vegetación. Los hallazgos establecieron que la relación entre el rendimiento de enfriamiento de los árboles y la

morfología urbana varía según la especie y ubicación del árbol, además se identificó que la reducción del calor se debe principalmente a la densidad del follaje del árbol.

Por último, un estudio realizado por Colunga et al. (2015), en la ciudad de Querétaro, tuvo como objetivo evaluar la vegetación como regulador de temperatura urbana y evaluar la cobertura vegetal en la adaptación del cambio climático. El estudio demostró que una cobertura vegetal del 50% puede mitigar la intensidad de la ICU hasta 2°C. Lo anterior permitió reflexionar sobre la reducción del sobrecalentamiento mediante el uso de vegetación para contrarrestar los riesgos a la salud como lo son el estrés térmico, la morbilidad y la mortalidad de la población.

Considerando los estudios anteriormente expuestos, se ha mencionado que la ICU es un fenómeno presente en diversas ciudades alrededor del mundo, sin embargo, la estrategia de mitigación de las ICU a través del uso de la vegetación urbana en conjunto con el incremento de la relación aspecto han logrado obtener resultados positivos para optimizar el confort térmico en distintos entornos urbanos.

1.3. Pregunta de investigación e hipótesis

¿Qué configuración espacial y de vegetación de un cañón urbano en la ciudad de La Paz, permite optimizar los rangos de confort térmico, en época de verano?

Los cañones urbanos con una orientación noroeste - sureste, que presentan una propuesta del incremento de sombreado por vegetación en el 50% del área del cañón urbano, y cuya Relación de Aspecto (H/W) es igual o < 1 , presentan condiciones óptimas de confort térmico en época de verano en la ciudad de La Paz, al mejorar los índices actuales de confort.

1.4. Objetivos de investigación

1.4.1. Objetivo general

Evaluar las configuraciones espaciales y de vegetación, a través de modelos energéticos, para optimizar los rangos de confort en cañones urbanos.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Definir las características de la geometría urbana y vegetación de los escenarios propuestos, para llevar a cabo la simulación de los modelos.
2. Calcular el índice térmico de PET, de los distintos modelos propuestos a través del uso del programa ENVI-met para examinar el comportamiento de PET a lo largo del día en el cañón urbano.
3. Analizar la influencia de las variables climáticas, y la geometría urbana sobre el confort térmico, a través del uso de estadística descriptiva determinar el impacto de estos parámetros sobre el confort.

1.5. Alcances y Limitaciones

El alcance de esta investigación se enfoca en evaluar distintos escenarios los cuales fueron modelados y simulados en ENVI-met, con la intención de determinar el mejor escenario, que ayude como estrategia a la mitigación del sobrecalentamiento en cañones urbanos. Sin embargo, se presentaron algunas limitaciones:

- El factor tiempo fue una limitante para realizar el monitoreo de los cañones urbanos, debido a que el estudio se llevó a cabo en la ciudad de La Paz, y se realizó un viaje a esa ciudad, para efectuar el monitoreo, además algunos de los días que estaban destinados al monitoreo no presentaron las condiciones meteorológicas idóneas para continuar con el proceso.
- La falta de equipo fue una limitación debido a que no se pudo llevar a cabo las dos campañas de monitoreo sincrónicamente, debido a lo cual se optó por realizar las campañas de monitoreo en días distintos, para utilizar el máximo de recursos disponible en cada una de las campañas.
- En cuanto al uso de la herramienta principal ENVI-met, se presentaron prolongaciones de tiempo durante el proceso de simulación, no esperadas. Debido a que licencia con la que se cuenta (licencia de estudiante) solo permite procesar la información con un núcleo del procesador, lo que prolonga los tiempos de ejecución.

CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO

El presente capítulo aborda el marco teórico el cual detalla conceptos clave en el desarrollo de investigación relacionados al confort térmico, como lo son los parámetros meteorológicos, la isla de calor, zonas climáticas locales, la configuración del cañón urbano, modelos energéticos y marco normativo.

2.1. Confort térmico exterior

El estudio del confort térmico surge en el siglo XIX como parte del interés del ser humano, en su vínculo con el ambiente y la calidad de vida (Limona et al., 2019). Sin embargo, a lo largo del siglo XX las investigaciones comenzaron con un intento de evaluar las condiciones térmicas, definir el confort y clasificar el estrés térmico (Potchter et al., 2018).

El confort térmico es definido como “esa condición mental que expresa la satisfacción con el entorno térmico y que se evalúa mediante una evaluación subjetiva” (ANSI/ASHRAE_55, 2017). Al ser evaluado de manera subjetiva, deben considerarse para esto varios elementos que influyen para determinarlo. Varios autores hacen mención de que existen distintos parámetros climáticos que se relacionan con el estudio del confort térmico, como lo son la temperatura del aire, HR, velocidad del viento y Tmrt (Acero et al., 2021; Ahmadi Venhari et al., 2019; Barakat et al., 2017). No obstante Yang et al. (2016) enfatizan que los parámetros que tienen mayor influencia sobre el confort térmico, son la Tmrt y la velocidad del viento.

Cabe destacar que el estudio del confort térmico en exteriores ha tomado relevancia en las últimas décadas, ya que las investigaciones se han centrado en relacionar el microclima urbano con el diseño urbano (Muniz-Gäal et al., 2020). Ahora bien, para poder evaluar el confort térmico es necesario tener indicadores que determinen los valores de confort térmico, por lo que se han desarrollado índices, de los cuales algunos evalúan las condiciones térmicas del entorno exterior, como el Voto Medio Pronosticado (PMV, por sus siglas en inglés) Temperatura Fisiológica Equivalente (PET, por sus siglas en inglés) y el Índice Universal de Confort Térmico (UTCI, por sus siglas en inglés).

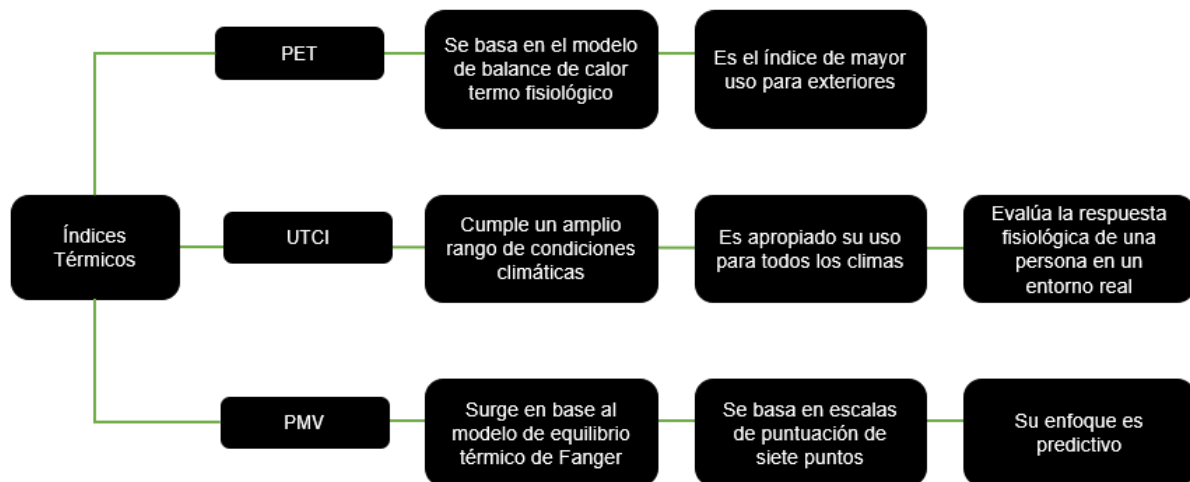
2.1.1. Índices térmicos

El cuerpo humano no tiene sensores para determinar la percepción de parámetros climáticos, sin embargo, solo puede registrar una respuesta termorreguladora a través de la temperatura, con el apoyo del sistema de termorregulación; estas temperaturas se ven influenciadas por los distintos parámetros

climáticos por lo que para estas complejas interacciones se pueden recurrir al uso de índices térmicos, los cuales sirven como herramienta para evaluar y determinar los niveles de confort térmico de las personas (Hoppe, 1999).

Por lo que se puede concluir que los indicadores térmicos cuantifican el entorno térmico exterior y el confort térmico de las personas, gracias a esto se realizan diversos estudios donde se establece una relación entre el índice y la sensación térmica (Chen, 2020). Como se muestra en la Figura 1, los indicadores térmicos se basan en distintos modelos, sin embargo, todos permiten cuantificar el confort térmico.

Figura 1
Principales índices térmicos.



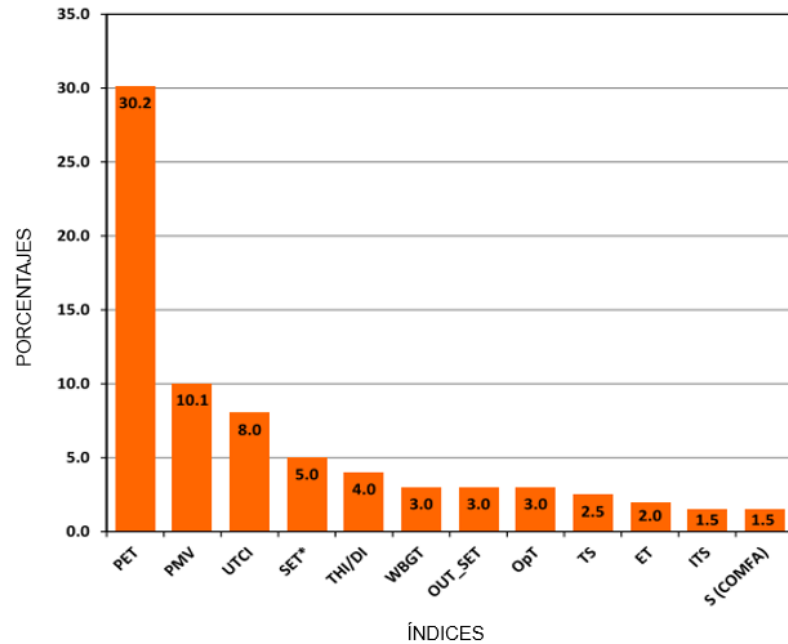
Nota: Elaborado a partir de información de: The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment., por Hoppe, (1999, p. 75-79), Urban design in favor of human thermal comfort for hot arid climate using advanced simulation methods, por Barakat et al. (2017, p.533 -543) y Studies of outdoor thermal comfort in northern China, por Lai et al. (2014, p. 110-118).

De acuerdo con Potchter et al. (2018), algunos de los indicadores de mayor uso son los que se presentan en la Figura 2:

- 1) Temperatura Fisiológica Equivalente (PET)
- 2) Voto Medio Previsto (PMV)
- 3) Índice Universal de Confort Térmico (UTCI)
- 4) Temperatura Efectiva Estándar (SET)

Figura 2

Frecuencia del uso de índices térmicos.



Nota: Obtenido de "Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification" por Potchter et al. (2018), Science of the Total Environment, 631-632 (páginas 390-406).

2.1.1.1. Temperatura Fisiológica Equivalente

El índice de confort PET se basa en el modelo de balance de calor termo fisiológico, conocido como MEMI (*Munich Energy balance Model for Individuals*, por sus significado en inglés) (Lai et al., 2014). Este modelo de equilibrio térmico se basa en la ecuación del equilibrio energético del cuerpo humano (ver Ecuación 1).

Ecuación 1

Equilibrio energético

$$0 = M + W + R + C + E_D + E_{RE} + E_{SW} + S$$

En donde:

M= tasa metabólica

W= trabajo físico realizado

R= radiación del cuerpo

C= flujo de calor convectivo

E_D = flujo de vapor de la piel

E_{RE} = suma de flujos de calor para calentar el aire inspirado

E_{SW} = flujo de evaporación del sudor

S= almacenamiento de flujo de calor para calentar o enfriar la masa corporal

Sin embargo, esta ecuación puede verse afectada por los parámetros climáticos de la temperatura del aire (influye en C y E_{RE}), la humedad (influyen en E_D , E_{RE} y E_{SW}), la velocidad del viento (influye en E_{SW} y C) y la T_{mrt} (se relaciona con R). Considerando esto Hoppe, (1999) define PET como un “indicador de que la temperatura del aire de un entorno típico, mantiene el equilibrio térmico del cuerpo humano (considerando un metabolismo de trabajo 80 W equivalente a una actividad ligera, más la suma del metabolismo básico y la resistencia térmica de la ropa 0,9 clo) con temperaturas centrales y cutáneas iguales a las de las condiciones que se evalúan”.

Además, Chen & Ng (2013) refieren que el PET es un índice que puede ser utilizado para realizar estudios sobre el confort térmico de espacios exteriores, debido a que traduce una evaluación del entorno climático exterior a un escenario interior, sobre una base fisiológicamente equivalente, lo que le permite una fácil interpretación. Autores como Kumar & Sharma (2020) y Potchter et al. (2018) coinciden que este indicador térmico es uno de los más utilizados para evaluar el confort térmico en exteriores. Además, Abaas (2020) hace mención de que la zona de confort varía de acuerdo al tipo de clima donde se encuentren las personas, por lo que el rango de la neutralidad de PET para climas fríos y el rango de neutralidad para climas cálidos es distinto, en consecuencia las reacciones al estrés térmico pueden variar de acuerdo a las condiciones climáticas y culturales. En la Tabla 2, se reflejan los rangos de PET entre zonas frías y zonas cálidas, en donde existen variaciones de la sensación del índice PET significantes entre cada zona.

Tabla 2
Rangos de confort, evaluados con PET.

Sensación	PET (en zonas frías) (°C)	PET (en zonas calientes) (°C)
Muy Frio	<4	<14
Frio	4-8	14-18
Fresco	8 - 13	18-22
Ligeramente Fresco	13 -18	22-26
Neutral	18 -23	26-30
Ligeramente cálido	23 - 29	30-34
Cálido	29 - 35	34-38
Caliente	35 -41	38-42
Muy Caliente	>41	>42

Nota: Obtenido de “Impact of development on Baghdad's urban microclimate and human thermal comfort” por Abaas, (2020), Alexandria Engineering Journal, 59, (páginas 275-290).

Sin embargo, en la Tabla 3 se pueden apreciar algunos de los hallazgos encontrados sobre PET, en zonas urbanas que se caracterizan por ser parte de una clasificación climática BWh (árido cálido) y Bsk (semi árido frío).

Tabla 3
Hallazgos de la temperatura fisiológica equivalente.

Autor/ año / clima	Hallazgo
Aboelata & Soudoudi, (2020) / BWh	- El escenario que presentaba un aumento del 50% de árboles tuvo un efecto negativo, debido a que incrementó la temperatura del aire y disminuyó la HR. - Los escenarios con aumento de vegetación, específicamente el escenario con el aumento del 50% de vegetación presenta, una mejora en el rendimiento térmico y reducción de PET hasta 3K, en cañones amplios con baja densidad, debido a que, a mayor incremento de árboles, mayor sombra generada en el sitio lo cual mejora los efectos de PET.
Karimi et al. (2020) / BSk	- El escenario que contenía como vegetación pinus eldarica, los cuales se caracterizaban por tener un ancho de la corona de 5m y una altura del tronco de 6 m, el promedio de PET disminuyó 0.7 °C. - Los árboles con menor cobertura de copa ocasionan una disminución en la intensidad de sombreado y mayor reducción de PET. - Los árboles moderan las condiciones de confort por la mañana.
Davtalab et al. (2020) / BWh	- Los puntos de monitoreo que se caracterizaban por la presencia de vegetación el índice de PET fue inferior 7 °C en comparación que los puntos monitoreados que no contaban con vegetación. - El tipo de suelo es un factor importante sobre el control del confort térmico. - La temperatura del aire no es un factor principal que impacte directamente en los niveles de confort. - El aumento de la presencia de vegetación en el sitio de estudio ocasionó la obstrucción del viento, lo que influyó en los niveles de confort.
Abaas, (2020) / BWh	- La combinación de alta temperatura del aire, alta HR y baja velocidad del viento afectaron negativamente los niveles de PET. - La T mrt influye en la ICU debido a que tiene la capacidad de controlar la temperatura exterior e influir en la optimización de PET. - La combinación de las variables de vegetación y relación aspecto adecuada, así como los materiales con alto albedo tienen un impacto significativo en la Tmrt y el PET; lo que ayuda a lograr zonas de confort térmico.
Galal et al. (2020/ BWh	- Los valores de PET no varían mucho durante horas nocturnas - El promedio más bajo de PET es durante la noche en cañones urbanos con orientación noroeste - sureste
Ahmadi Venhari et al. (2019) / BWk	- La presencia de árboles logra la reducción de 4 °C en el PET - Agregar sombra en medio de las calles logra una mejora en el confort térmico

2.2. Parámetros meteorológicos

Los parámetros climáticos (temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad del viento y humedad relativa) pueden evaluarse cuantitativamente, mediante diversos instrumentos de medición o usando medios de predicción para posteriormente someter los valores a una evaluación con criterios regulatorios (Skilling & Munro, 2016).

2.2.1. Temperatura radiante media

La descripción de la temperatura radiante media (T_{mrt}) es considerada por Palme, (2021) y Lai et al. (2019) como la suma de las radiaciones más importantes (radiación de onda corta y radiación de onda larga en el ambiente), que depende de condiciones astronómicas (la altitud solar y el azimut), condiciones atmosféricas (temperatura de la superficie, la radiación global y la cobertura de nubes) y morfología urbana (emisividad y albedo). Asimismo Lindberg & Grimmond (2011) describen la T_{mrt} como la suma de los flujos de radiación de onda larga y onda corta a los que se expone el cuerpo humano. Mientras que por otro lado Farhadi et al. (2019.) describen la T_{mrt} , como la temperatura uniforme de un recinto negro imaginario en el que la transferencia de calor radiante del cuerpo humano es igual a la transferencia de calor radiante en el recinto real no uniforme”.

La T_{mrt} se ve afectada principalmente por factores como la morfología urbana y recubrimientos de la superficie (Aminipouri et al., 2019). Partiendo de lo anterior Srivanit & Jareemit (2020) exponen que la T_{mrt} es uno de los principales factores que intervienen en el índice de PET. Además, hacen hincapié que la T_{mrt} puede disminuir, con el aumento de la relación aspecto de un cañón urbano, lo que coincide con los hallazgos obtenidos por Deng & Wong (2020), ya que la T_{mrt} disminuye en medida que la relación aspecto del cañón urbano aumenta, mientras que Lindberg & Grimmond (2011) argumentan que la vegetación también es un factor relevante para la reducción de T_{mrt} en cañones urbanos, debido a que proyecta sombra en el suelo y fachadas de las edificaciones. Algunos de los principales hallazgos que se han encontrado en diversos estudios relacionados con la T_{mrt} en cañones urbanos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4
Principales hallazgos de la temperatura radiante media.

Autor/ año	Hallazgo
Nasrollahi et al. (2021)	- La proyección de sombra logra reducir la Tmrt y el índice PET, alcanzando valores de 34 °C y 17.6 °C respectivamente. - La Tmrt y PET se encuentran relacionados con el SVF. - En el cañón urbano con orientación noroeste - sureste, se presentaron valores de Tmrt mayores en la parte norte del cañón, en comparación con el resto de las orientaciones. - La Tmrt mínima se registró a las 22 h, mientras que la Tmrt máxima se registró alrededor de las 15 h.
Abdollahzadeh & Bioria (2021)	- La Tmrt afecta directamente a la percepción térmica y se relaciona a la orientación del cañón. - El incremento de relación aspecto reduce la Tmrt. - Cada aumento en la relación aspecto de 0.5, puede reducir la Tmrt hasta 3.3 °C. - Tanto la Tmrt y la temperatura del aire están relacionados a la relación aspecto.
Kwon & Lee (2019)	Al incrementar el 50% del volumen del árbol, se logra reducir hasta el 10% de la Tmrt, debido a que al incrementar el volumen del árbol se logra bloquear la radiación de onda larga.
Lai et al. (2017)	En condiciones donde el valor de SVF sea menor, se incrementa mayor flujo de onda larga, con o sin sombra. Por lo que el efecto que tiene la morfología urbana sobre la Tmrt va relacionado con el SVF.
Jamei & Rajagopalan (2019)	- Durante la noche la Tmrt aumenta en medida de la relación aspecto que presenta el cañón urbano, debido a que la tasa de enfriamiento es más lenta en cañones profundos porque la geometría del cañón controla las pérdidas de radiación e influye sobre el control del flujo del aire. - Durante la noche la Tmrt mínima se registró debajo del dosel del árbol, mientras que la Tmrt se presentó cercana a los perfiles de las edificaciones.

2.2.2. Temperatura del aire

Roy Choudhury et al. (2011) argumentan que la temperatura del aire se ve relacionada con la disminución de calor del cuerpo por convección y evaporación, y consideran que es el parámetro climático de mayor relevancia, en estudios de confort. Esta variable climática que en palabras de Skilling & Munro (2016) es considerada

como la temperatura que rodea a una persona, y que puede ser medida a través de una escala de grados centígrados (°C).

2.2.3. Velocidad del viento

La ISO-7726, (1998) refiere a la velocidad del viento como una cantidad definida por su magnitud y su dirección. Además, hace mención de que es difícil realizar mediciones precisas de la velocidad del viento en espacios abiertos debido a que el flujo del aire es turbulento, en otras palabras, se puede decir que la velocidad del aire varía aleatoriamente, y con frecuencia también cambia de dirección. Si bien para realizar las mediciones de la velocidad del viento es a través del uso de anemómetros, estos deben estar previamente calibrados según lo marca la norma.

Diversos estudios han concluido que la velocidad el viento disminuye en medida que aumenta la relación aspecto del cañón urbano, ya que la velocidad del viento en un cañón de poca profundidad es mayor que en uno de mayor profundidad (Deng & Wong, 2020; Jamei et al., 2020; Jareemit & Srivanit, 2019).

2.2.4. Humedad relativa

Skilling & Munro (2016) describe la humedad relativa (HR) como la cantidad de humedad que existe en el aire, y que se expresa mediante porcentajes de humedad relativa (%) la cual puede ser medida con ayuda de higrómetros, y gracias a esto estudios como el realizado por Morakinyo et al. (2020) han revelado que los valores de la HR son mayores por la mañana y van disminuyendo a medida que transcurre el día.

2.3. Isla de Calor Urbana

La ICU son un problema que afecta el funcionamiento y habitabilidad de las ciudades, las cuales se estudian desde el siglo XIX, y a partir de estas observaciones surge la descripción de este fenómeno, el cual se caracteriza por el incremento de temperaturas en la ciudad en comparación con áreas rurales circundantes (Santamouris, 2015).

El efecto que generan las ICU, surge por las modificaciones que sufren las ciudades, por la reducción de vegetación y el incremento de superficies oscuras y con bajo albedo (Stone et al., 2010). Oke et al. (1991) argumentan que los principales elementos que intervienen en la causa de este fenómeno van desde las características de los materiales, las condiciones climáticas, los factores meteorológicos, y las características morfológicas de la ciudad. Además Mohajerani et al. (2017) señalan que también es importante considerar en los estudios relacionados con las ICU, el calor antropogénico liberado, la configuración urbana, la expansión y la densificación de ciudades. Por consiguiente, el interés por estudiar las ICU se ha convertido en un estudio complejo debido a que este se ve relacionado con factores ambientales y de calidad de vida, que afectan directamente la salud de las personas. Además, su estudio aborda un gran número de variables que influyen en la intensidad con la que puede manifestarse.

2.3.1. Causas de la presencia de Isla de Calor Urbana

Varios autores han determinado distintas causas que se relacionan al origen de este fenómeno. Nuruzzaman, (2015) considera que las principales razones que dan origen a las ICU son: la urbanización de las ciudades, incluyendo los materiales de bajo albedo, el incremento y reunión de personas, el bloqueo del viento, el cual es generado por la densidad de edificios que pueden presentarse en las ciudades y que dificulta su circulación; así como la contaminación del aire proveniente de vehículos y el incremento del uso de A/C que se da debido a las altas temperaturas que se generan en verano.

a) Materiales

Los materiales que se utilizan para la urbanización forman parte del sobrecalentamiento que existe actualmente, ya que el incremento de los materiales en las edificaciones urbanas modernas se caracteriza por poseer una absorción térmica alta, que repercute en las condiciones superficiales y atmosféricas. Para Yang et al. (2015) la reflectancia de los materiales es un factor considerable para la mitigación de las ICU, debido a que los materiales con mayor reflectancia almacenan menos calor, lo que da paso a una disminución de la temperatura superficial. Para el caso de los

materiales como el asfalto y el concreto, que son los que predominan en la urbanización de las ciudades Wang et al. (2016) recomiendan hacer uso de materiales de alto albedo, debido a que estos, al exponerse a condiciones de radiación solar permanecen más fríos por el contrario, los materiales con bajo albedo como el concreto y asfalto manejan valores de 0.01 y 0.03 de admitancia, por los que se les considera materiales de bajo albedo. Ouali et al. (2018) coinciden con esta postura, ya que argumentan que los materiales con alto albedo reducen los efectos de las ICU, basado en que con el uso de materiales con alto albedo se logra reducir las temperaturas superficiales debido a la reducción de energía solar absorbida. Un estudio realizado por Nasir et al. (2021) compararon dos tipos de materiales como el asfalto y el granito obteniéndose que la temperatura del suelo donde se encontraba el asfalto era 4 veces superior en comparación con el otro material, confirmado las posturas que tienen (Ouali et al., 2018; Wang et al., 2016; Yang, 2015).

Por lo que se concluye que son los materiales de bajo albedo como el concreto y el asfalto los que propician las condiciones para dar origen a las ICU. De modo que para mitigar los efectos generados por las ICU, Duarte et al. (2015) recomiendan el uso de superficies con alto albedo, debido a que los materiales reflectantes alteran el balance de energía e influyen en los requisitos de enfriamiento de un edificio en particular.

b) Escasez de vegetación

La vegetación toma un papel relevante, en los entornos urbanos, ya que funge como regulador de temperatura, y mantiene la humedad en los espacios, por lo que su escasez tiene graves repercusiones sobre el confort. Chatterjee et al. (2019) refieren que la baja cobertura vegetal en los entornos urbanos tiene una influencia sobre el sobrecalentamiento urbano, debido a que las sombras que proyecta la vegetación hacen posible la disminución de temperaturas en la superficie de áreas urbanas, además la disminución de vegetación en las ciudades, genera un impacto que se refleja en las temperaturas, y repercute en el proceso de enfriamiento, ya que los árboles tienen la particularidad de absorber CO₂ (dióxido de carbono) el cual utilizan para realizar el proceso de fotosíntesis, y que a su vez les permite generar procesos

de enfriamiento hacia el ambiente (Nuruzzaman, 2015), por tal motivo Duarte et al. (2015) coinciden con la influencia que tiene la vegetación sobre el sobrecalentamiento urbano, por lo que exponen que la falta de vegetación en espacios urbanos tiende a generar un aumento de temperaturas durante el día; por ende, se considera que la vegetación es una de las estrategias esenciales para la mitigación de ICU.

c) Altas Temperaturas

Las altas temperaturas, implican la pérdida de confort térmico en espacios urbanos, e implican un incremento en la demanda energética. De modo que Farhadi et al. (2019) relacionan el incremento de temperaturas como la principal causa que genera el incremento de la demanda energética, debido al uso de A/C por parte de los usuarios, en búsqueda de confort, por lo que puede ser relacionado con lo expuesto por Aboelata, (2020) quien hace mención de que las ICU disminuyen el confort térmico y aumentan las temperaturas en el interior y exterior de los espacios.

En la Tabla 5, se muestran algunos estudios referentes a las altas temperaturas que se registran en distintas ciudades. En donde se coincide que en climas de clasificación Cfa (subtropical húmedo), Cfb (oceánico) BWh (desértico cálido) y Bsk (desértico frío) el aumento de H/W disminuye la temperatura del aire, y radiación solar.

Tabla 5
Hallazgos obtenidos, en relación con las altas temperaturas.

Autor / Año	Ciudad/ clima	Características	Hallazgos
Wang et al. (2021)	Guangzhou, China Cfa	La temperatura media anual oscila entre los 21°C y los 29°C, en el mes de julio.	El dosel de la vegetación evita la transferencia de calor y ralentiza la pérdida de calor durante la noche, lo que repercute en las superficies.
Sanagar Darbani et al. (2021)	Mashhad, Iran Bsk	Su temperatura media promedio es de 28.8 °C para el mes de julio, sin embargo, la temperatura del aire en verano, supera los 40 °C.	- La H/W de un cañón urbano, se relaciona con los niveles de confort térmico, por lo que en medida que se incrementa la H/W, el PET disminuye. - Los, cañones urbanos profundos suelen tener temperaturas del aire más bajas debido a que absorben menos radiación de onda corta y reflejan radiación de onda larga.
Continúa en la siguiente página			

Autor / Año	Ciudad/ clima	Características	Hallazgos
Aboelata, (2020)	Cairo, Egipto BWh	La ausencia de confort térmico ha generado que el consumo eléctrico promedio de una por el uso de aire acondicionado.	Todos los escenarios simulados con orientación noroeste - sureste presentaron un decremento de la temperatura del aire, durante la noche. Además, el escenario donde se contempló el uso del 70% de pasto disminuyó el consumo eléctrico en 1.89 kWh por día.
Deng & Wong, (2020)	Nanjing, China Cfa	El área de estudio se encuentra en una zona subtropical húmeda, con veranos calurosos, que registran temperaturas máximas promedio de 32 °C.	El aumento de relación aspecto produce menor acceso solar y mejores condiciones de sombreado en los cañones urbanos. Además, Tmrt extrema, disminuye en medida que aumenta la relación de aspecto.
Jamei & Rajagopalan (2019)	Melbourne, Australia Cfb	Actualmente la ciudad experimenta temperaturas que superan los 35°C. En 2009 se sufrió una ola de calor donde se alcanzaron los 40°C..	- En las simulaciones se detectó un decremento de la temperatura del aire, en relación con el aumento de la relación de aspecto. - Se encontró una relación entre el SVF y la temperatura del aire, en la medida en que disminuye el SVF se incrementa la temperatura del aire diurno.

2.3.2. Efectos generados por la Isla de Calor Urbana

Diferentes autores coinciden que las consecuencias generadas por las ICU, se encuentran relacionadas al bienestar y el confort de las personas (Alobaydi et al., 2016; Jamei & Rajagopalan, 2019; Mohajerani et al., 2017; Morakinyo et al., 2020). Sin embargo, múltiples son los efectos, que genera este fenómeno, el principal de ellos se centra en la demanda de energía eléctrica, generada por el incremento de temperaturas, que originan una demanda de refrigeración de espacios para propiciar las condiciones óptimas de confort (Yang, 2015).

Por consiguiente Mohajerani et al. (2017) demuestran que existen dos elementos clave en los efectos de las ICU, las cuales son las condiciones atmosféricas y geográficas del sitio, ya que debido a estos dos elementos los efectos ocasionados determinan la intensidad de las ICU.

No obstante, otros de los efectos de la ICU se ven reflejados en el incremento de la temperatura del aire, y la salud humana. Morakinyo et al. (2020) argumentan que las ICU afectan a tal grado que se pueden relacionar a casos de morbilidad y mortalidad. Asimismo Mohajerani et al. (2017) consideran que el estrés térmico también es una consecuencia de este fenómeno. De manera que, se puede deducir que las ICU son un fenómeno holístico que impacta y se relaciona con distintas disciplinas relacionadas al ambiente, la economía y la salud de las personas. Sin dejar de lado que también tiene influencias sobre el confort urbano (Wang et al., 2015).

a) Morbilidad

La presencia de sobrecalentamiento urbano en las ciudades trae como consecuencia diversos efectos sobre la salud, lo que traerá como consecuencia una población más vulnerable a casos de morbilidad relacionada con el calor. Mücke & Litvinovitch, (2020) hacen mención que, en 2003, la población de Alemania tuvo un aumento de la morbilidad, generado por la presencia de calor extremo en la ciudad que se manifestó a través de golpes calor, estrés térmico, insolación, e insuficiencia cardíaca. Además, argumenta que el aumento de morbilidad relacionada con las altas temperaturas provoca efectos sobre la capacidad y productividad de las personas.

b) Golpes de calor

Los golpes de calor son incrementos de temperatura corporal que supera los 40°C, alterando directamente el sistema nervioso central y desencadenando disfunciones metabólicas que pueden llevar incluso a la muerte (Piñeiro-Sande et al., 2004). Morakinyo & Lam (2016) argumentan que el resultado de la frecuencia e intensidad de las altas temperaturas causadas por calor urbano ocasionan que el estrés por calor sea prevalente, sobre todo en temporadas de verano, generando golpes de calor.

En países como Canadá se experimentan casos de mortalidad debido a este fenómeno, sin embargo, pocas de ellas son registrados y certificadas como golpes de calor, además se ha comprobado que por cada grado de temperatura del aire que aumenta, los casos de mortalidad incrementan hasta 2.72% en varias ciudades Canadienses (Wang et al., 2016).

c) Estrés térmico

El estrés térmico es un problema de salud que puede derivar en un golpe de calor y en circunstancias más pesimistas puede terminar en muerte (Farhadi et al., 2019). Por tal motivo es considerado una de las principales causas de morbilidad y mortalidad que puede ser atribuido al ambiente (Molenaar et al., 2016).

El estrés térmico puede determinarse con el apoyo de la percepción térmica y los valores de PET, como se muestra en la Tabla 6. Por lo que puede deducirse que el estrés térmico, se empieza a presentar en temperaturas que van de los 23°C – 29°C, y puede llegar hasta un estrés por calor extremo cuando se presentan temperaturas superiores a los 41°C.

Tabla 6

Rangos de temperatura fisiológica equivalente y estrés fisiológico.

PET (°C)	Percepción Térmica	Grado De Estrés Fisiológico
<4	Muy Frio	Estrés por Frio extremo
4 - 8	Frio	Fuerte estrés por frio
8 - 13	Fresco	Estrés por frio moderado
13-18	Ligeramente Fresco	Leve estrés por frio
18-23	Confortable	Sin estrés Térmico
23-29	Ligeramente cálido	Leve estrés por calor
29-35	Cálido	Estrés por calor moderado
35-41	Caliente	Fuerte Estrés por calor
>41	Muy Caliente	Estrés por Calor Extremo

Nota: Obtenido de "Projection of rural and urban human thermal comfort in The Netherlands for 2050" por Molenaar et al. (2016), International Journal of Climatology. 36 (1708-1723)

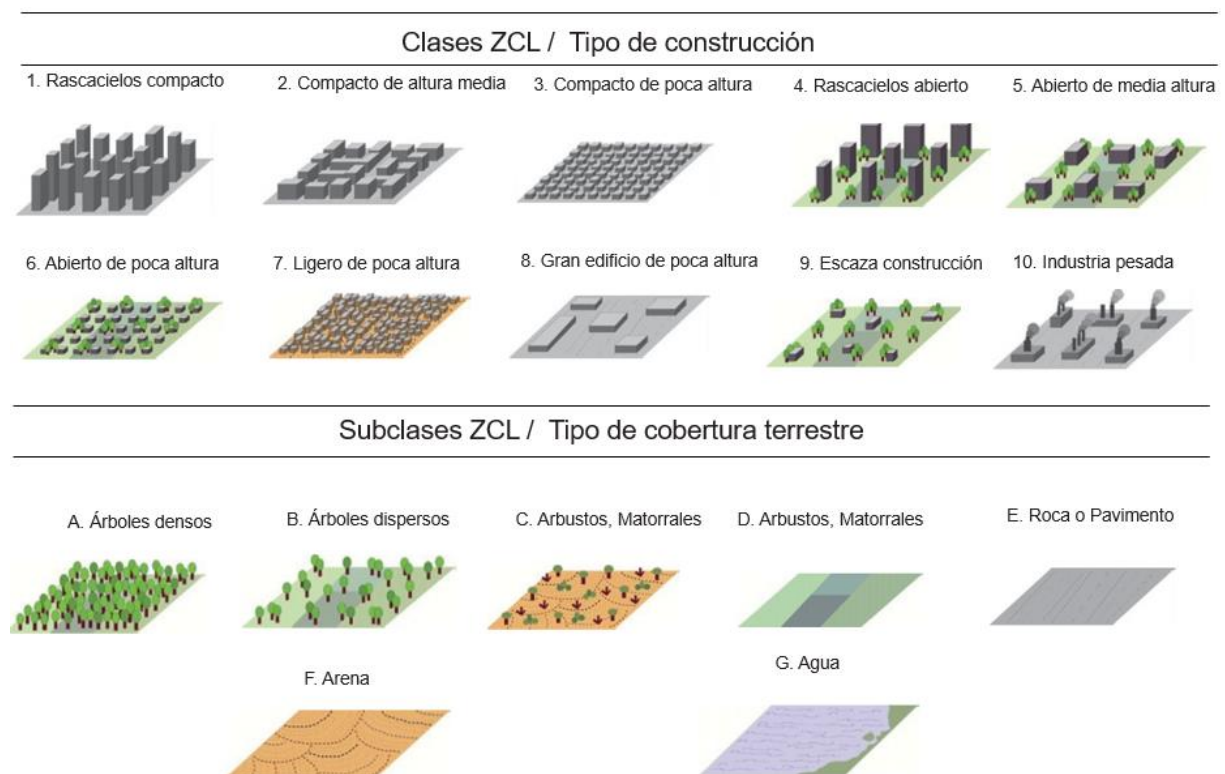
2.4. Zonas Climáticas Locales

Las Zonas Climáticas Locales, (LCZ, por sus siglas en inglés) hacen referencia a la representación climática a microescala en una zona urbana, es decir que cada LCZ, tiene un régimen de temperatura característico. Cada LCZ se ordena y se nombra por la propiedad de la superficie que la distingue, por lo que la clasificación de las LCZ

está compuesto por 17 tipologías diferentes, considerando el tipo de construcción y el tipo de superficie (Stewart & Oke, 2012).

La Figura 3 muestra la clasificación que se divide en tipo de construcción y tipo de cobertura terrestre, a medida que el aire cruza la frontera entre zonas vecinales, se ajusta a un nuevo contexto o LCZ, lo que deriva en nuevas transiciones térmicas, por lo que las LCZ tienen un radio de alcance de la superficie de entre 200 m y 500 m (Stewart & Oke, 2012).

Figura 3
Clases y subclases de las Zonas Climáticas Locales.



Nota. Adaptado de ‘Local climate zones for urban temperature studies’ por Stewart & Oke, (2012), Bulletin of the American Meteorological Society, 12 (1879–1900).

2.5. Configuración del cañón urbano

La configuración urbana toma un papel relevante en el estudio de los parámetros climáticos, los cañones urbanos forman parte de esta configuración, ya que en ellos se experimenta una variedad de factores que influyen en los estudios relacionados al confort.

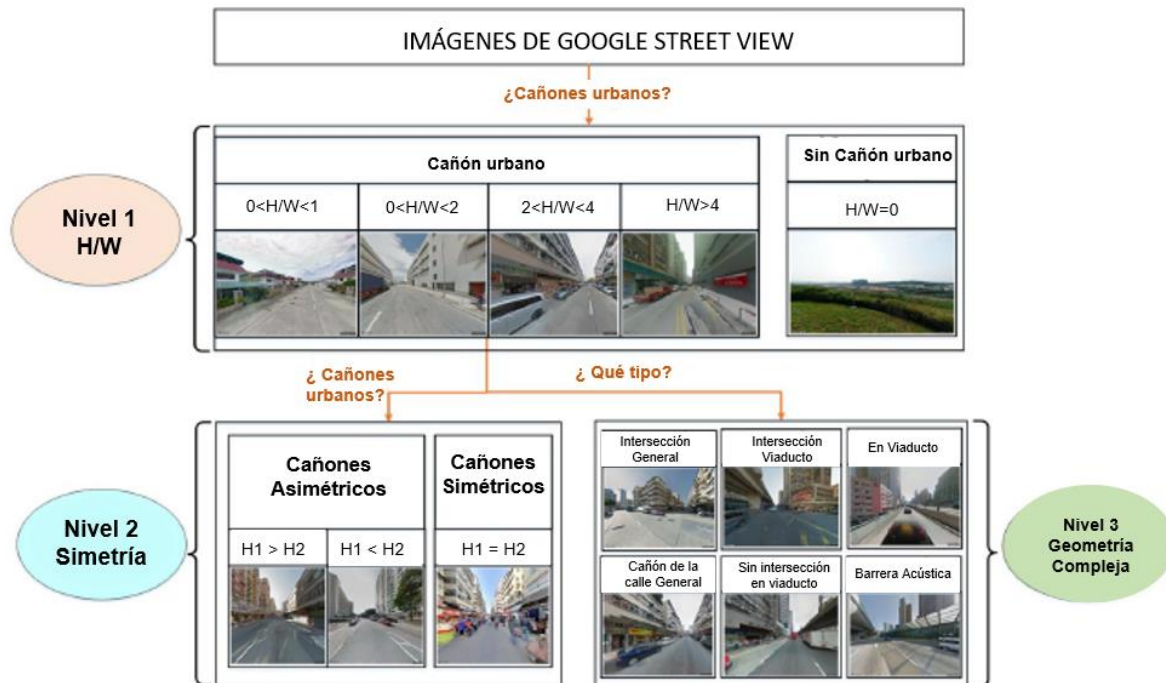
Se denomina cañón urbano a un espacio tridimensional compuesto por un camino, rodeado de muros o edificios en un entorno urbano (Jamei et al., 2020; Mohajerani et al., 2017), los cuales son pequeñas unidades de microclimas urbanos, que se ven afectados por la radiación solar, condiciones de sombreado urbano y vegetal, así como otros aspectos como el cambio de la temperatura del aire, y de la superficie (Muniz-Gäal et al., 2020).

Por tal motivo Deng & Wong (2020) consideran que los cañones urbanos juegan un papel valioso en el desarrollo del microclima ya que la H/W y su orientación determinan el acceso de sol y sombra, así como el paso del viento y temperatura del aire.

Por otra parte, Hu et al. (2020) manifiestan que existen diversas clasificaciones de los cañones urbanos, sin embargo, el los agrupa en una clasificación compuesta por tres niveles:

1. Primer nivel, es la clasificación más usual dentro las tipologías de cañones urbanos, la cual se centra en factores de rango como la relación aspecto, el SVF y la orientación.
2. Segundo nivel, se rige por la simetría de los cañones las alturas de los edificios que conforman el cañón urbano, comparando para esto si las alturas de las edificaciones que componen los cañones urbanos son iguales o similares, ya que la simetría tiene distintos efectos sobre el confort térmico y el flujo del aire.
3. Tercer nivel, la comprende a los cañones urbanos, clasificados con una geometría compleja, es decir que toma como referencia a las características geométricas, de los cañones urbanos y su clasificación comprende a viaductos, (intersección generales e intersección entre viaductos) e incluso viaductos sin intersecciones, así como barreras acústicas y cañones con geometrías complejas (ver Figura 4).

Figura 4
Clasificación de cañones urbanos.



Nota. Adaptado de "Classification and mapping of urban canyon geometry using Google Street View images and deep multitask learning" por Hu et al.(2020), Building and Environment, 167.

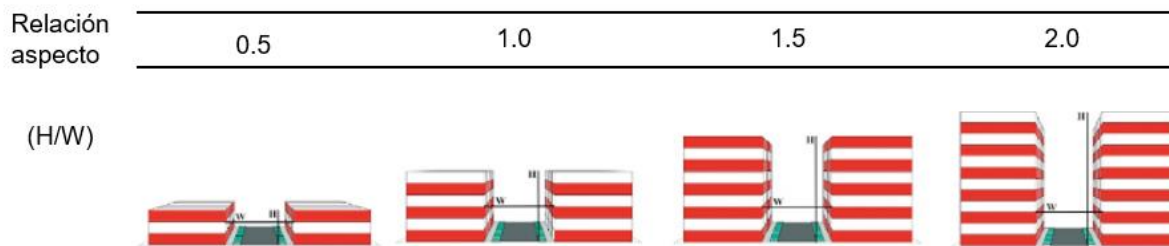
2.5.1. Relación aspecto

La principal características de la geometría de un cañón urbano es la relación entre la altura del edificio (H) y el ancho del cañón (W), la cual se conoce como relación aspecto (H/W) (Ahmad et al., 2005). Ridha, (2018) describe la relación aspecto como la relación de la altura promedio de las fachadas de los edificios y el ancho promedio del espacio. Pero por otra parte para Jamei & Rajagopalan, (2019) la relación aspecto es un elemento clave para determinar la geometría del cañón urbano.

Ahmad et al., (2005) coinciden con ese argumento, ya que describen la H/W como un factor determinante de la geometría del cañón urbano, sin embargo, clasifica la H/W, en tres tipologías diferentes: la primera clasificación hace referencia a cañones urbanos con relación de aspecto uniforme, es decir que la relación es igual a 1, y se caracteriza por no tener grandes aberturas en las paredes. La siguiente clasificación describe a cañones urbanos pocos profundos que se caracterizan por tener una H/W igual o menor a 0.5, y por último hace mención de que los cañones profundos que se caracterizan por tener una H/W superior a 1. Como se puede apreciar en la Figura 5,

la H/W está relacionada a la altura de los edificios y al ancho de la calle que compone el cañón urbano.

Figura 5
Relación aspecto de distintos cañones urbanos.



Nota. Adaptado de "Outdoor thermal comfort: Analyzing the impact of urban configurations on the thermal performance of street canyons in the humid subtropical climate of Sydney" por (Abdollahzadeh & Bioria, 2020a) Abdollahzadeh & Bioria, (2021). *Frontiers of Architectural Research*.

La Tabla 7 resume que existen estudios realizados por diversos autores quienes concuerdan que existe una correlación de la H/W con la percepción de confort térmico, y la presencia de vegetación.

Tabla 7
Relación de estudio enfocado a la relación aspecto y vegetación.

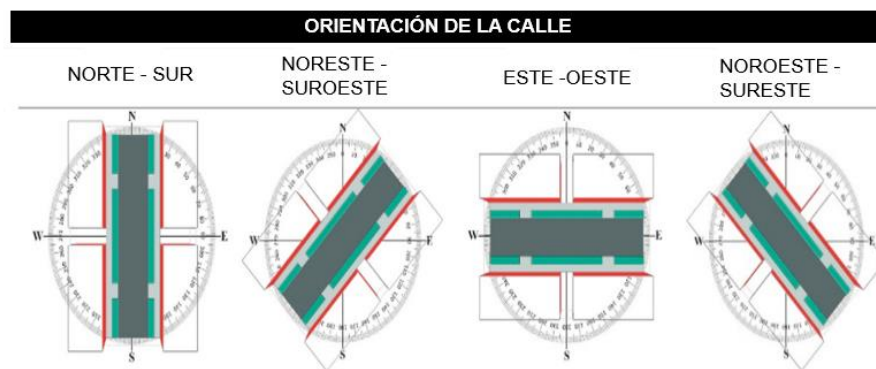
Referencia	Clima	Hallazgos
Yang, (2016). Singapore	Af Ecuatorial Cálido/ lluvioso	- Los cañones profundos tienen temperaturas de aire más bajas que los cañones poco profundos. - La Tmrt disminuye al incrementar la relación aspecto. - PET disminuye en medida que incrementa la H/W, lo que indica que los cañones profundos tienen mejores condiciones de confort.
Toudert, (2007). Algerian, Sahara	Bws Cálido/ seco	- En cañones urbanos con relación aspecto grande y orientación norte - sur, entra mayor cantidad de sol en comparación de los cañones urbanos con orientación Este - Oeste - En cañones urbanos profundos con orientaciones Este - Oeste, los niveles de PET, disminuyeron hasta 22 K. - En cañones urbanos uniformes con orientación N-S la presencia de vegetación, generó la disminución de los niveles de PET hasta 24 K.
Ahmadi, (2019). Teherán, Irán	Bwk Árido/frío	- El aumento de H/W en cañones urbanos, con orientación norte - sur, disminuyó la Tmrt. - Bloquear la mitad del cielo, al aumentar la relación aspecto 1/2 es efectivo para mitigar el calor. - El aumento de vegetación en cañones urbanos con orientación este - oeste, y el aumento de la relación aspecto en cañones urbanos con orientación norte - sur, son estrategias recomendadas por climas desérticos.

2.5.2. Orientación de los cañones urbanos

Bhaskar & Mukherjee (2017) destacan que la orientación de las calles juega un papel importante debido a que se relaciona con la ventilación del sistema urbano y a este a su vez se relaciona con la sensación térmica de las personas. Mientras que Jamei & Rajagopalan (2019) y Limona et al. (2019) complementan la postura de Bhaskar & Mukherjee (2017), al considerar que la orientación no solo restringe la velocidad del viento en los cañones urbanos, sino que es un factor relevante para determinar el acceso de luz solar. En la Figura 6, se puede observar los cuatro tipos de orientaciones principales que se pueden presentar en los cañones urbanos: norte – sur, este – oeste, noreste – suroeste y noroeste – sureste.

Figura 6

Orientación de los cañones urbanos.



Nota. Adaptado de "Outdoor thermal comfort: Analyzing the impact of urban configurations on the thermal performance of street canyons in the humid subtropical climate of Sydney" por Abdollahzadeh & Bioria (2020), Frontiers of Architectural Research.

Respecto a la orientación norte - sur, Acero et al. (2021) argumentan que los cañones urbanos orientados norte sur, son los que mejor rendimiento de confort térmico exterior presentan en horarios vespertinos. Sin embargo, durante el ciclo diurno Lobaccaro et al. (2019) aseguran que las orientaciones norte – sur los niveles relacionado a confort, medidos a través de PET alcanzan un rango de resistencia térmica moderada ($29^{\circ}\text{C} < \text{PET} < 35^{\circ}\text{C}$). Mientras que Srivanit & Jareemit (2020) mencionan que la orientación norte – sur, ofrece mejores condiciones de confort térmico para exteriores. No obstante Yin et al. (2019) señalan, que los cañones urbanos con esta orientación, presentan la mayor cobertura de sombreando, en comparación con los cañones urbanos cuya orientación es este – oeste.

Desde el punto de vista de Deng & Wong (2020) los cañones urbanos con orientación este – oeste, sufren de condiciones térmicas más cálidas, y mayor tiempo de prolongación de la T_{mrt} . mientras que por otra parte Srivanit & Jareemit (2020), explican que en este tipo de orientación se perciben las peores condiciones térmicas durante el día, por lo que recomiendan que para el caso de cañones urbanos profundos, se apoyen del uso de la sombra mutua de los edificios (para mejorar el rendimiento térmico), y de vegetación para evitar la radiación solar directa. Además, los investigadores también argumentan que en los cañones urbanos con esta orientación presentan mayores valores de T_{mrt} en comparación con los cañones orientados norte - sur.

De acuerdo con Acero et al. (2021) un grupo investigador del Centro de Detección y Modelado Ambiental (CENSAM) ubicado en Singapur, señala que los cañones urbanos cuya orientación noreste - suroeste, son los que presentan los niveles más deficientes de confort térmico en horarios vespertinos. Mientras que desde el punto de vista de Srivanit & Jareemit (2020), divergen de la postura de Acero et al. (2021), ya que argumentan que la orientación noreste – suroeste, es la orientación de cañones urbanos donde destacan las mejores condiciones de confort.

Por último en los cañones con orientación noroeste - sureste Lobaccaro et al. (2019) determinan que, en áreas compactas de poca altura, los cañones urbanos con estas orientaciones presentan un rango de confort térmico ligeramente cálido en comparación con el resto de las orientaciones evaluadas.

2.5.3. Factor de Cielo Visible

El Factor de Cielo Visible es un parámetro que es utilizado para evaluar condiciones micro meteorológicas desde una perspectiva de calle; Qaid et al. (2018) describen al SVF como el ángulo de visión del cielo que alcanza hasta 180° desde el nivel de suelo, a modo de obtener una imagen de todo el cielo visible.

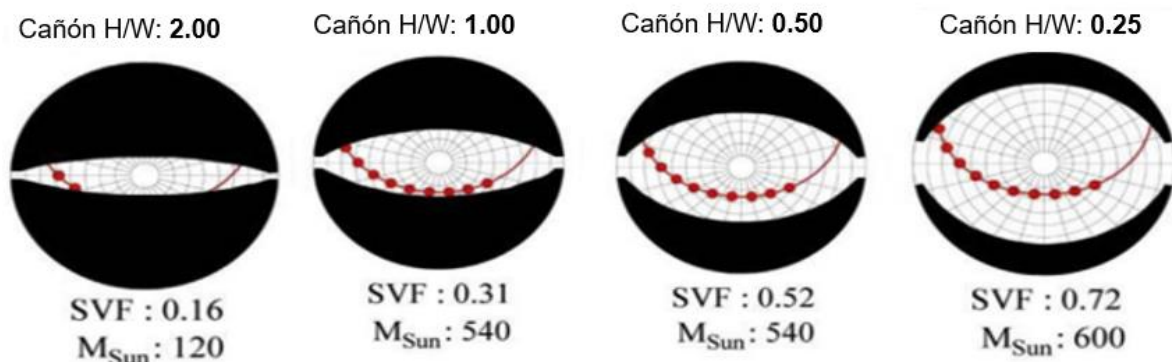
Por otra parte, Nastos et al. (2017) complementan que el SVF puede proporcionar un enfoque basado en la radiación, permitiendo estimar parámetros micro meteorológicos.

Desde el punto de vista de Oke, (1981) el SVF, hace referencia a una perspectiva bioclimática, ya que él considera que el SVF, toma un papel muy importante debido a que a partir de él se pueden determinar los flujos de radiación solar que entran a un entorno urbano. Investigadores como Wu et al. (2013) , agregan que este factor está relacionado con la radiación entrante que es recibida por una superficie y la recibida de todo el entorno radiante hemisférico. Mientras que Miao et al. (2020) argumentan que el SVF es la relación del área visible de cielo y el entorno cubierto de edificios o árboles en la calle, el cual es utilizado como un parámetro para la investigación de climas urbanos.

Sin embargo, Ahmadi Venhari et al. (2019) comentan de que el SVF es uno de los métodos más utilizados para calcular el sombreado proveniente de árboles, y describen que este puede ser definido como un porcentaje de cielo despejado desde punto específico, cuyos valores van del 0 al 1, donde 0 representa la obstrucción y el 1 es equivalente a cielo despejado. Como lo muestra la Figura 7, los valores de SVF incrementan en consideración con la relación aspecto que se tiene en los cañones urbanos, es decir a mayor relación aspecto menor valor SVF. En conclusión, se puede resumir que el SVF es un parámetro utilizado para evaluar la radiación desde una perspectiva geométrica en estudios en cañones urbanos. En la Tabla 8 se expresan las distintas descripciones de este factor, por diferentes autores.

Figura 7

Relación del factor de cielo visible, y relación aspecto.



Nota. Reproducido de "Examining default urban-aspect-ratios and sky-view-factors to identify priorities for thermal-sensitive public space design in hot-summer Mediterranean climates: The Lisbon case" Nouri et al. (2017), Building and Environment, 126, (442-456).

Tabla 8

Descripción del factor de cielo visible por diversos autores.

Autor/ Año	Descripción del Factor de Cielo Visible
Oke, (1981)	Factor que determina los flujos de radiación solar que entran a un entorno urbano.
Wu et al. (2013)	Relación entre la radiación entrante que es recibida por una superficie y la recibida de todo el entorno radiante hemisférico.
Miao et al. (2020)	Relación del área visible del cielo y el entorno cubierto de edificios o árboles en la calle.
Ahmadi Venhari et al. (2019)	Porcentaje de cielo despejado desde punto específico, cuyos valores van del 0 al 1, donde 0 representa la obstrucción y el 1 es equivalente a cielo despejado.

2.5.3.1. Herramientas para evaluar el Factor de Cielo Visible

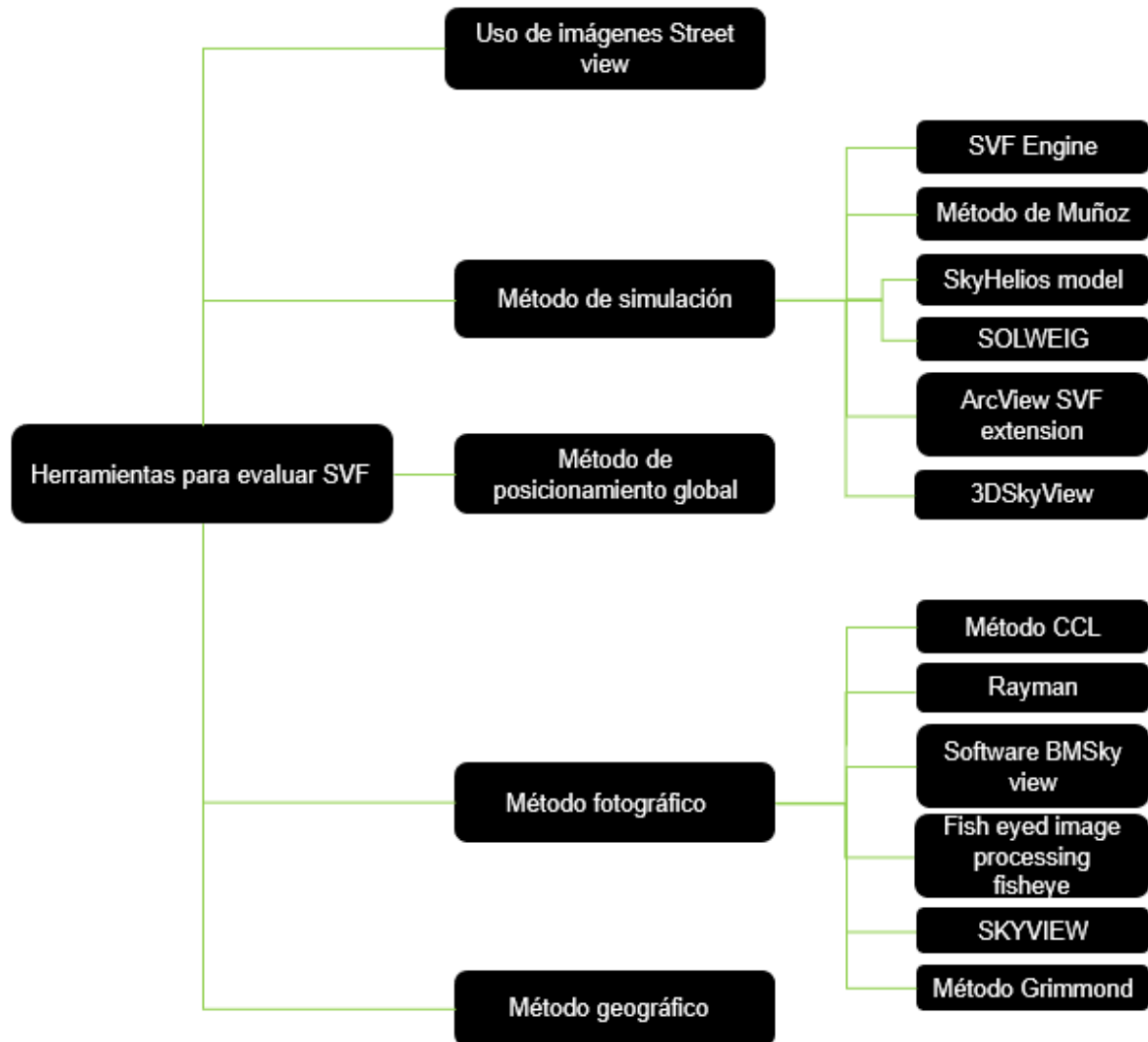
Existen distintos métodos para realizar el cálculo del SVF, Miao et al. (2020) identifican 5 tipologías distintas para estimar su valor: el método geográfico, el método fotográfico, el método de posicionamiento global, el método de simulación y el uso de imágenes Street View.

En la Figura 8 puede observarse que estos 5 grupos principales, albergan subgrupos con los que se puede calcular este factor. Sin embargo, uno de los métodos más utilizados es Rayman, un programa que secciona el entorno tridimensional en dos hemisferios, (inferior y superior). El hemisferio inferior que representa los elementos sólidos (albedo y emisividad de los edificios) y el hemisferio superior que representa el cielo libre, y que en conjunto son necesarios para realizar la estimación de la densidad del flujo de la radiación (Matzarakis et al., 2010).

Sin embargo, dentro del grupo para de herramientas para evaluar existen cinco distintas, clasificadas de la siguiente manera:

1. Imágenes Street view
2. Método de simulación
3. Método de posicionamiento global
4. Método fotográfico
5. Método geográfico

Figura 8
Herramientas para evaluar el Factor de Cielo Visible.



Nota: Elaborado a partir de información de “Review of methods used to estimate the sky view factor in urban street canyons” por (Miao et al., 2020), Building and Environment, 168, (106497).

En cuanto a la obtención del SVF, por medio del método fotográfico con apoyo de Rayman, el proceso inicia con la recopilación de imágenes capturadas con una cámara fotográfica y lente de ojo de pez, en un punto clave; Para posteriormente procesar las imágenes capturas con el programa de Rayman, donde se realiza una conversión de la imagen a blanco y negro siendo los pixeles blancos los representativos al cielo, mientras que los pixeles oscuros representan los elementos de obstrucción para cálculo de SVF (Matzarakis, 2018).

2.6. Vegetación como estrategia de mitigación de las ICU

La vegetación urbana se ha transformado en un elemento elemental para la mitigación de ICU. Ahmadi Venhari et al. (2019) argumentan que la vegetación urbana es uno de los elementos bio meteorológicos que tiene un papel importante en la mejora del confort. A su vez López-Ordóñez et al. (2017) coinciden con esta argumentación ya que exponen que la vegetación urbana funciona como protección contra la radiación, y determinan que su uso es una estrategia invaluable para generar espacios públicos confortables. Asimismo Mouada et al. (2019) coinciden con que la vegetación es un elemento importante en la mejora del microclima urbano y del confort térmico en exteriores, ya que su presencia en los cañones urbanos promueve la actividad en las personas, como las caminatas en los vecindarios.

Por otra parte en un estudio realizado por Farhadi et al. (2019) concluyeron que el incrementar la cobertura vegetal en las ciudades al 10%, mejora el confort térmico. Por lo que podría deducirse que el uso de vegetación es la mejor estrategia para mitigar el estrés térmico (Yin et al., 2019).

Sin embargo, autores como Srivanit & Jareemit (2020) difieren de estas posturas, ya que determinan que la vegetación urbana no pueden aumentar las condiciones de confort, en todas las configuraciones urbanas, debido a que en el estudio que realizaron, se llegó a la conclusión que en cañones regulares 1-1 (uniformes), las condiciones de confort no aumentan, por lo que el efecto que genera la presencia de vegetación en cañones urbanos es imparcial, no tiene el mismo efecto en cada una de las configuraciones urbanas. Por lo que para clarificar esta disparidad de posturas deben generarse estudios especificando la relación de aspecto y orientación que tienen los cañones urbanos que cuentan con esta vegetación urbana para evaluar adecuadamente los impactos que genera la vegetación.

2.6.1. Tipo de vegetación

Respecto a la revisión de la literatura la vegetación con mayor relevancia en los estudios son los árboles los que proveen de múltiples beneficios ambientales, económicos y sociales, además son elemento importante para el paisaje urbano ya que tiene el potencial de mejorar las comodidades y reducir el uso de energía en

edificios, debido a que puede disminuir las altas temperaturas urbanas a través de la proyección de sombra y la evapotranspiración, además Coutts et al. (2016) concluyen en su investigación que la cobertura de los árboles contribuye a reducir la temperatura del aire durante el día por lo que mejora las condiciones de confort. Respecto a esto Zheng et al. (2018) declaran que los árboles ocasionan una disminución de la velocidad del viento, y son más eficientes para mejorar el confort térmico en comparación de la presencia de los arbustos y pastizales. Por lo que los árboles son más efectivos para enfriar el ambiente, en comparación que cualquier otro tipo de vegetación, incluido el pasto (Ng et al., 2012).

Desde otra perspectiva, se puede deducir que en entornos urbanos abiertos la presencia de pasto reduce el estrés por calor, bajando los niveles de moderado a cálido, no obstante la presencia de pasto presenta mejoras en la T_{mrt} y la temperatura superficial (Lobaccaro & Acero, 2015). Además Lee et al. (2016) concluyen que el efecto que tienen los pastizales por la noche es significativamente más alto que la de los árboles. Sin embargo, en la investigación realizada por Aboelata, (2020), demuestra que en escenarios simulados con 70% vegetación los niveles de temperatura del aire disminuyen en 0,1 K en comparación con escenarios donde se presenta 20% y 50 % de árboles respectivamente, mientras que en escenarios donde se muestra una combinación de 50% de árboles con 70% de pasto, los resultados muestran una reducción en la velocidad del viento.

2.6.2. Efecto de enfriamiento la vegetación

El efecto de enfriamiento que genera la presencia de vegetación se debe en gran medida al proceso de evapotranspiración, así como también a la proyección de sombra que permite reducir los niveles de T_{mrt} , Ali-Toudert & Mayer, (2007); Ng et al. (2012). Tsoka et al. (2021) indican que el potencial de enfriamiento de los árboles es atribuido a su sombreado, por lo que este efecto es apreciable debajo de la copa de los árboles, por lo que Ng et al. (2012) concluyen que el efecto de enfriamiento es perceptible cuando la cobertura de árboles es mayor que 1/3 que la superficie total de la tierra. A su vez Lobaccaro et al. (2019) argumentan que el enfriamiento es notorio cuando existe la presencia de árboles y pasto.

A pesar de esto, Sabrin et al. (2021) difieren de estas posturas, ya que explican que el efecto que genera la vegetación urbana, depende en gran medida de la geometría urbana. Es decir, que influye la relación de aspecto y orientación de los cañones urbanos para que el desempeño de la vegetación pueda generar enfriamiento.

2.6.3. Evapotranspiración

Es un proceso que se caracteriza por la transferencia de agua desde una superficie vegetal hacia a la atmosfera (Domingo et al., 2003). Jiang et al. (2018) refieren que el efecto de evapotranspiración mejora cuando hay una gran superficie de vegetación. Sin embargo, para Aboelata & Sodoudi (2019) la evapotranspiración en conjunto con la proyección de sombra de la vegetación, generan un efecto refrescante.

2.6.4. Índice del Área Foliar

El Índice de Área Foliar (LAI, por sus siglas en inglés) es una variable que se define como la variable total de la mitad de las hojas, por unidad de superficie de suelo, y es utilizado para determinar la interceptación del agua del dosel, la mitigación de la radiación y el intercambio de agua y CO₂ (Duarte et al., 2015). El LAI, varía de acuerdo al clima, la fragmentación y la composición de las especies, por lo que Fang & Liang (2014) describen este índice, como una propiedad estructural importante de la vegetación, argumentando que en las hojas es donde se produce el intercambio de energía y masa, que son procesos que se relacionan con la evapotranspiración y la fotosíntesis. Debido a que LAI es un parámetro cuyo principal uso está relacionado con los modelos de turbulencia de LAD e intercambio de calor, Zhang et al., (2018) concluye que la vegetación que cuenta con características como: árboles con gran altura, un valor de LAI alto y dosel grande, logra mejorar las condiciones de confort térmico.

Por lo que una vez determinada la clasificación del follaje, se puede relacionar con el efecto que tendrán sobre el confort térmico. En tanto en la Tabla 9, se observan los distintos valores que se le adjudican al LAI, clasificando previamente, la densidad del follaje en denso, moderado y escaso.

Tabla 9
Clasificación de las características físicas de los árboles.

Parámetro	Sub clase	Valor	Valor aplicado
Densidad del follaje	▪ Denso	▪ LAI >3.0	▪ 3.5
	▪ Moderado	▪ LAI= 1.5-3.0	▪ 2.5
	▪ Escaso	▪ LAI= 0.5-1.5	▪ 1.5
Altura del árbol	▪ Alto	▪ 16-24	▪ 20
	▪ Mediano	▪ 8-16	▪ 12
	▪ Corto	▪ >8	▪ 6
Altura del tronco	▪ Alto	▪ <3	▪ 4
	▪ Bajo	▪ <3	▪ 2
Diámetro de la corona	▪ Estrecho	▪ <4	▪ 3
	▪ Mediano	▪ 4-8	▪ 6
	▪ Ancho	▪ >8 m	▪ 9

Nota: Obtenido de "Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation - development and evaluation" por Morakinyo et al. (2020), Science of the Total Environment, 719 (137461).

2.6.5. Densidad del área Foliar

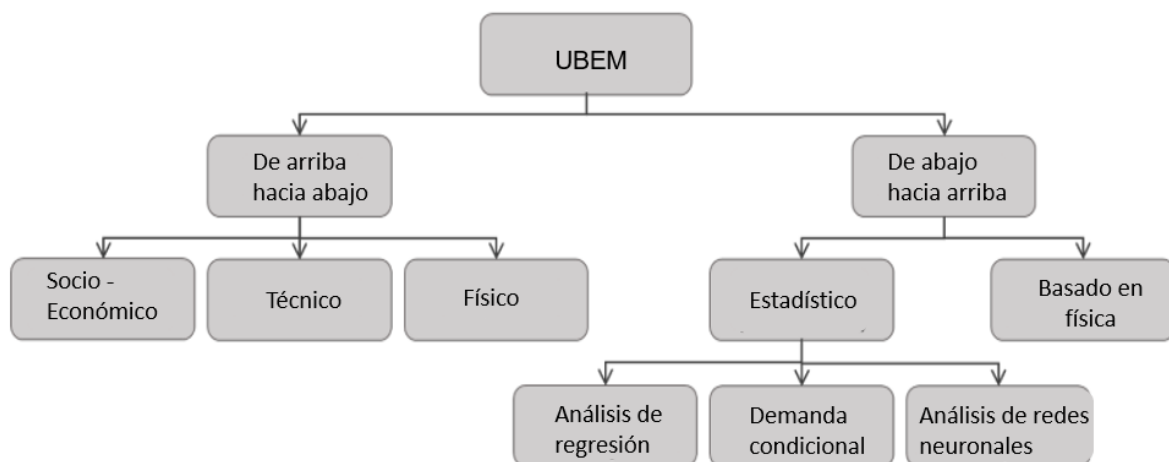
El parámetro de la Densidad de Área Foliar (LAD, por sus siglas en inglés) es definido por Duarte et al. (2015), como el área foliar unilateral total, la cual es medida en m² y es multiplicada por la unidad de volumen de capa, en cada capa horizontal de la copa del árbol. Es parámetro es utilizado para caracterizar las estructuras de la copa vertical y horizontal del árbol (Oshio et al., 2015). Tsoka et al. (2021) concluyen que cuando existe un agrupamiento de árboles en fila continua, los valores de la LAD aumentan y contribuyen a una reducción diaria de la temperatura del aire. Por lo que el incremento de los niveles de LAD, tiene un efecto en la reducción de la demanda energética.

2.7. Modelo Energético de edificios urbanos (UBEM)

El Modelo Energético de edificios (UBEM, por sus siglas en inglés) hace referencia al modelado computacional y de rendimiento de un contexto urbano, que considera la dinámica de edificios y el microclima urbano, con la finalidad de proporcionar información cuantitativa para realizar reportes de diseño y operación de

edificios urbanos (Hong et al., 2020). El modelado urbano comprende flujo de bienes, energía, residuos y personas, por lo que existen tres tipos de modelos: los modelos aplicados al entorno urbano, el modelado de sistemas de energía urbana, y modelado de edificios a escala urbana, en donde se abordan aspectos como optimización y evaluación de la luz, así como la evaluación de áreas verdes en las ciudades (Ferrando & Causone, 2019). Entre los enfoques de modelado, se identifican dos categorías principales de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba. Los métodos de arriba hacia abajo estiman las relaciones a largo plazo. El otro enfoque de modelado es el que va de abajo hacia arriba, estos calculan el consumo de energía de un edificio y agregan resultados en niveles (ver Figura 9).

Figura 9
Esquema de los enfoques UDEM.



Nota: Adaptado de "An overview of urban building energy modelling (UDEM) tools Energy Department , Politécnico di Milano , Milano , Italy Urban modelling approaches" por Ferrando & Causone, (2019), (páginas 3452-3459).

Ang et al. (2020) describen el modelado energético de edificios urbanos, como modelos numéricos acoplados, de transferencia de calor, además menciona que son utilizados en procesos de planificación y diseño. Estos modelos numéricos tienen la virtud de funcionar como herramienta para explorar la morfología urbana y los procesos climáticos relacionados al diseño sustentable; se basan en la simulación de interacciones de dinámica de fluidos complejos, que proporcionan predicciones efectivas en la toma de decisiones en el ámbito urbano ambiental. Actualmente existe una amplia gama para su aplicación que va desde cambio climático, hasta prácticas de diseño sustentable (Palme, 2021).

Existen diversas opciones en cuanto a modelos numéricos, para simular interacciones urbano-ambientales en los que se destacan el uso de ENVI-met, y Grasshopper. Donde se requiere la entrada de datos para la generación de modelos, donde se contemplan factores base para su desarrollo. como lo son el procesamiento de datos, simulación, calibración y ejecución.

La primera etapa de este proceso es el pre procesamiento de datos que implica la recolección de datos geográficos; para esto en la mayoría de los casos se segmentan arquetipos (representaciones compuestas del entorno) para agilizar el proceso de modelado. A su vez en este paso se adhieren los datos meteorológicos que servirán para incluir los efectos de las ICU. En la etapa número dos, la generación de modelos implica la consideración de todos los arquetipos para la creación de modelos, para realizar la simulación. En la tercera etapa, mejor conocida como la etapa de simulación, se generan los perfiles horarios de acondicionamiento, temperaturas y emisiones de carbono asociadas. Por último, queda la ejecución, donde es desarrollada la simulación (Ang et al., 2020).

2.7.1. ENVI-met

ENVI-met, es un programa relacionado en los estudios ambientales relacionados confort térmico y golpes de calor, su uso se ha incrementado entre diversos investigadores (Abaas, 2020; Morakinyo & Lam, 2016; Teshnehdel et al., 2020), para realizar simulaciones de carácter urbano. Yang et al. (2016) lo definen como un modelo informático que se basa en leyes fundamentales de la dinámica de fluidos y termodinámica, que sirve para crear modelos tridimensionales y simular las interacciones de las superficies, vegetación y aire del entorno urbano. Lo que permite crear modelos con dos dimensiones horizontales (x, y) y una dimensión vertical (z).

En tanto Hegazy & Qurnfulah (2020) lo describen como un programa que es alimentado con datos meteorológicos, de los cuales derivan temperatura, velocidad del viento y HR , mientras que de los datos geográficos se necesitan datos como la longitud y latitud del área de estudio, así como también requiere de información sobre las características físicas del área, con la finalidad de recrear un modelo con la mayor cantidad de datos.

En la Figura 10, se puede observar la ruta del proceso para trabajar en ENVI-met seccionado por diferentes etapas, la primera etapa compuesta por el módulo de “Spaces” y “Albero” en donde se desarrolla el proceso de modelado y configuración del proyecto. La segunda etapa está compuesta por los módulos de “ENVI-guide” y “Forcing manager”, en estos módulos se realiza la configuración de tiempos de simulación y se realiza la configuración de los datos meteorológicos de entrada. La siguiente etapa, se caracteriza por llevar a cabo el proceso de simulación a partir del módulo “ENVI-core”, y por último se encuentran el módulo de “Biomet” y el módulo de “Leonardo” los cuales permite llevar a cabo los mapas térmicos.

Figura 10
Ruta del proceso en ENVI-met.



Nota: Elaborada a partir de la información e interfaz de ENVI-met software, diseñado por Bruse, (1999).

2.7.1.1. Simulación de escenarios

Los escenarios son indispensables para realizar las simulaciones en ENVI-met. Estos escenarios se basan en diferentes modelos propuestos en el que se manipulan variables morfológicas como la relación aspecto (H/W) de un cañón urbano o el incremento de la vegetación; y se someten a la simulación de las condiciones reales del sitio, lo que permiten pronosticar y evaluar las condiciones meteorológicas del sitio

que influyen sobre el confort térmico. Estos modelos adquieren un papel relevante para el estudio del microclima y de las propuestas que se sugieren para la mejora del espacio público

Dentro del estado del arte se ha identificado que en la mayoría de los estudios de simulación del microclima urbano los modelos incluyen el incremento de vegetación al 50%. Autores como Aboelata & Sodoudi (2020), Taher et al. (2019) y Ouyang et al. (2019), llevaron a cabo propuestas de escenarios con incremento de vegetación al 50%. En dichos estudios reflejaron resultados positivos debido a que se demostró que el aumento de vegetación al 50% aumentaba la HR, y se presentaba una disminución de la Temperatura Fisiológica Equivalente mayor, en consideración a los escenarios donde se presentó un aumento de vegetación al 25% y 30%. Sin embargo, en un estudio realizado por Teshnehdel et al. (2020) se concluyó que aunque el mejor escenario es aquel donde se incrementa la vegetación, el escenario idóneo es aquel en el que se propone el aumento de árboles a cada 10 m.

A pesar de proponer escenarios con aumento de vegetación Ouyang et al. (2019) consideraron relevante la implementación del escenario sin vegetación para evaluar la influencia de la vegetación, con el modelo base (condiciones actuales del sitio en estudio) y la propuesta del aumento de la vegetación en el espacio donde se llevó cabo el análisis. Sin embargo, autores como Lee et al. (2020) realizaron propuestas de modelos con diversas configuraciones espaciales donde se consideró la manipulación de la H/W de los cañones urbanos, como pieza clave para realizar las simulaciones, donde contrastaron los resultados obtenidos con los diferentes valores de H/W. Obteniendo que el mejor escenario era aquel, en donde la H/W es =2 (cañones profundos), demostró que había una disminución de PET.

2.8. Marco Normativo

Existen diversas normativas relacionadas al confort térmico, Ahmadi Venhari et al. (2019) refieren en su investigación la definición de confort térmico como “un estado mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico” basado en la ISO_7730, (2005). Esta norma hace referencia a la determinación analítica e interpretación del confort térmico a través del cálculo de los índices PMV -PPD, considerando el equilibrio

térmico de las personas. Estableciendo para esto a través del índice del Voto Medio Pronosticado (PMV) una escala de sensación térmica basada en 7 puntos, o escalas que pasan de frío a calor. La normativa también aborda el Porcentaje de Insatisfechos (PPD, por sus siglas en inglés), es decir los votos de insatisfacción relacionados a la temperatura que se experimentan con relación al ambiente, el malestar térmico local que se puede experimentar por el calentamiento o enfriamiento no deseado que se manifiesta en alguna parte del cuerpo y la evaluación a largo plazo de las condiciones generales de confort.

Por otra parte Limona et al. (2019) aluden que algunos parámetros personales en conjunto con los parámetros climáticos como la HR, la velocidad del viento, temperatura del aire y la T_{mrt} , se apegan a los factores que influyen en el confort térmico como lo marca la ASHRAE 55. Esta norma establece las condiciones térmicas aceptables para los usuarios de edificios, basándose en el conjunto de factores asociados al ambiente interior.

Además, esta norma toma en consideración los factores del nivel de actividad que realizan las personas, así como el tipo de vestimenta que llevan puesta, para determinar el ambiente térmico. Además, su aplicabilidad se basa en el uso de encuestas de aceptación del ambiente, las cuales están diseñadas para medir el confort a través de distintos parámetros, como la tasa metabólica, el clo, la temperatura y humedad del aire, la T_{mrt} y la velocidad del aire. Por lo que para la toma de estas medidas la norma también establece criterios para realizar las mediciones, donde menciona que para los parámetros de la temperatura y velocidad del aire las medidas deben realizarse a una altura 0.10 m, 0.6 m y 1.1 m para ocupantes sentados, mientras que para usuarios de pie las medidas deben realizarse a una altura de 0.10 m, 1.1 m y 1.7 m. así también hace recomendaciones para medir la superficie con un termómetro y establece los tiempos de medición ideales (ANSI/ASHRAE_55, 2017).

En relación con la instrumentación, la ISO 7726, se utiliza como referencia para establecer especificaciones de los instrumentos para medir los distintos parámetros climáticos. Las especificaciones y métodos contenidos en esta Norma se dividieron en dos clases de acuerdo con el grado de molestia térmica a evaluar. Las

especificaciones y métodos de tipo C (confort) hacen referencia a mediciones realizadas en entornos moderados que se acercan a las condiciones de confort estándar.

Mientras que las especificaciones y métodos del tipo S (estrés térmico): hacen referencia a mediciones realizadas en entornos sometidos a un mayor estrés térmico. Por otro lado, esta Norma también describe algunos parámetros climáticos y sugiere algunos equipos para su medición. En la Tabla 10, se aprecia que existe instrumentación específica para realizar las mediciones de cada parámetro climático.

Tabla 10

Variables climáticas e instrumentos de medición, según la ISO-7726.

Variable Climática	Instrumento De Medición
Temperatura Radiante Media	▪ Termómetro de Globo Negro
Temperatura Radiante Plana	▪ Radiómetro
Humedad Absoluta	▪ Psicrómetro
Velocidad del Aire	▪ Anemómetro
Temperatura de la Superficie	▪ Termómetro de contacto / Sensor de infrarrojos
Temperatura del aire	▪ Globo Negro

Nota: Obtenido de "Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities" por ISO-7726,1998. Ergonomics.

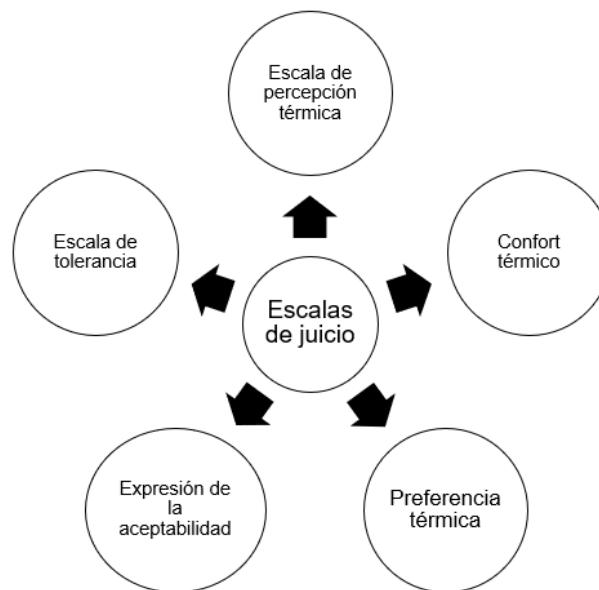
Diversos estudios son los que han utilizado esta normativa. Mouada et al. (2019) y Krüger et al. (2011), hacen referencia a esta Norma, para la realización de sus estudios, en cuanto a la medición de variables climáticas (velocidad y dirección del viento, humedad, temperatura del aire y radiación solar). A diferencia de ellos, Ahmadi Venhari et al. (2019) y Hwang et al. (2011) se apoyaron en esta Norma para la realización de su investigación, sin embargo ellos se enfocaron en el uso de las fórmulas mencionadas en la Norma, para determinar la T_{mrt} Mientras que Krüger, (2017) y Sharmin et al. (2017) se apegaron a las disposiciones marcadas por esta Norma para hacer precisión del uso de los instrumentos para realizar las mediciones de variables.

En cuanto a la ISO 8896, esta hace referencia a la determinación de la tasa metabólica, y especifica diferentes métodos para su determinación en el contexto de la ergonomía en el entorno de trabajo, donde se determina una clasificación por categorías en torno a la relación entre la frecuencia cardiaca y la tasa metabólica.

Otras de las Normativas relacionadas al confort térmico, son la Normativa ISO_9920, (2008) que determina la interacción entre el aire, el movimiento de los cuerpos y la resistencia que se tiene al vapor, y la Normativa ISO-10551, (1995) que permite construir escalas de medición subjetivas, estas escalas se enfocan en la preferencia, aceptabilidad, y componentes ambientales. En la Figura 11, se pueden apreciar las diferentes escalas referentes a las percepciones térmicas, las cuales pueden ser evaluadas a través del uso de cuestionarios. sobre el confort aplicados a la población en general (Krüger et al. 2011) .

Figura 11

Escalas del juicio, referente a la ISO 10551.



Nota: Elaborado a partir de “Ergonomics of the thermal environment - Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales Ergonomie” por ISO-10551, (1995).

Las normas internacionales conocidas como ISO, marcan una pauta para el adecuado conocimiento de conceptos relacionados al estudio de confort térmico, así como también recomiendan los instrumentos adecuados para la medición de diversos parámetros climáticos y su debido uso, considerando para esto las alturas y tiempos adecuados para la realización óptima de los estudios.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

La secuencia metodológica de esta investigación se rige por 5 ejes principales: el primer eje se centra el diseño de la investigación, mientras que el segundo eje trata sobre el diseño del experimento; posteriormente el tercer eje aborda la selección del área de estudio que involucra mapas térmicos y zonas climáticas locales; y el cuarto eje se enfoca en la recolección de datos, lo cual conlleva a periodos de monitoreo y características de las herramientas, por último el quinto eje se centra en la simulación, con el uso de los programas en ENVI-met y Rayman.

.

3.1. Diseño de la investigación.

En palabras de Hernández, (2014) el diseño de la investigación “se refiere al plan o estrategia concebida para obtener la información que se desea con el fin de responder al planteamiento del problema”. El diseño del experimento para el desarrollo de este proyecto se ubica dentro de la categoría experimental. En la Figura 12, se muestra el diseño del experimento, cuya subcategoría es de tipo cuasi experimental con enfoque cuantitativo; el cual se caracteriza por la manipulación de variables independientes, que para este caso de estudio corresponde a la morfología urbana y la vegetación, estas variables serán evaluadas mediante diferentes escenarios de simulación para conocer sus efectos sobre el confort térmico.

Figura 12

Diseño de la investigación.



Nota: Elaborado a partir de información de Metodología de la Investigación por Hernández, (2014). McGraw Hill Education.

3.2. Diseño del experimento

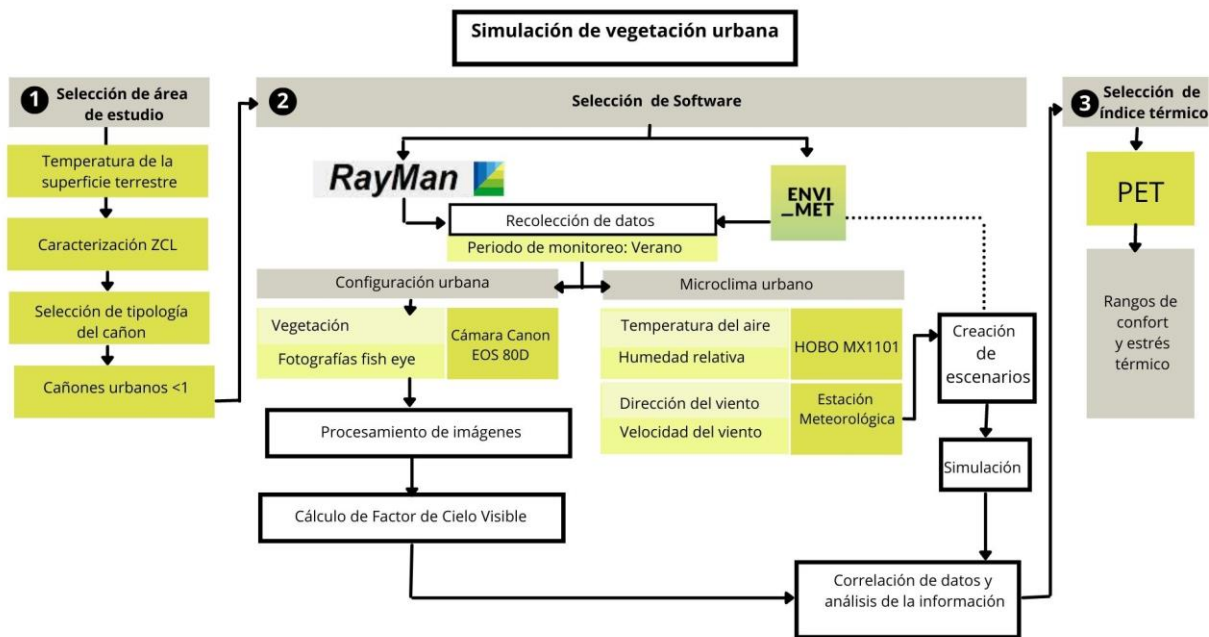
El diseño del experimento hace referencia a la secuencia de pasos que se realizan para lograr el objetivo principal de una investigación. Para este estudio se requirió primeramente realizar una campaña de monitoreo para recabar los datos *in*

situ con ayuda de distintos dispositivos, estos datos fueron utilizados posteriormente como datos de entrada para realizar simulaciones de tipo numérico.

Por lo que el experimento es de tipo mixto debido a la fusión del trabajo de campo y el trabajo de modelado y simulación con apoyo de herramientas tecnológicas. El alcance de la investigación fue de tipo correlacional, debido a que este tipo de estudios relacionan dos a más variables en un contexto particular, por lo que son utilizados para conocer el comportamiento de las variables relacionadas con el estudio, debido a que evalúan con exactitud el grado de vinculación (Hernández, 2014). En la Figura 13 se pueden apreciar los pasos principales para llevar a cabo el experimento.

Figura 13

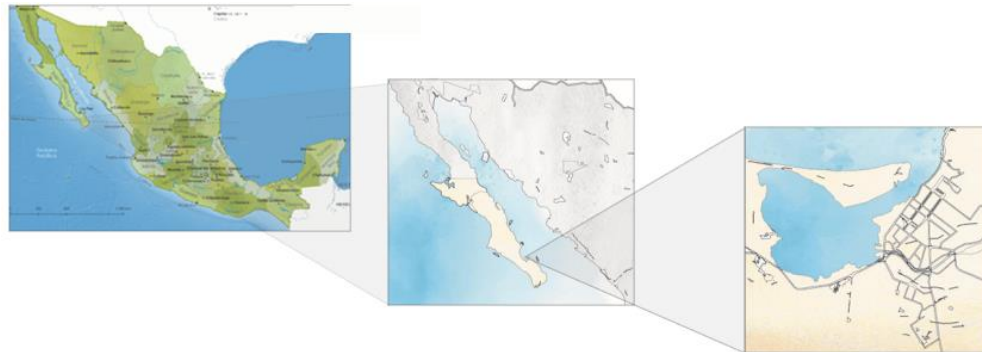
Diagrama de la metodología.



3.2.1. Área de estudio

El experimento se llevó a cabo en la ciudad de La Paz, que es la capital del Estado de Baja California Sur, y su emplazamiento nacional lo sitúa al noroeste del país (ver Figura 14), respecto a su ubicación las coordenadas geográficas de la ciudad de La Paz son: 24° 08' 32" latitud norte, 110° 18' 39" longitud oeste, y está situada a 27 msnm.

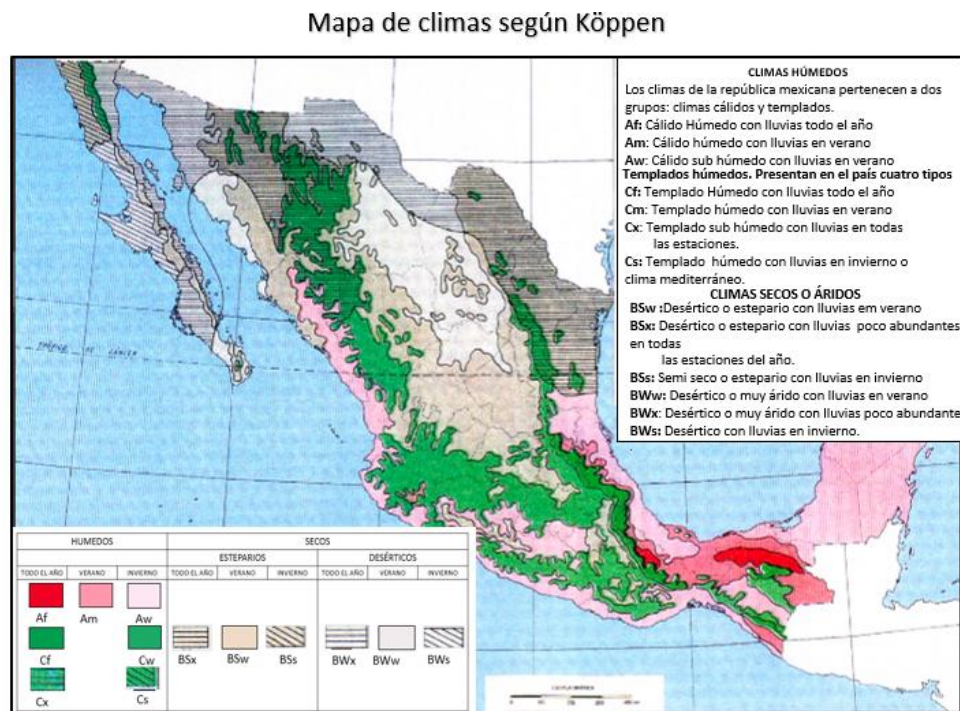
Figura 14
Ubicación del sitio de estudio.



Nota: Figura elaborada a partir de cartografía de “El nuevo orden mundial” por (Merino, 2020) El mapa político de México.

De acuerdo a la adaptación climática de la versión de Köppen para territorio mexicano, elaborada por García, (2004), se determina que el clima de la ciudad de La Paz es de tipo árido- seco, en la Figura 15, se puede apreciar el sistema de clasificación climática adaptado por García para territorio mexicano.

Figura 15
Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen.

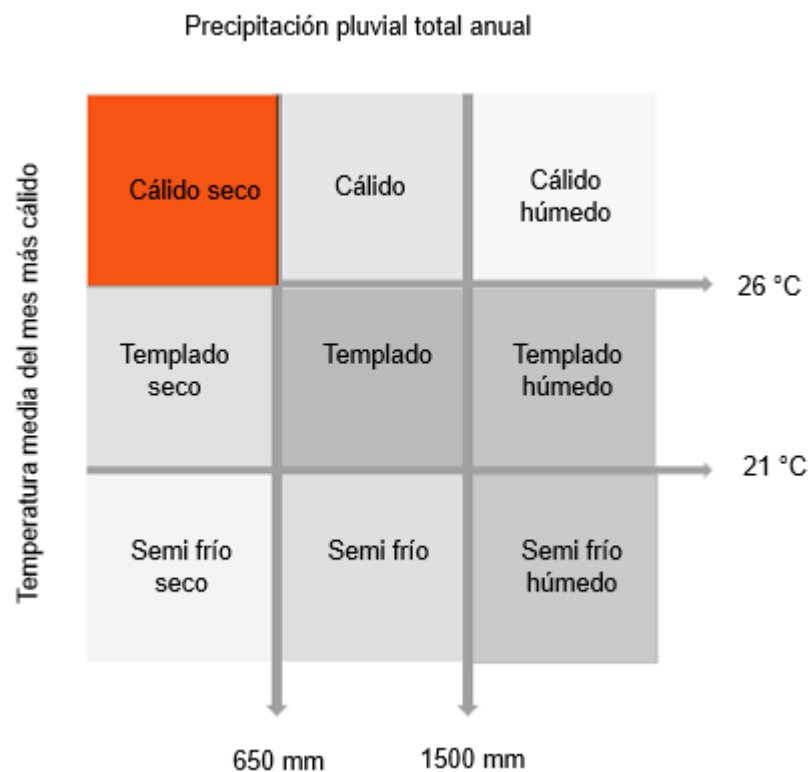


Nota: Extraído de “ Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen “ por García, (2004), Instituto de Geografía Universidad Nacional Autónoma de México.

Por otra parte, para determinar el grupo bioclimático al que pertenece la ciudad de La Paz, se obtuvo la temperatura media del mes más caluroso, así como los valores de la precipitación total anual del sitio, identificándose que la ciudad presenta un bioclima que cálido – seco (Figura 16) debido a que la temperatura media del mes más cálido (agosto) es de 30.7° C, valores que superan la temperatura de 26 °C y que determina que el bioclima es cálido. En cuanto a la precipitación pluvial anual del área de estudio es de 216.8 mm, lo que no excede de los 650 mm anuales, por lo que lo que sitúa al área de estudio en una agrupación de bioclimas secos, en tanto como clasificación bioclimática final, el área de estudio es catalogado con un bioclima cálido seco.

Figura 16

Sistema de agrupación bioclimática local.



Nota: Extraído de “Sistema de agrupación bioclimática local” por Fuentes y Figueroa, (1990).

3.2.2. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental toma un papel muy relevante debido a que en este proceso se recolecta la información y sin él no pueden existir resultados (Hernández, 2014). Como parte del procedimiento experimental de esta investigación se describe en los siguientes apartados la metodología que se utilizó para la recolección de datos.

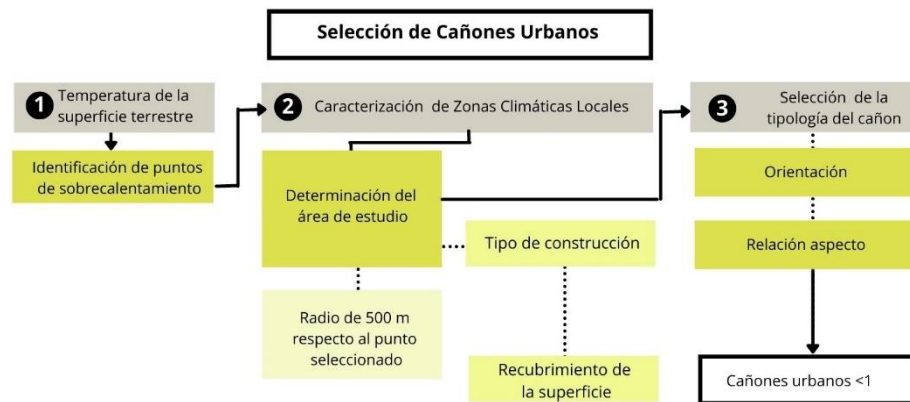
3.2.2.1. Criterios de selección del área de estudio

Las consideraciones para llevar a cabo la selección del área de estudio de los cañones urbanos se basaron en tres puntos fundamentales (Figura 17), los cuales consistieron en:

- Identificación de puntos de sobrecalentamiento urbano en la ciudad.
- Determinación de las Zonas Climáticas Locales
- Selección de cañón con base a la orientación, y relación aspecto.

Figura 17

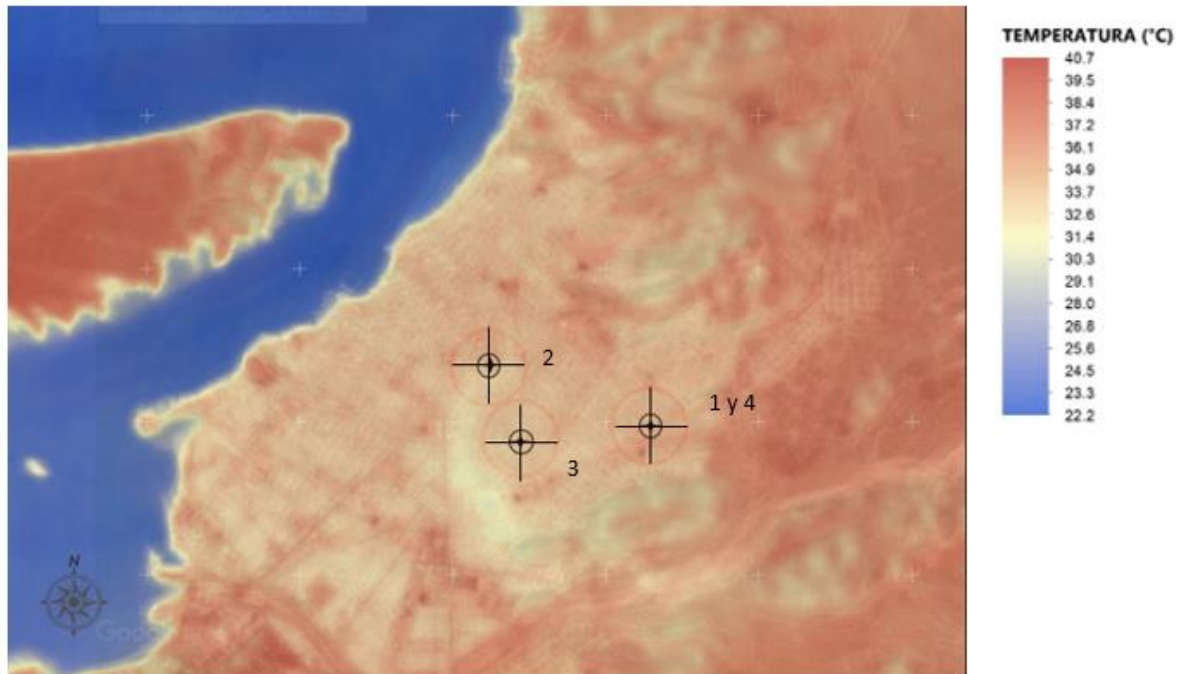
Criterios para la selección de cañones urbanos.



- Identificación de puntos de sobrecalentamiento urbano en la ciudad.

Respecto al primer paso, se utilizaron imágenes térmicas, con ayuda de la banda satelital Landsat 8 (conocidas también como imágenes LST, que permiten obtener datos de la temperatura superficial terrestre), ya que Landsat 8 es un satélite de observación de la tierra que opera con luz infrarroja de onda corta e infrarrojo térmico de onda larga, lo que permite dar seguimiento a la cubierta terrestre y recoger el mayor número posible de espectros para obtener imágenes multiespectrales basados en la cartografía de la temperatura de la superficie del suelo (Observing System, 2021), esta característica de la banda satelital Landsat 8 permitió ubicar los puntos de la ciudad donde se observa mayor sobrecalentamiento urbano (ver Figura 18). La imagen obtenida corresponde al 03 de agosto de 2020, y en ella se observan las áreas con concentración de sobrecalentamiento superficial en el centro poblacional de la ciudad.

Figura 18
Puntos de monitoreo.



Nota: Imagen obtenida del satélite Landsat 8, con fecha 03 de agosto de 2020.

b) Determinación de las Zonas Climáticas Locales

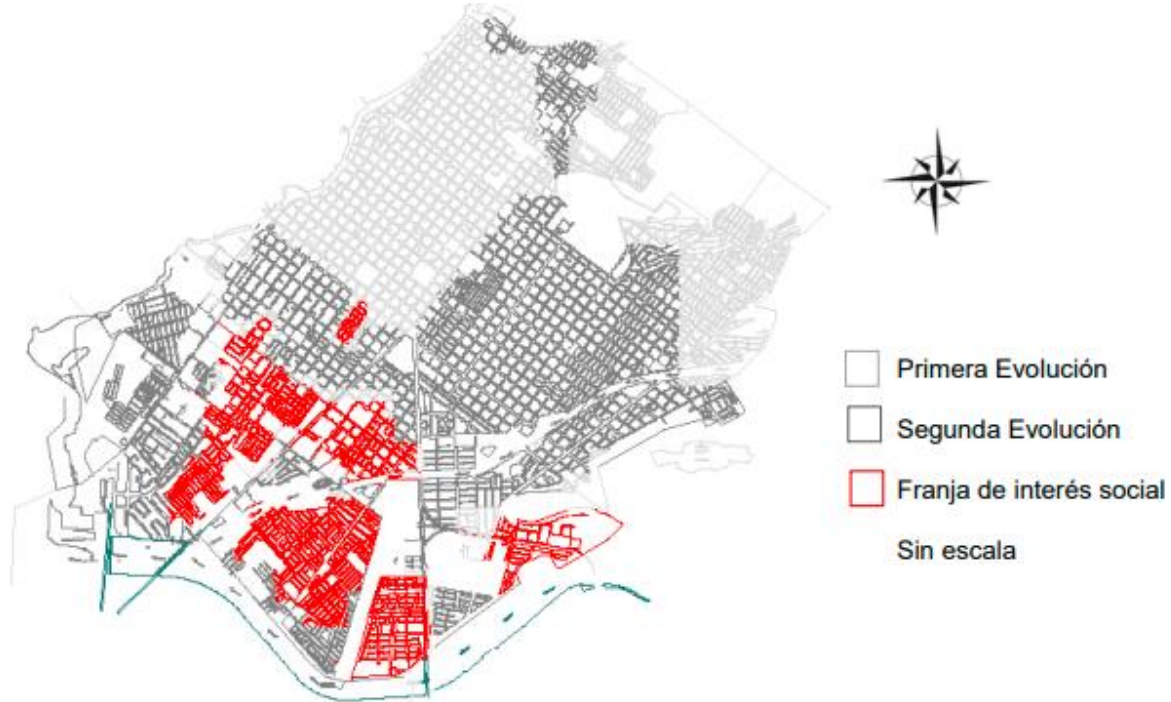
Para determinar las características de las LCZ de la ciudad de La Paz, este estudio únicamente consideró las áreas que presentaban mayor temperatura superficial en el mes de agosto. Como se mencionó en la sección 2.4, de este documento las LCZ pueden combinarse en 17 tipologías de caracterización distintas, en las que se considera un radio entre 200 y 500 m para su análisis.

De acuerdo al análisis de las LCZ el centro poblacional de la ciudad en su primera y segunda evolución (ver Figura 19) se caracteriza por calles y plazas ortogonales, siendo la llanura la principal característica de la ciudad (Lizárraga, 2013). Además, predominan:

- Edificaciones de poca altura.
- Predios amplios
- Pavimentación con asfalto
- Poca cobertura vegetal.

Figura 19

Clasificación de la mancha urbana, de la ciudad de La Paz.

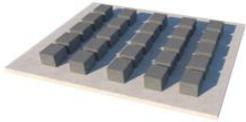


Nota: Obtenido de "La Configuración Urbana de la ciudad de La Paz, Baja California Sur desde la perspectiva de género" por (Lizárraga, 2013).1.

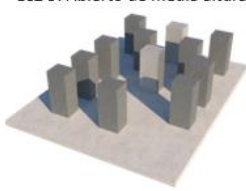
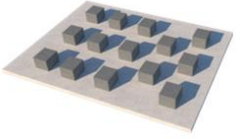
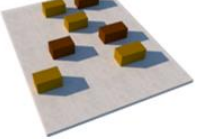
Algunas de las LCZ identificadas en la ciudad de La Paz, se observan en la Tabla 11. Sin embargo, la LCZ predominante en la ciudad son las zonas que corresponden a la zona climática 6E (abierto de poca altura con recubrimiento de la superficie de pavimento). Tomando como referencia lo anterior se identificaron dos zonas potenciales de estudio: colonia La Perla y colonia Los Olivos, las cuales se ubican en el centro poblacional de la ciudad.

Tabla 11

Principales LCZ en la ciudad de La Paz.

Clasificación	Imagen satelital	Imagen nivel de calle	Características
LCZ 3: Compacto de poca altura 			▪ Bajo nivel de tráfico vehicular ▪ Edificaciones de poca altura ▪ Viviendas individuales ▪ Vegetación urbana mesurada ▪ Predomina el asfalto como recubrimiento de la superficie

▪ Continúa en la siguiente página

Clasificación	Imagen satelital	Imagen nivel de calle	Características
LCZ 5: Abierto de media altura 			- Alto nivel de tráfico - Edificaciones gubernamentales y comerciales - Escasa vegetación urbana - Predomina el asfalto como recubrimiento de la superficie - Predomina el concreto en las banquetas
LCZ 6: Abierto de poca altura 			- Nivel de tráfico vehicular medio - Viviendas individuales - Edificaciones en uso de suelo mixto (vivienda y comercio) - Escasa vegetación urbana - Recubrimiento de la superficie mixto (asfalto y arena) - Recubrimiento mixto en banquetas (arena-asfalto)
LCZ 8: Gran edificio de poca altura 			- Nivel de tráfico vehicular medio. - Edificaciones en uso de suelo mixto (comercio y educación) - Escasa vegetación urbana - Predomina arena en banquetas

Nota: Elaborado con imágenes de Google Earth (s.f) [clasificación de zonas climáticas locales, en La Paz, Baja California Sur] Recuperado el 21 de abril de 2022 de Google Earth.

c) Selección del cañón con base a la orientación y relación aspecto.

Como se puede observar en la Figura 20 en la traza urbana de la ciudad de La Paz, predominan las orientaciones noroeste – sureste y noreste - suroeste. Por lo que para fines de este estudio se decidió abordar las dos orientaciones que rigen la traza urbana del centro poblacional de la ciudad.

Figura 20

Traza urbana del centro poblacional de La Paz y colonias seleccionadas.



Nota: Elaborado con imágenes de Google Earth (s.f) [descripción gráfica por zona climática local, en La Paz, Baja California Sur] Recuperado el 21 de abril de 2022 de Google Earth.

3.2.2.2. *Tipología de cañones urbanos*

Una vez concluida la clasificación de la LCZ, y la determinación de la orientación de la traza urbana, se prosiguió a la elección del cañón urbano, tomando como referente el apartado 2.5. configuración del cañón, de este documento. Por lo que se determinó que en el área de estudio la tipología, que predomina en las zonas seleccionadas, son los cañones de poca profundidad, con orientaciones noroeste - sureste y noreste - suroeste. No obstante, para fines de esta investigación se consideró dar lugar a subtipologías, las cuales se pueden observar en la Tabla 12.

Tabla 12

Tipologías y subtipologías de los cañones urbanos.

N° de Tipología	Tipología del cañón	Subtipología	Orientación
1	Cañón Uniforme (Relación aspecto = 1)	A	■ Noreste - Suroeste
		B	■ Este - Oeste
		C	■ Noreste - Suroeste
		D	■ Norte - Sur
2	Cañón Poco profundo (Relación aspecto <1)	A	■ Noreste - Suroeste
		B	■ Este - Oeste
		C	■ Noreste - Suroeste
		D	■ Norte - Sur
3	Cañón Profundo (Relación aspecto >2)	A	■ Noreste - Suroeste
		B	■ Este - Oeste
		C	■ Noreste - Suroeste
		D	■ Norte - Sur

Debido a las características de la traza urbana que rige a la ciudad de La Paz, así como la configuración espacial de los cañones urbanos, se identificó que predominan los cañones urbanos con relación aspecto >1 , por lo cual la clasificación para los cañones urbanos del área de estudio cuenta con subtipologías “2A” y “2C”, es decir que son cañones urbanos con relación aspecto >1 (poco profundos), y orientaciones noreste - suroeste y noreste - suroeste respectivamente.

Tomando en cuenta lo anterior se seleccionaron dos cañones urbanos. El primer cañón seleccionado (subtipología “2A”) se encuentra ubicado al centro de la ciudad, dentro de la colonia La Perla. Y fue seleccionado porque cumple con una menor variación en la altura de sus edificaciones, en comparación con otros cañones urbanos en la misma LCZ.

En cuanto la selección del segundo cañón, en este predominó la búsqueda de cañones con tipología “2C” (debido a que se buscó un cañón con orientación perpendicular al cañón anterior). Como en el caso anterior, este cañón también fue seleccionado debido a que fue el que presentó menor variación en la altura de sus edificaciones. Además, como puede apreciarse en la Figura 21, los cañones urbanos seleccionados cuentan con una distancia de 1 km entre ellos.

Figura 21
Ubicación de las LCZ.



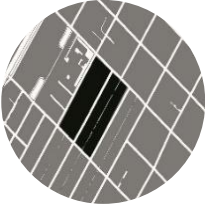
Nota: Elaborado con imágenes de Google (s.f) [ubicación de las zonas climáticas locales, seleccionadas, en La Paz, Baja California Sur] Recuperado el 21 de abril de 2022 de [Google Earth](#).

3.2.2.3. Volumetría y características de los cañones urbanos

La selección de cañones urbanos se llevó a cabo a partir de un muestreo no probabilístico debido a que la selección de la muestra no depende de la probabilidad sino que existe una justificación relacionada al estudio (Hernández, 2014), por lo que para este caso, la selección de la muestra fue determinada por las características térmicas que se presentaron en la ciudad, así como la clasificación de las LCZ, y las características espaciales de los cañones urbanos. Las cuales pueden ser apreciadas en la Tabla 13, en donde se observa la ubicación dentro de la trama urbana, el perfil del cañón y la relación aspecto que presenta cada uno de los cañones seleccionados. Mientras que en la Figura 22 se puede apreciar la ubicación espacial y la volumetría de los cañones (puntos 1 y 2).

Tabla 13

Ubicación de los puntos de monitoreo.

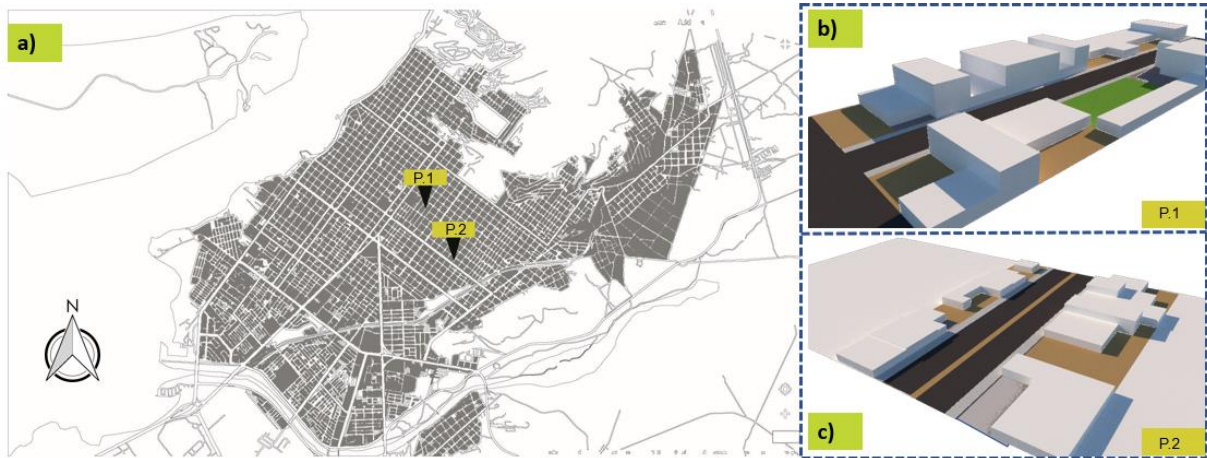
Campaña	Ubicación	Ubicación satelital	Perfil del cañón	Orientación	Relación aspecto
1				NE-SO	0.21
2				NO-SE	0.13

Nota: Elaborado con imágenes de Google maps (s.f) [cañones urbanos seleccionados para monitoreo, en La Paz, Baja California Sur] Recuperado el 13 de noviembre de 2021 de www.google.com.mx/maps/preview.

En el primer punto seleccionado para realizar la campaña de monitoreo el cañón urbano lleva por nombre Baja California, y se ubica entre las calles Ignacio Allende y Nicolas Bravo en la colonia La Perla, se distingue por poseer las siguientes características que se pueden apreciar en la Figura 23.

Figura 22

Ubicación de cañones urbanos seleccionados.

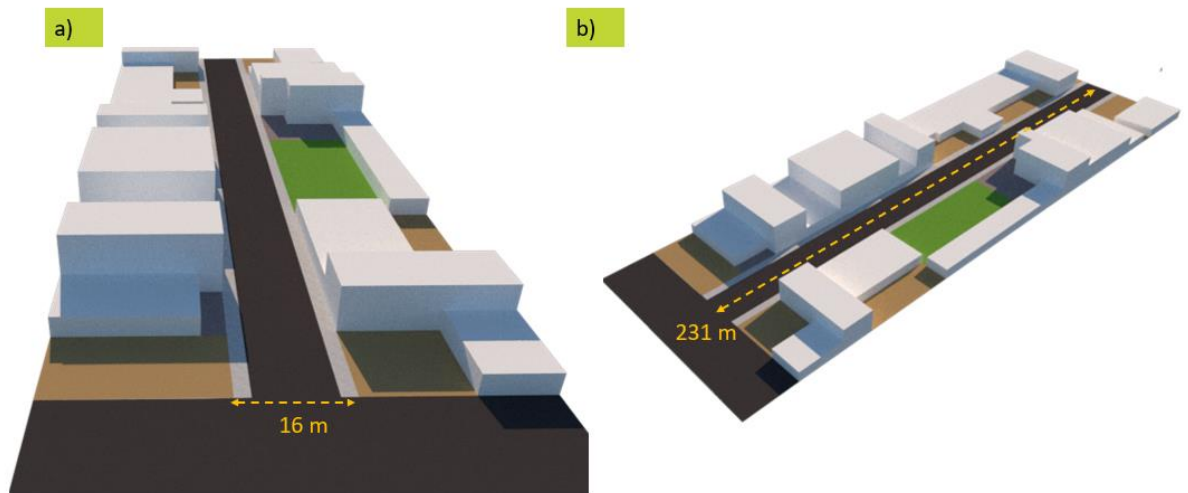


Nota: Cañones seleccionados. a) ubicación de los cañones en la mancha urbana de la ciudad, b) volumetría del primer cañón seleccionado, y c) volumetría del segundo cañón seleccionado.

Las características que destacan en este cañón son la tipología “2A” y relación aspecto de 0.21. Además, el ancho del cañón corresponde a 16 m, asimismo, en la volumetría del cañón predominan las edificaciones con poca altura.

Figura 23

Volumetría del primer cañón urbano seleccionado.



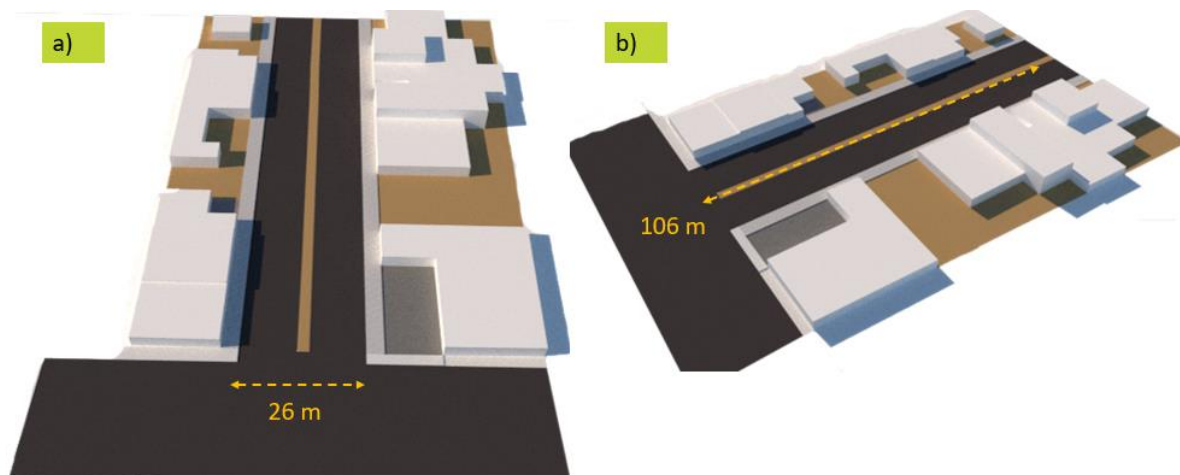
Nota: dimensión del primer cañón seleccionado. a) ancho del cañón y b) longitud del cañón.

El segundo cañón seleccionado para realizar la campaña de monitoreo, fue el cañón urbano llamado General Márquez de León el cual se ubica entre las calles Lic. Adolfo López Mateos y Venustiano Carranza en la colonia Los Olivos. Este cañón se

distingue por presentar las siguientes características: tipología "2C", y una H/W de 0.13. En la Figura 24 se muestran la volumetría y dimensiones del cañón.

Figura 24

Volumetría del segundo cañón urbano seleccionado.



Nota: Dimensiones del segundo cañón seleccionado. a) ancho del cañón y b) longitud del cañón.

Por otra parte se realizó un levantamiento de los cañones seleccionados con la finalidad de realizar una caracterización de la LCZ, en la Tabla 14 se puede apreciar la caracterización de las dos zonas de estudio, en la primera zona predomina el porcentaje de edificación con el 38.06% respecto al área total, seguido del recubrimiento con asfalto que representa el 14% del área total. Mientras que en la zona 2, el porcentaje con mayor ponderación es el recubrimiento de la superficie con arena.

Tabla 14

Caracterización de las zonas de estudio.

	Campaña de monitoreo	Camino de asfalto	Banqueta de concreto	Área de edificación	Recubrimiento de arena	Área total	Fachada
Superficie (m ²)	1	2,468.63	878.98	6682.43	-	17,554.9	1,397.34
Porcentaje (%)		14.0%	5.0%	38.06%		100%	-
Superficie (m ²)	2	1,974.4	391.7	3,237.5	4,295.7	9,899.1	583.7
Porcentaje (%)		19.9%	3.9%	32.7%	43.3%	100%	-

Por otro lado, llevando a cabo el levantamiento de las zonas. Se observó una diversidad de especies similares entre ambos cañones, sin embargo, las especies que predominan en estos cañones se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15

Vegetación predominante en áreas de estudio.

Espece	Tipo de hoja	Altura promedio	Riego	Diámetro de la corona	Densidad del follaje	
 a)	<i>Ficus benjamina</i>	perenne	3 m	Dos veces por semana	2 m	alta
 b)	<i>Ficus malacocarpa</i>	perenne	6 m	Dos veces por semana	6 m	alta
 c)	<i>Washingtonia robusta</i>	perenne	4 m	de 7 a 15 días	2 m	media-
 d)	<i>Azadirachta indica</i>	perenne	3 m	de 15 a 30 días	2 m	alta

Nota: Obtenido de "Paleta vegetal" por Narvarez, (2018), Sociedad de Historia Natural Niparáj A.C, 17 (2018). Y Catálogo virtual de flora del valle de Aburrá por Universidad EIA, (n.d.)

3.2.2.4. Periodo y tiempo de monitoreo

En cuanto a las mediciones de las múltiples variables, estas se llevaron a cabo durante el periodo de verano; la recolección de datos se realizó en el mes de agosto que es cuando se presentan las temperaturas más elevadas, y se hace presente la canícula. Esta recolección fue dividida en 2 campañas de monitoreo durante los días del 1 al 8 de agosto, como se puede apreciar en la Tabla 16, donde se especifica que el monitoreo de los datos se realizó durante 24 h, por tres días en cada punto seleccionado, sin embargo, la configuración para la recolección de datos varía según el dispositivo empleado.

3.2.2.5. Herramientas para monitoreo

La colecta de datos se llevó a cabo con una estación meteorológica, para medir las variables de dirección y velocidad del viento; mientras que para las variables de temperatura y HR se utilizaron sensores de temperatura y humedad. Por otra parte, otros dispositivos como el uso de cámara con lente tipo ojo de pez, y la cámara térmica también fueron empleados durante el monitoreo con fines de recolectar información referente a la Tmrt y al SVF.

Tabla 16
Herramientas y dispositivos para realizar mediciones.

Herramienta	Imagen	Horario de Monitoreo
Estación meteorológica AcuRite Rango de 0.6 a 40 m/s		24 h con intervalos cada 10 seg
Hobo Onset U12 precisión de ± 0.3 °C		24 h con intervalos cada 10 min
Hobo 1101 MX precisión de ± 0.3 °C		24 h con intervalos cada 10 min
Cámara Canon 80D, lente EF-S 18-135mm IS USM con lente lente canon ef 8-15mm f/4l fisheye usm		Cada 24 h
Cámara térmica Flir		Cada 24 h

3.2.2.6. Precisión de los instrumentos

Los dispositivos son pieza clave para el desarrollo experimental de la investigación, por lo que en la Tabla 17, se puede apreciar la precisión de los distintos dispositivos utilizados en la campaña de monitoreo. Sin embargo, también se recurrió al uso de cámaras, como lo fue la Cámara Canon 80D para determinar el SVF. Y la cámara termográfica infrarroja Flir C5 la cual fue utilizada para conocer las temperaturas y absortividad en los cañones urbanos seleccionados.

Tabla 17
Precisión de los dispositivos.

Equipo	Variables meteorológicas	Rangos de medición	Precisión del equipo	Altura de colocación
Estación meteorológica AcuRite Atlas	▪ Temperatura	▪ -40°C a 70°C	+/- 1°F	▪ 5 m
	▪ HR		+/- 2%RH	
	▪ Velocidad y dirección del viento	▪ 0 a 257 km/h	+/- 1 mph <10 mph	
HOBO Onset U12	▪ Temperatura	▪ 0°C a 50°C	+/- 0.35°C	▪ 1.8 m
	▪ HR	▪ 10% a 90%	+/- 2.5%HR	▪
HOBO 1101 MX	▪ Temperatura	▪ 0°C a 50°C	+/- 0.2°C	▪ 1.8 m
	▪ HR	▪ 20% a 80%	-	

3.2.2.7. Monitoreo y recolección de datos.

El trabajo en campo tuvo como propósito evaluar las condiciones climáticas de la temporada de verano, que es cuando en la ciudad de La Paz, se presentan las condiciones de incremento de temperaturas. Considerando las condiciones higrotérmicas manifestadas en un año típico, se determinó realizar el estudio en el mes de agosto ya que en este mes se alcanzan temperaturas que superan los límites del rango de la Zona de Confort (ZC). En la Tabla 18, se aprecia que las Tmax y la Tmax ext, están fuera del rango de ZC, lo que ocasiona una manifestación de sobrecalentamiento en la mayor parte del día.

Tabla 18
Temperaturas de la ciudad de La Paz

variable climatología	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct
T max	28.1	31.3	34.3	36.5	37.3	37.0	35.3	33.1
T max ext (diaria)	38.2	41.0	41.0	43.0	42.6	42.5	41.0	40.0
T Media (promedio)	20.1	22.7	25.2	27.7	30.2	30.7	29.6	26.5
T min (promedio)	12.1	14.2	16.0	18.9	23.0	24.4	23.8	19.9
T min ext (promedio)	4.0	5.0	8.5	10.0	15.4	16.0	16.5	10.0
T neutra	23.83	24.63	25.41	26.18	26.96	27.11	26.77	25.81
Zona de confort superior	26.33	27.13	27.91	28.68	29.46	29.61	29.27	28.31
Zona de confort inferior	21.33	22.13	22.91	23.68	24.46	24.61	24.27	23.31

Nota: Elaborada a partir de Normales Climatológicas de la estación 00003074del periodo 1981 – 2010.

Una vez determinado el mes de monitoreo, y seleccionado los cañones, se colocaron los dispositivos instrumentales en distintos puntos de los cañones urbanos, eligiendo para esto el método aplicado por Shashua-Bar & Hoffman, (2000), el cual se caracteriza por recolectar datos de los cañones urbanos donde se considera un punto como referencia que no se afectado por sombra y vegetación a lo largo del muestreo el cual sirvió para hacer comparaciones entre las distintas tipologías de los cañones urbanos seleccionados.

La primera campaña de monitoreo se llevó a cabo del 1 al 4 de agosto de 2021 en la colonia La Perla, en donde se colocaron los sensores de humedad y temperatura a lo largo del cañón urbano, como se muestra en la Tabla 19, uno de estos dispositivos se colocó debajo del dosel de la vegetación (*Ficus malacocarpa*) y fue programado para recolectar información referente a la temperatura y HR cada 10 minutos. Mientras que los otros dos dispositivos fueron colocados en sitios donde no fueran obstruidos por la sombra, y fueron programados para capturar información cada 10 minutos.

Tabla 19.

Ubicación de dispositivos en la primera campaña de monitoreo.

a) Cañón urbano



b) Simbología

	Dispositivo	Características del sitio
●	▪ HOBO 1101 MX	▪ Sin vegetación
●	▪ HOBO Onset U12	▪ Sin vegetación
●	▪ HOBO 1101 MX	▪ Con vegetación (<i>Ficus malacocarpa</i>)

Nota: ubicación de sensores de humedad y temperatura. a) vista en planta de la ubicación del equipo y b) descripción del equipo y puntos de monitoreo.

La segunda campaña de monitoreo se llevó a cabo del 5 al 8 de agosto de 2021 en la colonia Los Olivos. En la Tabla 20 se puede observar que se colocaron tres sensores de temperatura y humedad, los cuales fueron programados para recolectar información cada 10 minutos.

Tabla 20

Ubicación de dispositivos en la segunda campaña de monitoreo

a) Cañón urbano	b) Simbología		
		Dispositivo	Características del sitio
		▪ HOBO 1101 MX	▪ Con vegetación (<i>Moringa oleífera</i>)
		▪ HOBO U12	▪ Sin vegetación
		▪ HOBO 1101 MX	▪ Con vegetación (<i>Ficus Benjamina</i>)

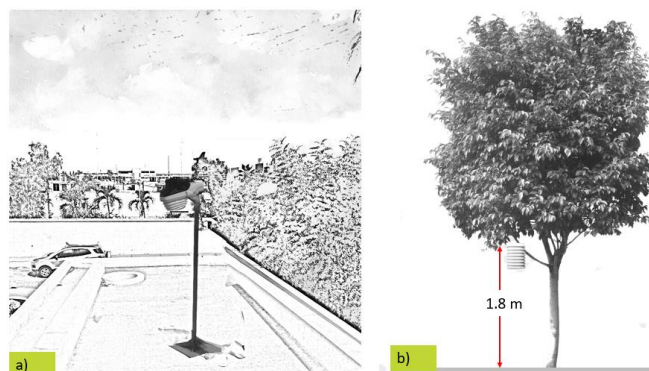
Nota: ubicación de sensores de humedad y temperatura. a) vista en planta de la ubicación del equipo. b) descripción del equipo y puntos de monitoreo.

3.2.2.8. Precisiones metodológicas

En cuanto a las precisiones para llevar a cabo las campañas de monitoreo, las herramientas empleadas (estación meteorológica y sensores de humedad y temperatura) cumplen con los rangos de medición y precisión de instrumentos establecida en la ISO 7726. Ya que esta norma, especifica que para estudios tipo “C” (relacionados al confort) los que equipos para la medición de la temperatura del aire, debe tener un rango entre 10 °C – 40 °C. Mientras que para el parámetro de la velocidad del viento la norma precisa que el equipo debe contar con un rango de medición entre 0.05 m/s a 1 m/s (en la Figura 25 se aprecian imágenes ilustrativas de la colocación de los instrumentos).

Figura 25

Colocación de los instrumentos de monitoreo en el sitio de estudio.

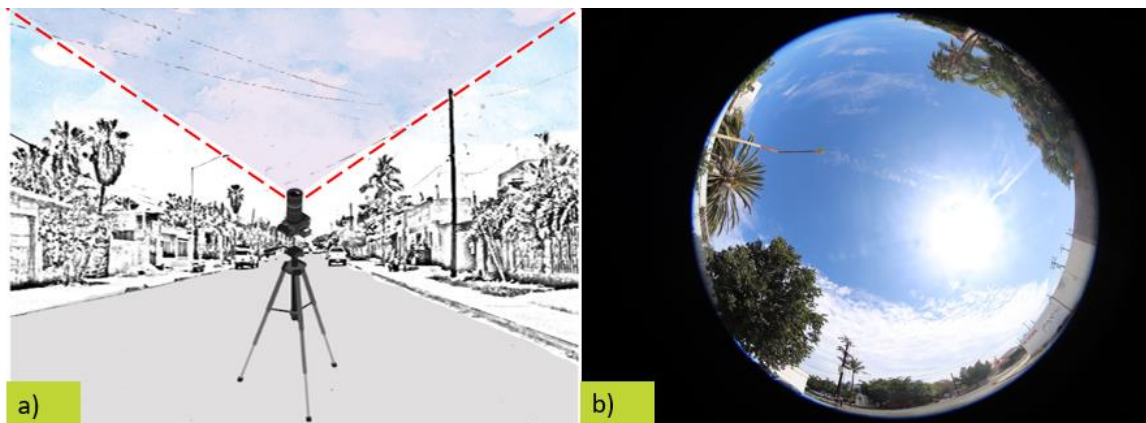


Nota: colocación de las herramientas de monitoreo. a) Estación meteorológica. b) sensores de humedad y temperatura colocados debajo del dosel del árbol.

En cuanto a la captura de fotografías, el equipo fue colocado al centro del cañón como puede observarse en la Figura 26, el proceso de captura de las imágenes tuvo a consideración la altura de 1.1 m respecto al suelo, tal y como se realizó en la metodología de Middel Ariane et al. (2017), en la que basan su proceso de acuerdo a lo establecido en la ISO 7726, así como también se consideraron las recomendaciones expuestas en el manual de RayMan Pro (Matzarakis, 2018), en donde se establece que las imágenes capturadas deben considerar el norte en la parte superior de la imagen y la parte derecha de la imagen debe estar apuntando hacia el este.

Figura 26

Colocación de equipo para captura de imágenes.



Nota: proceso de captura de imágenes. a) colocación del equipo al centro del cañón urbano y b) imagen capturada por el lente tipo ojo de pez.

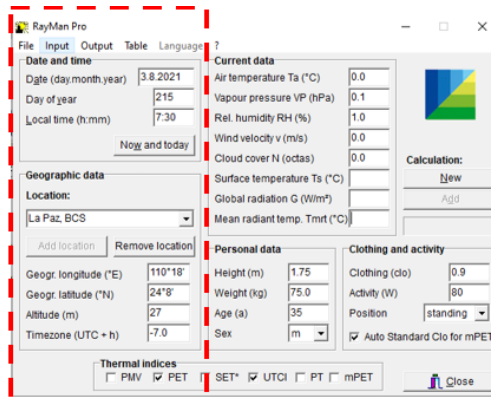
3.2.2.9. Cálculo del Factor de Cielo Visible con Rayman

Rayman, es un modelo a microescala desarrollado por Albert Ludwig, para calcular los flujos de radiación en distintos entornos (Matzarakis et al. 2006, 2009) el cual fue requerido para calcular el SVF a partir de las imágenes tomadas en sitio con la cámara fotográfica y el lente ojo de pez. Para llevar a cabo el cálculo del SVF, a través del programa Rayman, fue necesario preparar las fotografías tomadas en los cañones urbanos. Debido a que para trabar en el programa es necesario que estas imágenes tengan fondo negro, que su aspecto sea cuadrado, se encuentren guardadas en formato bitmaps (.bmp), y estén orientadas al norte, es decir en la

fotografía se debe observar el norte en la parte superior. Por lo que se recurrió al uso de *Adobe Illustrator* para procesar las fotografías capturadas in situ. Posteriormente una vez en el programa, como primer paso se debe editar la primera columna de la ventana principal del programa, como se muestra en la Figura 27, ingresando los datos de la fotografía (fecha, día del año y hora local) así como la ubicación donde fue capturada (latitud, longitud, elevación y zona horaria). Para continuar en la segunda ventana donde la imagen es procesada.

Figura 27

Datos de entrada de Rayman.



The screenshot shows the RayMan Pro software interface with the following sections:

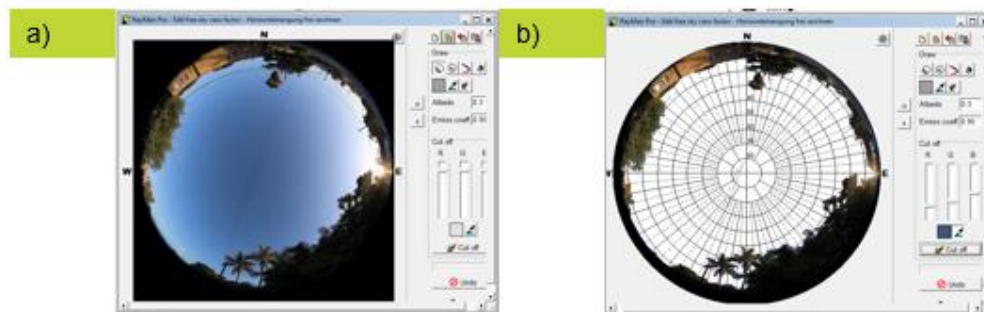
- Date and time:** Date (day/month/year) 3.8.2021, Day of year 215, Local time (h:mm) 7:30. Buttons: Now and today.
- Geographic data:** Location: La Paz, BCS. Buttons: Add location, Remove location. Fields: Geogr. longitude (°E) 110°18', Geogr. latitude (°N) 24°8', Altitude (m) 27, Timezone (UTC + h) -7.0.
- Current data:** Air temperature Ta (°C) 0.0, Vapour pressure VP (hPa) 0.1, Rel. humidity RH (%) 1.0, Wind velocity v (m/s) 0.0, Cloud cover N (octas) 0.0, Surface temperature Ts (°C), Global radiation G (W/m²), Mean radiant temp. Tmrt (°C).
- Personal data:** Height (m) 1.75, Weight (kg) 75.0, Age (a) 35, Sex m.
- Clothing and activity:** Clothing (clo) 0.9, Activity (W) 80, Position standing, Auto Standard Clo for mPET checked.
- Thermal indices:** PMV, PET, SET*, UTCI, PT, mPET.

Nota: Imagen elaborada a partir de la interfaz del programa Rayman Pro.

El procesamiento de la imagen, previo al cálculo del SVF, consistió en retirar de la imagen base, el fondo azul del cielo, con ayuda de las herramientas incluidas en el programa como se puede observar en la Figura 28, una vez limpia la imagen el programa calcula el SVF, y muestra los datos calculados (Figura 29).

Figura 28

Procesamiento de imágenes en Rayman.

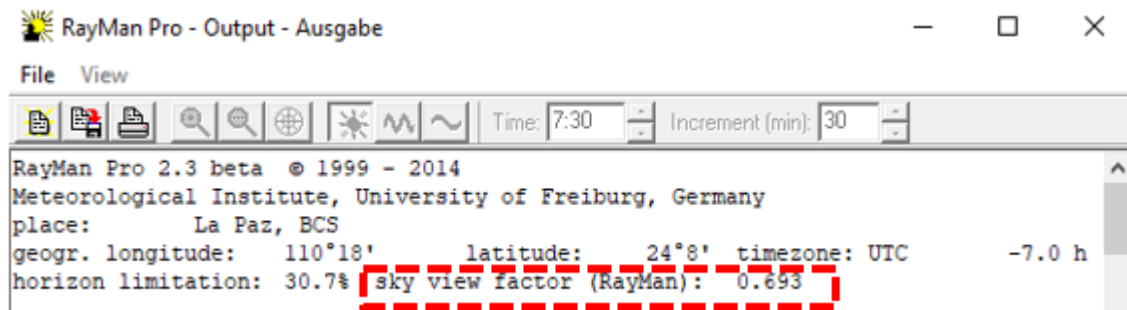


Nota: Imagen elaborada a partir de la interfaz del programa Rayman Pro. A) primer paso del proceso previo al cálculo, introducción de la imagen al programa. B) imagen procesada en donde se elimina el cielo y solo quedan los elementos que obstruyen el cielo.

El SVF se determina por medio de una distinción entre el área cubierta por obstáculos y el área que queda despejada, por lo que se hace una distinción de píxeles entre blanco y negro que a su vez realiza un factor de ponderación el cual ajusta el impacto del píxel al ángulo del Zenit (Matzarakis, 2018).

Figura 29

Ventanilla de resultados.



Nota: imagen elaborada a partir de la ventanilla de resultados del programa Rayman Pro.

3.2.2.10. ENVI-met

Se utilizó el programa de ENVI-met, el cual es un modelo que se basa en la dinámica de fluidos para modelar la interacción entre vegetación, atmósfera y superficie, con elementos construidos de diferente forma y altura. El cual es alimentado con datos de entrada como: temperatura del aire, velocidad del viento, y HR (los cuales fueron tomados in situ).

Tomando como referencia el diagrama del funcionamiento de ENVI-met mencionado anteriormente en el apartado 2.7.5 de este documento se describe a continuación el trabajo realizado en cada uno de los módulos:

a) Spaces

En este módulo es donde se lleva a cabo la elaboración de los modelos, a partir de datos de entrada como la configuración espacial del modelo. En la Tabla 21 se puede observar los datos requeridos para la configuración, los cuales son necesarios para llevar cabo la simulación.

Tabla 21

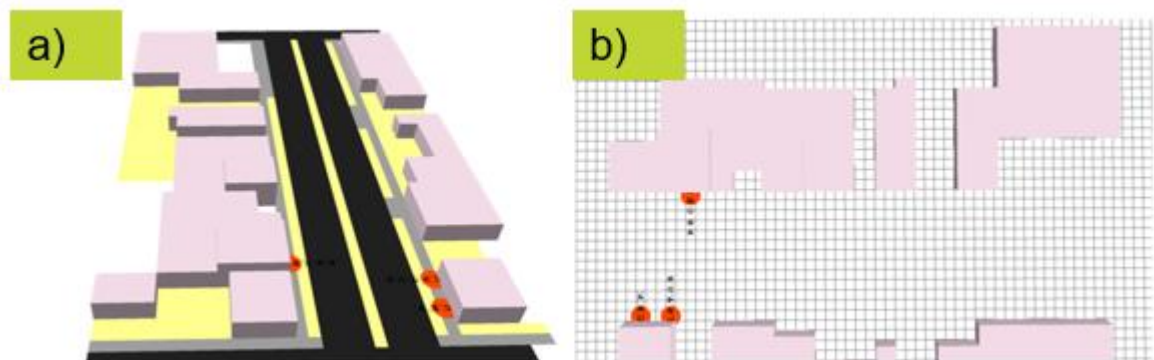
Datos de entrada del módulo Spaces (ENVI-met).

Datos espaciales (ENVI-met Spaces)	
Área de la retícula (x, y, z)	▪ 60 x 120x 30
Tamaño de las celdas de la cuadrícula (m)	▪ 2 x 2 x 2
Latitud y longitud	▪ 24° 08' 32", 110° 18' 39°
Cuadrícula de anidación	▪ 2
Método de la generación de cuadrícula vertical	▪ equidistante
Zona horaria de referencia	▪ GMT-7
Material de la vialidad	▪ AS- asfalto
Banquetas	▪ PD- pavimento de concreto oscuro
Recubrimiento en banquetas	▪ SD- suelo arenoso
Suelo interno de las edificaciones	▪ PL- pavimento de concreto ligero
Muros	▪ C3- concreto/ block hueco
Losa	▪ Cs- Losa de concreto

Por otra parte, cabe mencionar que la información recolectada en las campañas de monitoreo referente a la configuración espacial, aportaron información para realizar los modelos del caso base, es decir las condiciones actuales del sitio. Información que posteriormente sirvió para someter el modelo a validación. Como se aprecia en la Figura 30 dentro del modelo realizado en el módulo de Spaces se pueden identificar con puntos rojos los sitios donde fueron colocados los sensores de temperatura y humedad (HOBOS) en el cañón.

Figura 30

Modelos de cañón urbano.



Nota: imagen elaborada a partir de los modelos realizados en el módulo de spaces, del programa ENVI-met. A) perspectiva del modelo y colocación de los receptores. B) plana del modelo, y ubicación de los receptores.

a) Albero

En este módulo se lleva a cabo la selección y modificación de vegetación de acuerdo con las características físicas de la misma. Considerando: LAD, forma del follaje, y largo del tronco, en la Tabla 22 se puede apreciar a detalle las características seleccionadas de acuerdo con la vegetación más predominante en el sitio.

Tabla 22

Características de la selección de vegetación.

Vegetación (ENVI-met Albero)	
<i>Ficus Benjamina</i>	▪ LAD alta/ follaje tipo esférico/ tronco corto/
<i>Ficus malacocarpa</i>	▪ LAD alta/ follaje tipo corazón/tronco medio
<i>Azadirachta indica</i>	▪ LAD alta/ follaje tipo esférico/ tronco corto/
<i>Washingtonia robusta</i>	▪ Palmera/ LAD media/ tronco medio/

b) ENVI-guide

El módulo de ENVI-guide recolecta la información del día de monitoreo seleccionado, como se muestra en la Tabla 23, uno de los datos solicitados en este módulo es: fecha, hora de inicio, duración de la simulación y datos de temperatura y humedad. En este caso específico se recurrió al uso de “*Full Forcing*” el cual tiene la finalidad de forzar alguno de los datos meteorológicos que no fueron considerados en el momento de la campaña de monitoreo, es decir se realiza un cálculo con apoyo de algoritmos de alguna variable en específico. Una vez concluidos los datos solicitados se generó un nuevo archivo tipo. SIMX el cual fue necesario para llevar a cabo la simulación.

Tabla 23

Parámetros de entrada ENVI-guide.

Parámetros de entrada (ENVI-guide)	
Fecha:	▪ 07-ago-2021
Hora de inicio	▪ 00:00 h
Duración de la simulación	▪ 24:00 h
Temperatura y Humedad	▪ <i>Full Forcing</i>

c) *Forcing Manager*

En este módulo se genera un archivo. FOX, (archivo *full forcing*) el cual es un archivo generado a partir de información recolectada in situ, que posteriormente es procesada e importada en un archivo tipo .csv en donde es ordenada la información a

cada 30 min. En tanto el apartado de *Forcing Manager* tiene la finalidad de complementar el módulo de ENVI-guide para la generación del archivo. SIMX.

d) ENVI-core

La simulación es la parte principal de este módulo la cual inicia con apoyo del archivo. SIMX, generado anteriormente en el módulo de ENVI-guide, el cual contiene la información espacial del modelo y las condiciones meteorológicas, y es sometido a una revisión, con la finalidad de detectar algún error. Una vez finalizada esta revisión se procede a dar inicio a la simulación, la cual tiene una duración que varía de acuerdo a los datos ingresados.

e) Biomet

Este módulo se caracteriza por ser pieza clave en la interpretación, es decir en este módulo se selecciona el indicador térmico que se desea mostrar en los resultados gráficos. Que para fines de esta investigación se optó por el índice térmico PET.

Cabe mencionar que, para el caso de las simulaciones, el módulo de Biomet considera algunos parámetros fisiológicos, valores de nivel de arropamiento y el metabolismo de una persona. En la Tabla 24 se pueden apreciar los valores de estos parámetros.

Tabla 24
Parámetros para el uso de biomet.

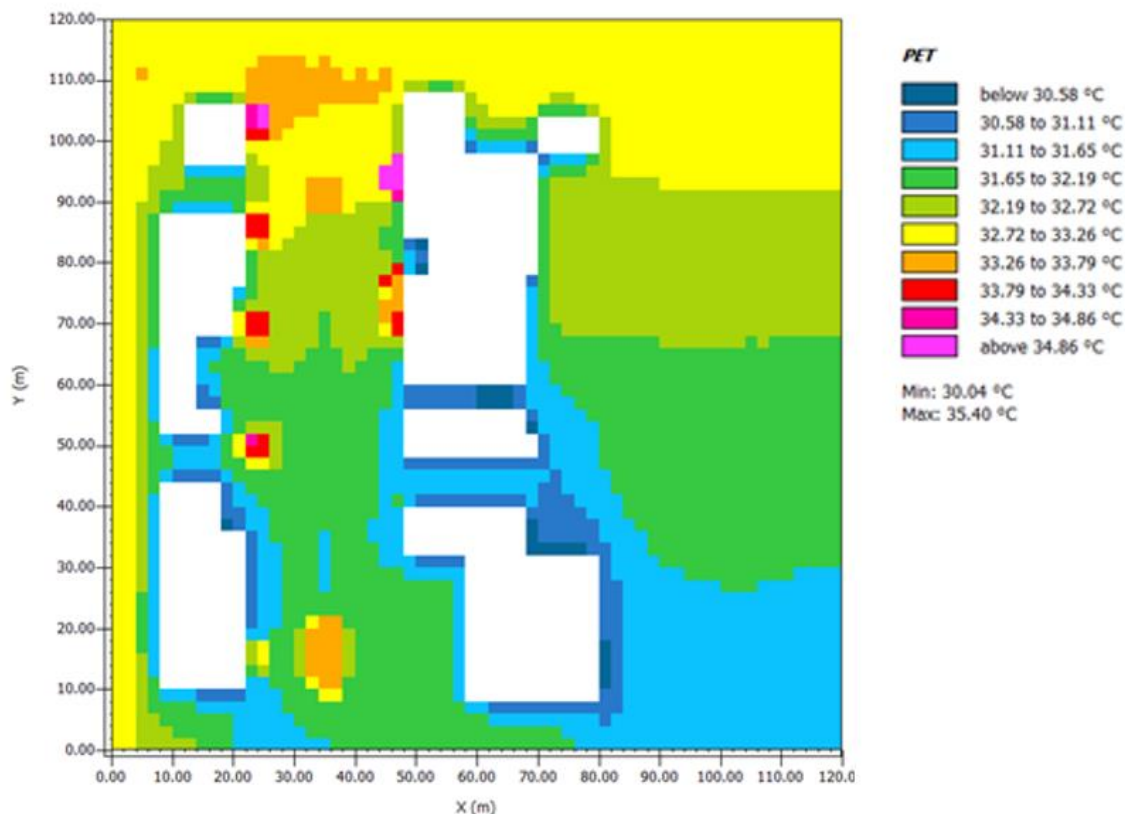
Parámetros fisiológicos	
Edad	▪ 35 años
Genero	▪ Masculino
Peso	▪ 75 kg
Estatura	▪ 1.75 m
Parámetros de la ropa	
Aislamiento de ropa estática	▪ 0.90 clo
Parámetros de metabolismo	
Velocidad de metabolismo	▪ 1.48 met

f) Leonardo

La parte gráfica del proceso realizado en ENVI.met se realiza en este apartado, que refleja por medio de sus imágenes la interpretación del índice térmico seleccionado, simulado en el modelo, en la Figura 31 se puede observar que a través de una escala colorimétrica se puede tener una interpretación de los rangos de PET.

Figura 31

Mapa de PET a las 12h, del día 07 de agosto de 2021.



3.2.2.11. Diseño de escenarios

Para llevar a cabo el diseño de escenarios se consideró para la información mencionada en el apartado 2.7.1.1 “simulación de escenarios”, de esta Tesis. Los modelos propuestos son expuestos en la Tabla 25, donde se refleja el uso del aumento de vegetación y H/W, así como la consideración de un escenario sin vegetación.

Tabla 25

Propuestas para el diseño de escenarios.

Descripción del Escenario	Nombre de escenario	Relación Aspecto (H/W)	Distancia entre árboles (m)	Aumento de vegetación (%)
Escenario Base (cañón poco profundo)	EB	<1	-	0
Escenario Sin Vegetación (cañón poco profundo)	E1	<1	-	0

Continúa en la página siguiente

Descripción del Escenario	Nombre de escenario	Relación Aspecto (H/W)	Distancia entre árboles (m)	Aumento de vegetación (%)
Escenario Aumento del Porcentaje de Vegetación (cañón poco profundo)	E2	<1	10 m	50%
Escenario con Aumento de Relación Aspecto y Porcentaje de Vegetación (cañón uniforme)	E3	=1	10 m	50%
Escenario con Aumento de Relación Aspecto (cañón uniforme)	E4	=1	-	0
Escenario con aumento de Relación Aspecto (cañón profundo)	E5	>1	-	0

3.2.2.12. Validación de datos y RMSE.

Para la validación de datos y determinar la raíz del error medio cuadrático (RMSE, por sus siglas en ingles) y el error absoluto medio (MAE, por sus siglas en inglés), fue necesario contrastar los valores recolectados en campo con los obtenidos de la simulación realizada en ENVI-met. La comparación se realizó con los datos de las 01- 23 h del día 07 de agosto de 2021 (ver apéndice A), para validar el modelo Ali & Abustan, (2014) sugieren el uso de las siguientes fórmulas para calcular el RMSE (ver Ecuación 2) y MAE (ver Ecuación 3) respectivamente.

Ecuación 2

Raíz del error cuadrático medio.

$$RMSE = \frac{\sqrt{1}}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2$$

Ecuación 3

Error absoluto medio.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} |P_i - O_i|$$

3.2.2.13. *Plan de evaluación de resultados*

Para llevar a cabo este punto, se decidió realizar la validación del cañón número dos, por tres razones principales, el número uno se debe a que, las condiciones presentadas en la fecha de monitoreo de este cañón se asemejan más a las presentadas en el día histórico del mes de agosto. Además de que la traza urbana de la LCZ donde se encuentra este cañón es similar a la traza urbana de la ciudad en general (ortogonal). Por último, es importante mencionar que este cañón urbano, es una vialidad con mayor frecuencia vial y peatonal en comparación con el cañón monitoreado en la primera campaña. Por lo que se optó por realizar el análisis correlacional de este cañón, tomando en consideración el escenario base (EB), del cañón urbano seleccionado para contrastarlo con los escenarios propuestos e identificar el escenario que presente la configuración espacial idónea para optimizar el PET.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se abordan los resultados obtenidos en los distintos escenarios de simulación propuestos, referentes a la Temperatura Fisiológica Equivalente y SVF, así como también los resultados referentes a las variables meteorológicas que intervinieron en las simulaciones

4.1. Validación del modelo

Teniendo presente las ecuaciones expuestas en el apartado 3.2.2.12 (validación de datos y RMSE) de esta tesis, se identificó que existe un $RMSE = 1.66^{\circ}C$, en cuanto a la variable de temperatura del aire monitoreada con los datos obtenidos de la simulación. En la Figura 32 se muestra la relación de la temperatura del aire monitoreada y la temperatura del aire simulada, además es posible determinar las temperaturas máximas, mínimas y medias de cada caso. Mientras que en la Figura 33 se refleja la regresión lineal del modelo.

Figura 32

Comparación de la Temperatura del aire.

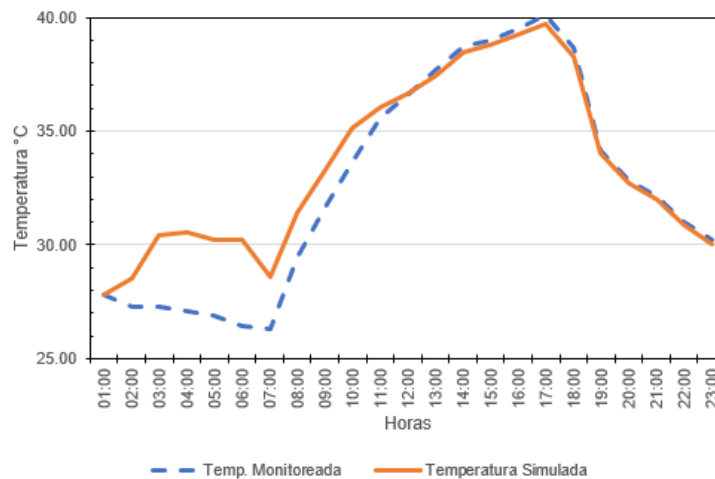
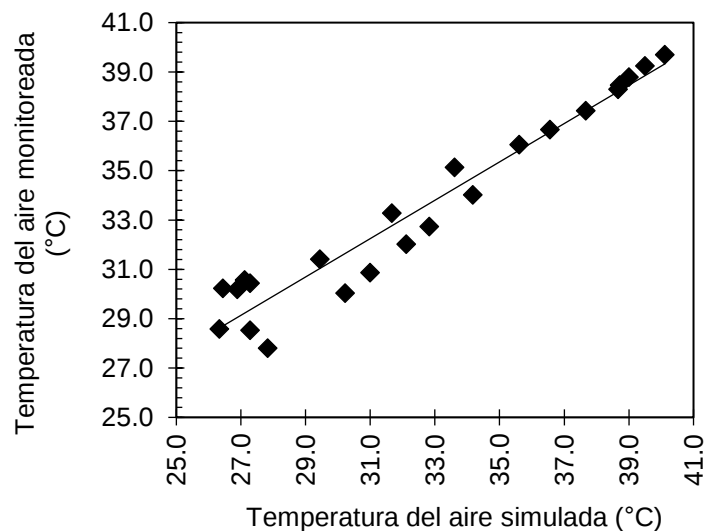


Figura 33

Correlación entre datos monitoreados y datos simulados.



4.2. Estadística descriptiva

Los resultados obtenidos de la campaña de monitoreo en cuanto a la temperatura del aire se concentran en la Tabla 26 en la que se condensan y resumen los datos obtenidos. Los valores mostraron que en todos los escenarios existe un incremento de la temperatura del aire que oscila entre 1.2-1.8 °C.

Asimismo, también es evidente que las temperaturas mínimas logran una reducción entre 0.1-0.4 °C menos que en las condiciones presentadas en el EB, en todos los escenarios a excepción del E2 donde la T min es 0.3 °C mayor que el EB. Sin embargo, en cuanto a las T_{máx}, existe una tendencia del incremento en todos los escenarios que oscila entre 0.3 -5.2 °C.

Tabla 26

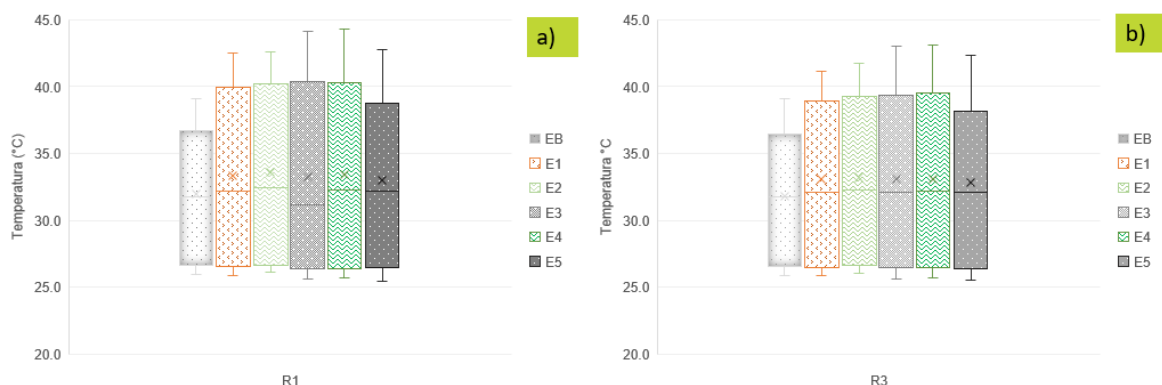
Concentrado de resultados de temperatura del aire.

Variable		R1 (Receptor ficus benjamina)						R3 (Receptor sin vegetación)					
		EB	E1	E2	E3	E4	E5	EB	E1	E2	E3	E4	E5
T air	Min	25.9	25.8	26.2	25.6	25.7	25.4	25.9	25.8	26.0	25.6	25.7	25.5
	Q1	26.9	26.9	27.0	26.5	26.6	26.7	26.8	26.8	26.9	26.7	26.8	26.7
	Media	31.9	33.3	33.6	33.2	33.4	33.0	31.8	33.1	33.2	33.1	33.1	32.8
	Mediana	31.8	32.2	32.5	31.2	32.3	32.2	31.8	32.1	32.3	32.1	32.1	32.1
	Q3	36.3	39.5	39.8	39.2	39.2	38.3	36.0	38.9	39.2	38.9	38.9	38.1
	Máx	39.1	42.5	42.6	44.2	44.3	42.8	39.1	41.2	41.8	43.0	43.1	42.4
	Desviación	4.8	6.0	6.1	6.7	6.5	6.1	4.7	5.8	5.9	6.2	6.2	5.8

Simbología: Valor base Se Reduce Aumenta Se mantiene

En términos de la temperatura del aire, los diagramas de caja (Figura 34) muestran que los receptores con vegetación (R1) y sin vegetación (R3), que el E5 es el escenario que presenta los valores de T_{máx} más bajos.

Figura 34
Boxplot temperatura del aire



Nota: Diagramas de caja. a) datos del receptor con vegetación b) datos del receptor sin vegetación.

En cuanto a la Tmrt en la Tabla 27, se puede apreciar que en todos los escenarios la Tmrt tiende a incrementarse entre 5.0 - 9.5 °C. Lo mismo ocurre en la Tmrt mínimas registradas en donde los valores oscilan entre 1.2-9.1 °C, a excepción del E2 y el E5 en los datos registrados en el R3, que muestran que la Tmrt reduce 0.6 °C en el E2, mientras que, en el E5, los valores se mantienen. Asimismo, en los valores que corresponden a la Tmrt máxima todos los escenarios presentan un aumento considerable en sus valores.

Tabla 27
Concentrado de resultados de Tmrt.

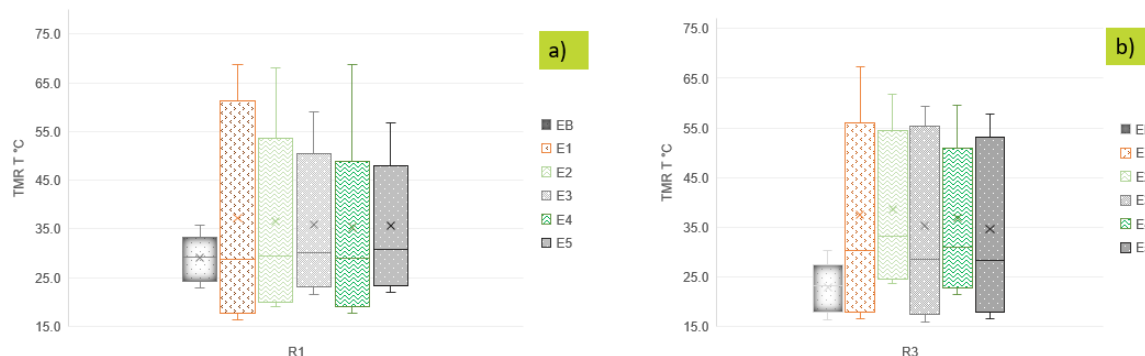
Variable		R1 (Receptor ficus benjamina)						R3 (Receptor sin vegetación)					
		EB	E1	E2	E3	E4	E5	EB	E1	E2	E3	E4	E5
Tmrt	Min	16.4	18.9	21.6	23.0	23.0	17.6	16.5	23.7	15.9	21.4	21.4	16.5
	Q1	24.3	18.0	20.1	23.1	19.2	23.4	17.9	17.8	24.6	17.7	22.8	18.0
	Media	29.1	37.2	36.5	35.9	35.3	35.6	23.0	37.5	38.6	35.3	36.8	34.6
	Mediana	29.1	29.4	29.4	30.1	29.1	29.0	23.2	33.2	33.2	28.6	31.1	28.3
	Q3	32.7	61.0	50.6	47.5	47.5	47.3	26.8	54.6	52.5	50.9	50.9	52.0
	Máx	35.8	68.8	68.2	59.2	68.8	68.8	30.3	67.4	61.8	59.2	59.5	57.8
	Desviación	4.5	20.0	17.0	13.7	16.8	12.5	0.3	18.4	13.8	17.3	14.0	16.4

Simbología: Valor base Se Reduce Aumenta Se mantiene

Por otro lado, los diagramas de caja (Figura 35), reflejan que en el R1 los valores alcanzan valores superiores a los expuestos en el R3, sin embargo, en ambos casos es evidente que el E1, es el escenario más expuesto a la radiación, al no presentar

vegetación. Por otra parte, los escenarios que presentan los valores más bajos en cuanto a T_{mrt} máxima son los E3, E4 y E5 en donde existe aumento de H/W.

Figura 35
Boxplot de T_{mrt} .



Nota: Diagramas de caja. a) datos del receptor con vegetación b) datos del receptor sin vegetación.

En cuanto los valores de PET, estos pueden observarse en la Tabla 28 y Figura 36, en donde se observa que la temperatura media de todos los escenarios es mayor, mientras que los valores mínimos de PET se pueden encontrar en los escenarios E1 y E3, donde los valores disminuyen entre 0.4 y 0.5 °C respectivamente.

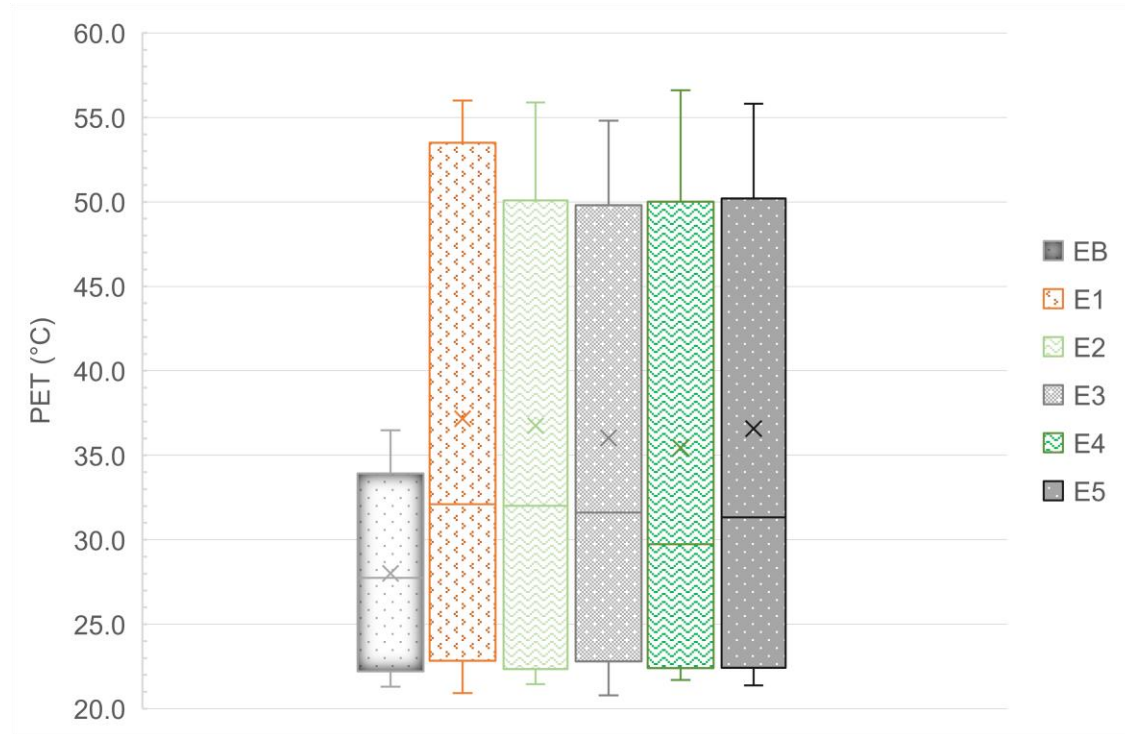
Caso contrario lo que sucede en las temperaturas máximas en donde los valores se incrementan en todos los escenarios, pese a esto, el E3 es el escenario en donde la T_{max} (54.8 °C) es menor en comparación al resto de las propuestas.

Tabla 28
Concentrado de resultados de PET.

Variable		R1 (Receptor ficus benjamina)						R3 (Receptor sin vegetación)					
		EB	E1	E2	E3	E4	E5	EB	E1	E2	E3	E4	E5
PET	Min	21.3	20.9	21.5	20.8	21.7	21.4	21.3	20.9	21.5	20.8	21.7	21.4
	Q1	22.3	24.8	24.4	24.3	22.5	24.1	22.3	24.8	24.4	24.3	22.5	24.1
	Media	28.0	37.2	36.7	36.0	35.4	36.6	28.0	37.2	36.7	36.0	35.4	36.6
	Mediana	27.7	32.1	32.0	31.6	29.7	31.3	27.7	32.1	32.0	31.6	29.7	31.3
	Q3	33.1	52.0	49.8	49.7	49.2	49.5	33.1	52.0	49.8	49.7	49.2	49.5
	Máx	36.5	56.0	55.9	54.8	56.6	55.8	36.5	56.0	55.9	54.8	56.6	55.8
Desviación		5.5	13.6	13.0	12.7	13.4	13.2	5.5	13.6	13.0	12.7	13.4	13.2

Simbología: Valor base Se Reduce Aumenta Se mantiene

Figura 36
Boxplot de PET



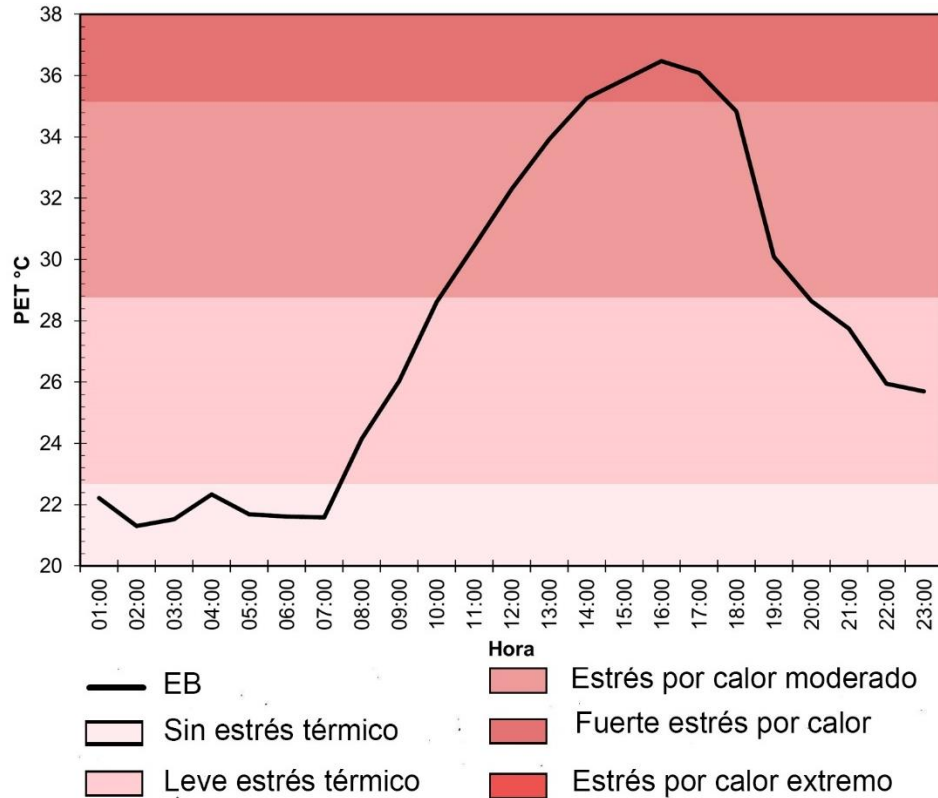
4.3. Temperatura Fisiológica Equivalente

4.3.1. Temperatura Fisiológica Equivalente en cañones poco profundos

En el escenario base (EB) se muestra que el índice PET oscila entre 21.2 °C (07 h) lo que es equivalente a una percepción confortable, sin la presencia de estrés térmico, mientras que la temperatura a las 16 h es de 36.48 °C, lo que refiere a condiciones de fuerte estrés por calor. Como se puede apreciar en la Figura 37, el valor de PET por la mañana es considerado como confortable, mientras que en horas críticas que abarcan desde las 13 h a las 17 h las condiciones reflejan fuerte estrés por calor. Sin embargo, a partir de las 16 h la temperatura empieza a disminuir hasta llegar a clasificarse dentro del rango de leve estrés térmico a las 23 h.

Figura 37

PET en escenario base



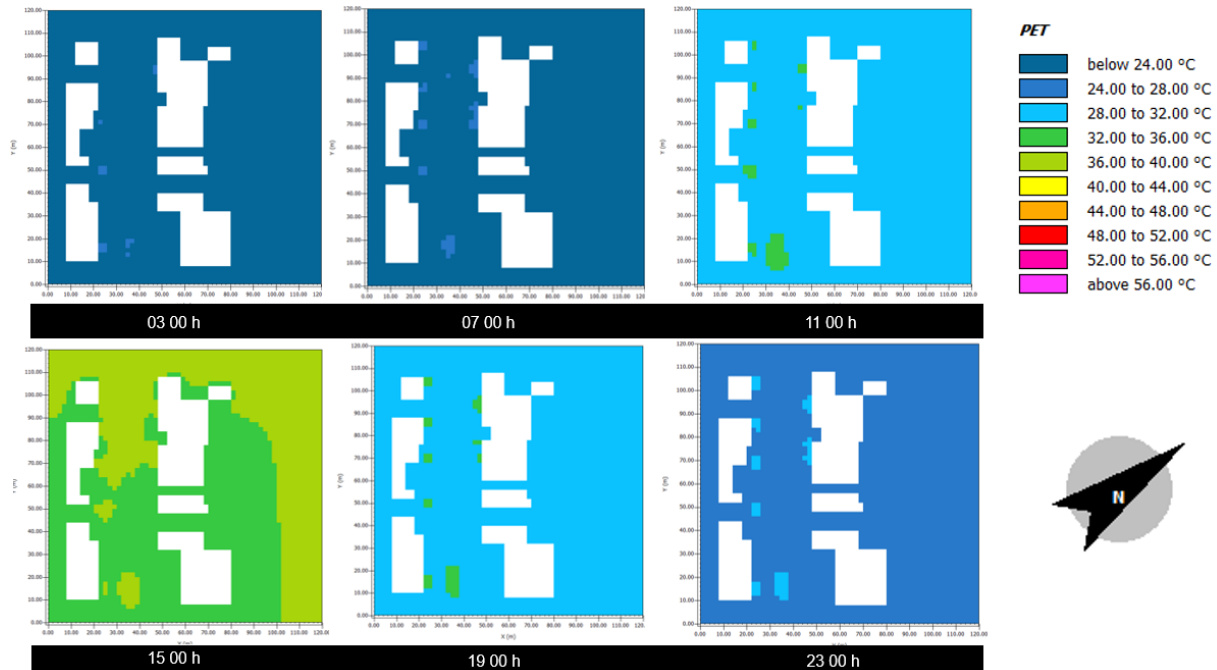
Como puede apreciarse en la Figura 38, el índice PET presenta valores por debajo de los 24 °C en la madrugada (03 h), mientras que por la mañana (07 h a 11 h) existen tendencias de incremento de PET en las zonas donde existe vegetación. Por otra parte, a las 15 h se presentan las condiciones más desfavorables debido a que en el área del cañón que corresponde a la orientación suroeste y sureste se presentan valores de PET ligeramente más bajos (32 °C a 36°C) en comparación de la zona noroeste y noreste del cañón, en donde la temperatura fisiológica equivalente se ve afectada por la radiación alcanzando temperaturas que oscilan entre (36 °C a 40°C).

Por otra parte, a partir de las 19 h se puede apreciar que el PET es más homogéneo, presentándose temperaturas a lo largo del cañón entre 28 °C a 32 °C, sin embargo, debajo del dosel de la vegetación se puede observar una temperatura mayor que oscila entre los 36 °C a 40 °C. Por último, a las 23 h, se aprecia que al igual que las 19 h la temperatura homogénea continúa a lo largo del cañón apreciándose que

los puntos donde se localiza la vegetación tienden a concentrar temperaturas un poco más elevadas que el resto del cañón urbano.

Figura 38

Mapas comparativos de PET en escenario base.

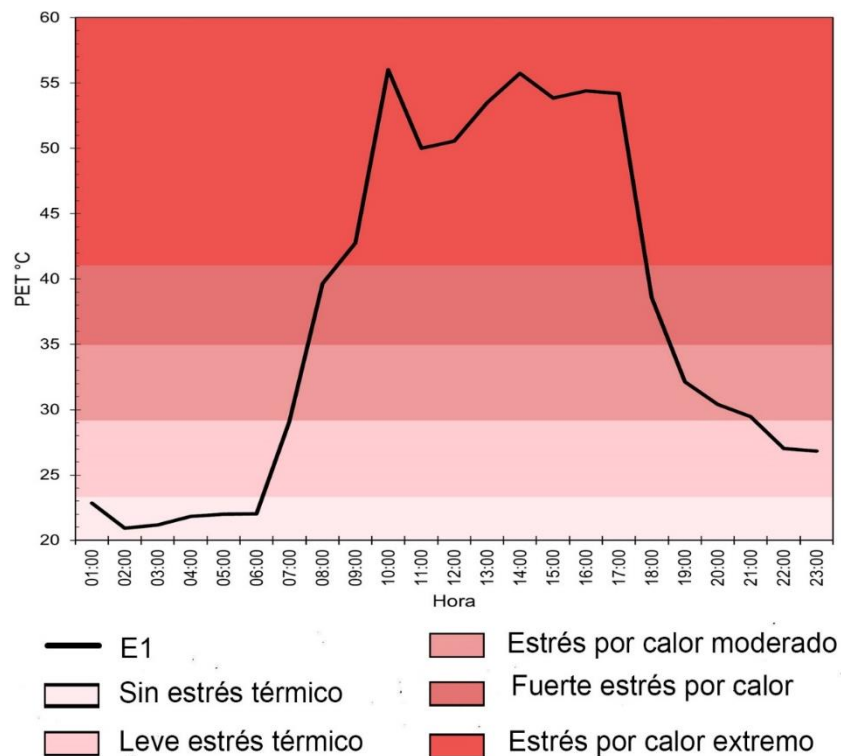


4.3.2. Temperatura Fisiológica Equivalente en escenarios sin vegetación

Por otra parte, en la Figura 39, que corresponde a los valores de PET en el escenario sin vegetación (E1) se muestra que este índice oscila entre 20.93 °C como mínima lo que es equivalente a una percepción confortable (sin la presencia de estrés térmico), Y 56 °C, como máxima.

Además, se puede apreciar que en este escenario se prolonga e intensifica la escala de PET durante el tiempo que abarca de las 09 a las 18 h, al situarse en el rango máximo de estrés por calor extremo en comparación con el EB puesto que el PET alcanza valores superiores a los 41 °C. Sin embargo, a partir de las 19 h la escala de PET tiende a disminuir hasta alcanzar de leve estrés térmico a las 21 h.

Figura 39
PET en escenario 1.



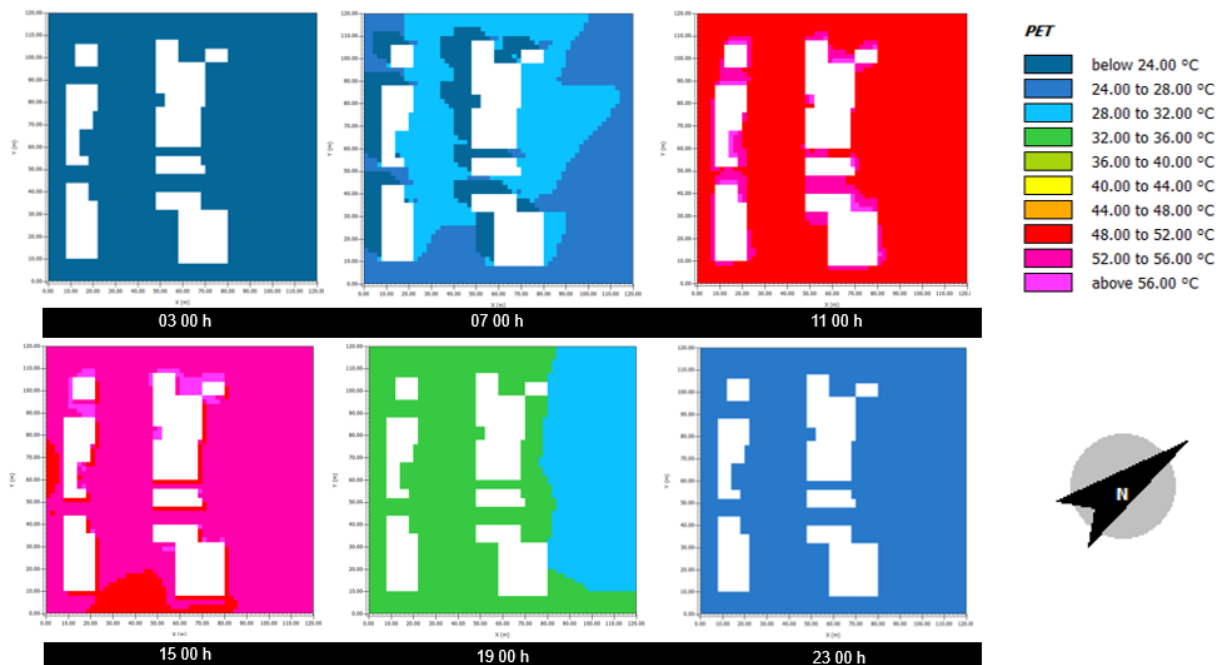
Además, como se puede apreciar en la Figura 40, el valor de PET por la mañana (01 h -07 h) es considerado como confortable - ligeramente cálido, puesto a que los valores de PET oscilan entre los 24 °C a 32°C.

Por otra parte, en el escenario sin vegetación, es perceptible que aumentan las horas críticas (09 h a 18 h) donde los valores de PET reflejan estrés por calor extremo. Mientras que a partir de las 19 h los valores de PET empiezan a disminuir hasta alcanzar valores con leve estrés térmico (menores a 29 °C). Como puede apreciarse en la Figura 36, el PET presenta valores por debajo de los 24 °C en la madrugada (03 h), al igual que el EB, mientras que a las 07 h se puede apreciar que existe un incremento de PET al centro del cañón que oscila entre los 24 °C a 32 °C, mientras que en la acera derecha del cañón se presentan valores de PET menores a 24 °C, debido a la proyección de sombra de las edificaciones al amanecer.

Respecto a las 15 h se presentan las condiciones más desfavorables debido a que el cañón presentan valores de PET que oscilan entre los 52 °C a 56°C, sin

embargo, se aprecia una reducción de PET en la zona sureste del mapa que oscila entre los 48 °C y los 52 °C. Mientras que a partir de las 19 h se puede apreciar que el PET es más homogéneo, presentando temperaturas a lo largo del cañón entre 32 °C a 36, un rango mayor dentro de la escala de PET en comparación del EB. Por último, a las 23 h, el mapa refleja que se reduce la temperatura de PET hasta alcanzar un rango de PET que oscila entre los 24 °C y los 28 °C.

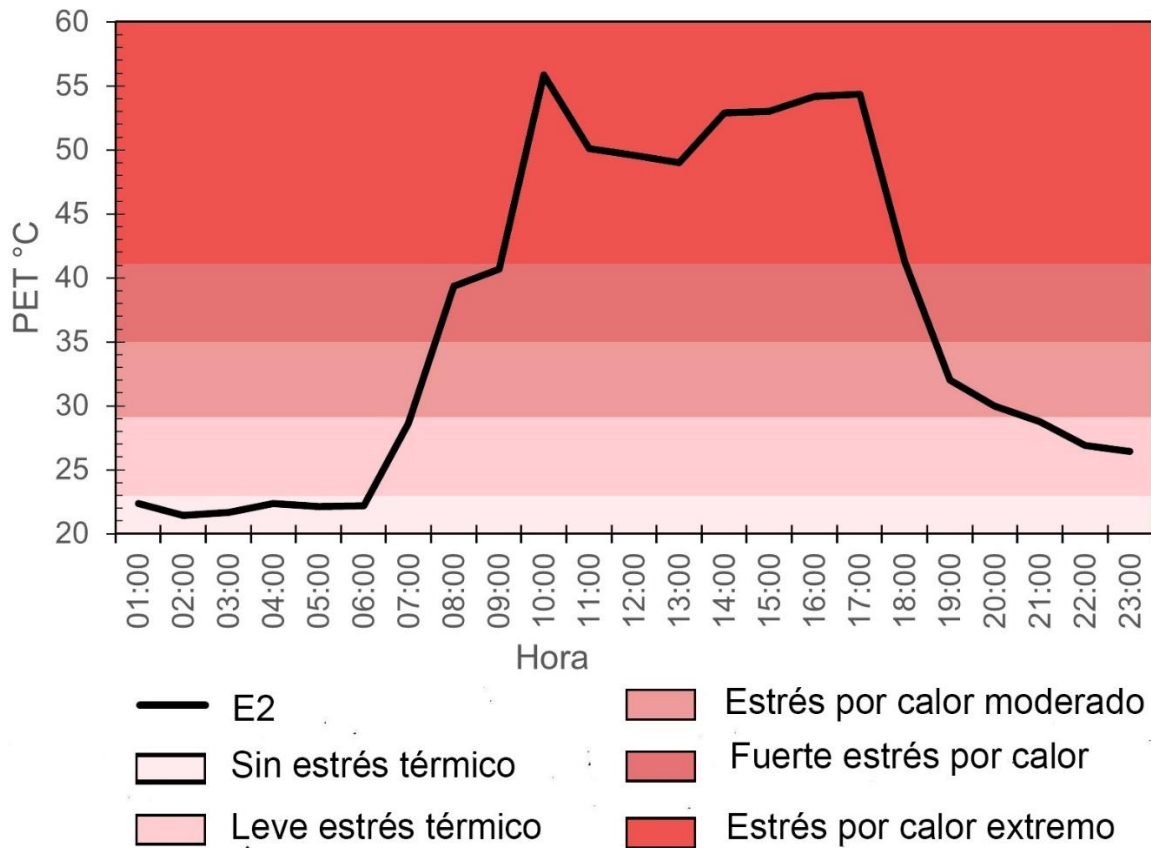
Figura 40
Mapas comparativos de PET en E1



4.3.3. Temperatura Fisiológica Equivalente en cañones poco profundos con aumento de vegetación

En cuanto al escenario de aumento de vegetación en cañones poco profundos (E2), se puede observar en la, en la Figura 41, la cual corresponde a los valores de PET a lo largo del día se muestra que este indicador oscila entre 21.45 °C y los 55.89 °C. Siendo el rango de estrés por calor extremo (valores superiores a los 41 °C.) el de mayor prevalencia a lo largo del día (09 h a las 18 h), mientras que, a partir de las 19 h, el valor de PET empieza a disminuir, hasta alcanzar valores de leve estrés térmico a las 23 h.

Figura 41
PET en escenario 2.



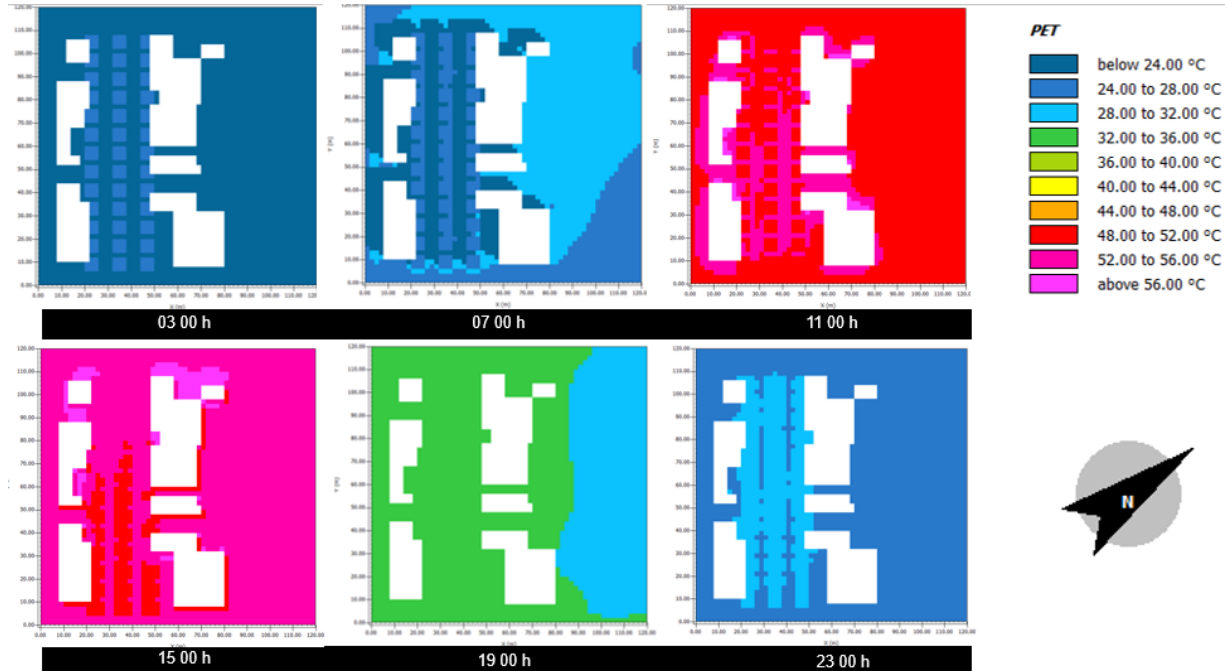
Como puede apreciarse en la Figura 42, el PET presenta valores por debajo de los 24 °C en la madrugada (03 h), sin embargo, se aprecian algunas manchas en los laterales y centro del cañón que corresponde al incremento de vegetación, la cual se manifiesta en un color más claro que es equivalente a un rango de temperatura que oscila entre los 24 °C a 28 °C Mientras que por la mañana (07 h) puede observarse que la sombra proyectada de la vegetación ayuda a reducir el PET al centro del cañón (valor de PET por debajo de los 24 °C), mientras que la escala de PET debajo de dosel del árbol presenta valores más altos (24 °C a 28 °C).

Por otra parte, a las 15 h se presentan las condiciones más desfavorables debido a que puede observar que en la zona noroeste del cañón existe un incremento de PET influenciado por la radiación de la tarde que oscila entre los 52 °C a 56 °C mientras que en la zona sureste se puede apreciar que debido a la influencia de los

árboles y la orientación del cañón a esta hora benefician para que los valores de PET oscilen entre los 48 °C y 52 °C

Por otro lado, a partir de las 19 h se puede apreciar que el PET es más homogéneo a lo largo del cañón, presentando temperaturas entre 32 °C y 36 °C, (condiciones similares al EB). Por último, a las 23 h, se aprecia que una variación de color a lo largo del cañón influenciados por la presencia de vegetación que representa a su vez una variación de valores de PET entre 24 °C a 32 °C, sin embargo, para en el caso particular de las aceras y camellón del cañón, el PET oscila entre los 28 °C a 32 °C.

Figura 42
Mapas comparativos de PET en escenario E2.



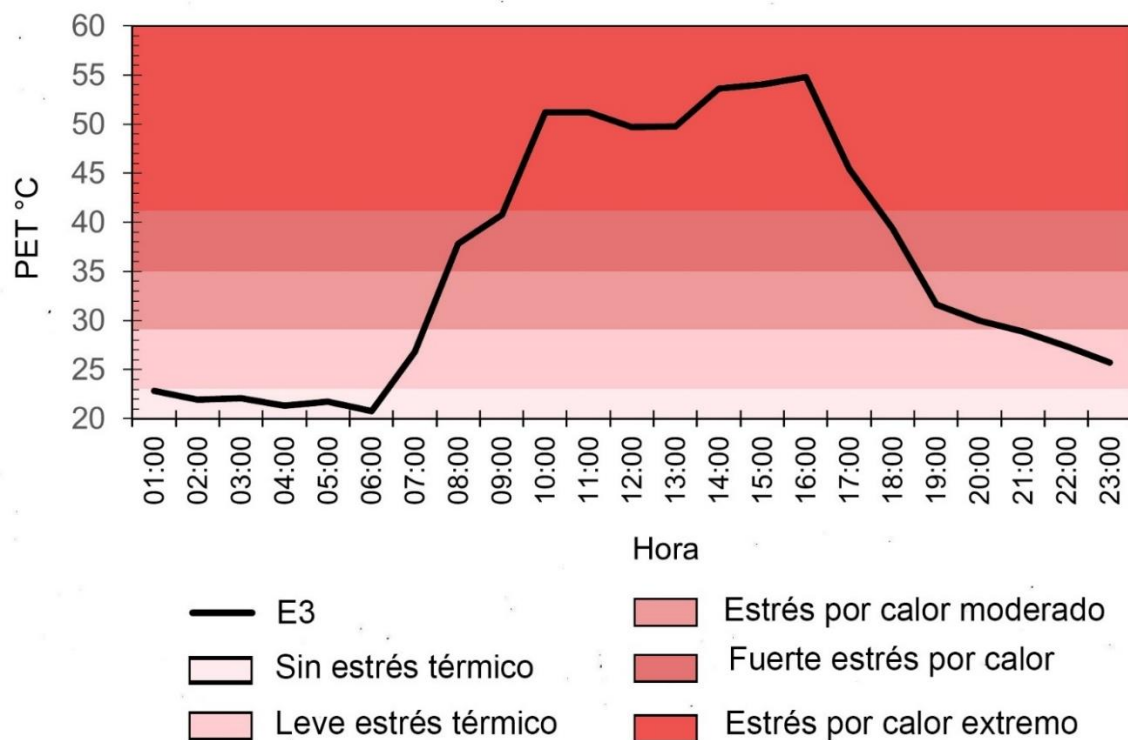
4.3.4. Temperatura Fisiológica Equivalente en cañones uniformes

En la Figura 43, la cual corresponde al comportamiento de PET en el escenario 3 (E3) se muestra que el PET oscila entre 21.3 °C y 54°C. La temperatura mínima se percibe alrededor de las 06 h, lo que es equivalente a una percepción confortable sin la presencia de estrés térmico. Mientras que por otro lado se puede observar en la figura que existen horas transitorias que abarcan de las 07 h a las 09 h, en que la

escala de PET fluctúa rápidamente y cambia de leve estrés térmico a fuerte estrés por calor.

Sin embargo, estas condiciones cambian a partir de las 10 h y hasta las 17 h ya que se presentan condiciones de estrés por calor extremo que alcanzan su temperatura máxima alrededor de las 16 h con 54 °C. Posterior a eso, existe otro periodo de transición que abarca de las 18 h hasta las 20 h en donde los valores de PET fluctúan rápidamente pasando por fuerte estrés por calor a estrés por calor moderado, y no es sino hasta las 21 h en adelante que los valores de PET disminuyen y se mantienen constantes dentro del rango de leve estrés térmico.

Figura 43
PET en escenario 3.



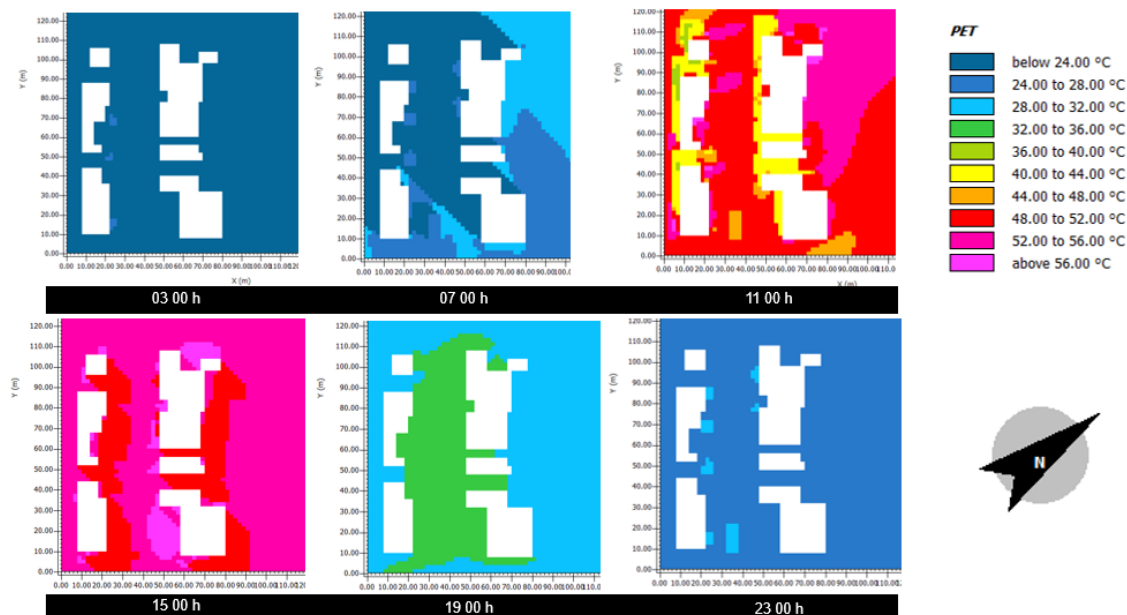
En la Figura 44, el PET presenta valores por debajo de los 24 °C en la madrugada (03 h), sin embargo, se aprecian algunos puntos en el lateral izquierdo del cañón que corresponden a la presencia de vegetación, la cual se manifiesta en un color más claro que es equivalente a un rango de temperatura que oscila entre los 24 °C a 28 °C. Mientras que por la mañana (07 h) puede observarse que la sombra proyectada de las edificaciones de la acera derecha reduce los valores de PET a

temperaturas menores a 24 °C, en la zona centro y noroeste del cañón urbano. Mientras que al sureste del cañón la reducción de los valores de PET influenciados solo por la proyección de sombra de la vegetación oscila entre los 24 °C a 28°C

Por otra parte, a las 15 h se presentan las condiciones más desfavorables debido a que puede observar que en la zona central del cañón la escala de PET muestra que se alcanzan valores entre 52 °C a 56 °C , Mientras que las edificaciones de la acera izquierda proyectan sombra que ayuda a reducir los valores de PET en la acera izquierda alcanzado valores que oscilan entre los 48 °C a 52 °C, mientras que la acera derecha se ve perjudicada por la radiación solar y alcanza valores PET superiores a los 56 °C.

Por último, a las 19 h se puede apreciar que el PET es más homogéneo a lo largo del cañón, presentando temperaturas entre 36 °C y 40 °C. Mientras que, a las 23 h, el valor de PET a lo largo del cañón ronda entre los 24 °C y 28 °C, con pequeñas variaciones de PET influenciados por la presencia de vegetación.

Figura 44
Mapas comparativos de PET en escenario 3.

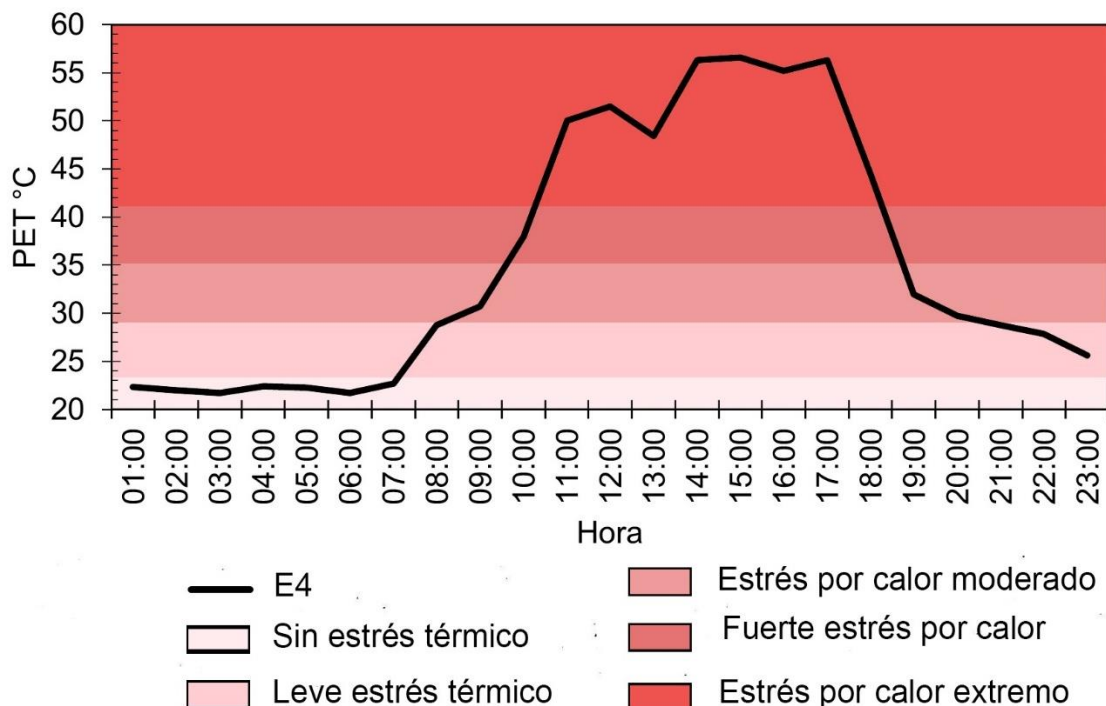


4.3.5. Temperatura Fisiológica Equivalente en cañones uniformes con aumento de vegetación.

En la Figura 45, la cual corresponde al comportamiento de PET en el escenario de aumento de relación aspecto y aumento de vegetación(E4) se muestra que el PET oscila entre 21.6 °C y 56.6°C. La temperatura mínima se percibe alrededor de las 03 h, lo que es equivalente a una percepción confortable sin la presencia de estrés térmico. Mientras que por otro lado se puede observar en la figura que existen horas transitorias que abarcan de las 08 h a las 10 h, en que la escala de PET fluctúa rápidamente y cambia de leve estrés térmico a fuerte estrés por calor.

Por otro lado, estas condiciones cambian a partir de las 11 h y hasta las 18 h ya que se presentan condiciones de estrés por calor extremo que alcanzan su temperatura máxima alrededor de las 15 h con 56.6 °C. Además, existe otro periodo de transición que abarca de las 18 h hasta las 20 h en donde los valores de PET fluctúan rápidamente pasando por fuerte estrés por calor a estrés por calor moderado, y no es sino hasta alrededor de las 21 h en adelante que los valores de PET disminuyen y se mantienen constantes dentro del rango de leve estrés térmico.

Figura 45
PET en escenario 4.



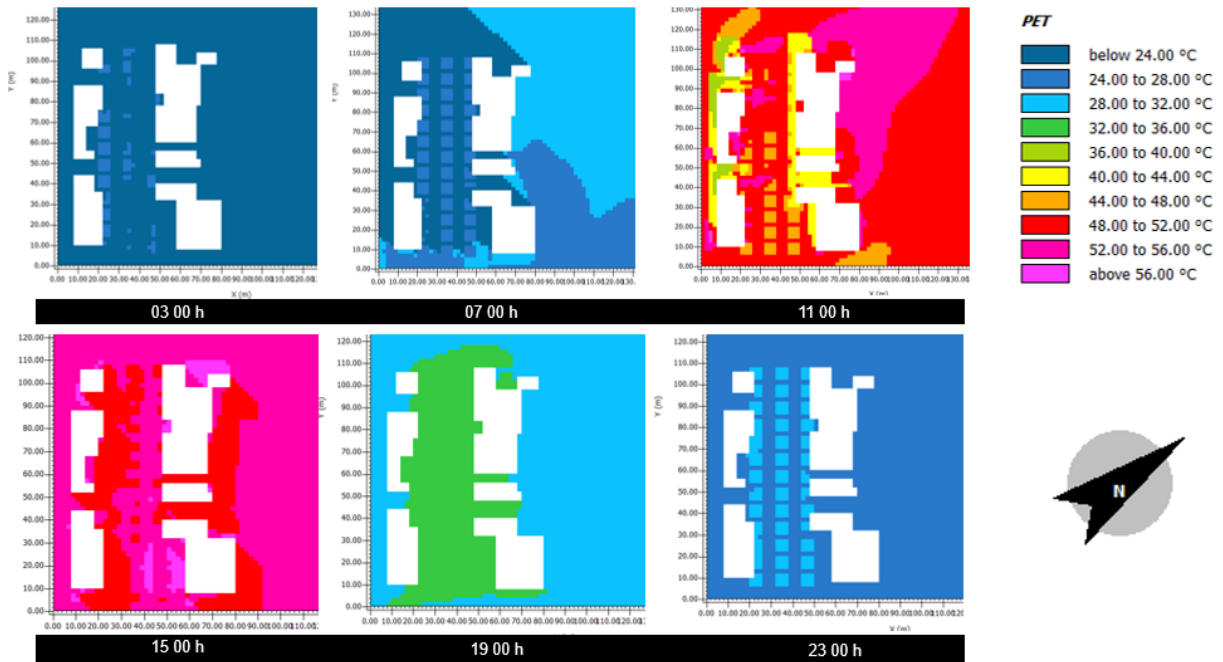
En la Figura 46, se aprecia que el PET presenta valores por debajo de los 24 °C en la madrugada (03 h), sin embargo, se aprecian algunos puntos en el lateral izquierdo del cañón y en el camellón que corresponden a la presencia de vegetación, la cual se manifiesta en un color más claro que es equivalente a un rango de temperatura que oscila entre los 24 °C a 28 °C. Mientras que por la mañana (07 h) puede observarse que la sombra proyectada de las edificaciones de la acera derecha mantiene los valores de PET a temperaturas menores a 24 °C, a lo largo del cañón, sin embargo, debajo del dosel de la vegetación urbana el PET oscila entre los 24 °C y 28°C.

Por otro lado, a las 11 h el mapa de PET revela que debajo de la sombra del árbol los valores de PET logran reducir la escala de PET (44 °C a 48°C), en comparación del resto del mapa donde no se perciben elementos de vegetación, es decir al centro del cañón urbano en donde los valores oscilan entre los 48 °C a 52°C. En tanto, a las 15 h se presentan las condiciones críticas debido a que se puede observar que en la zona central del cañón la escala de PET muestra que se alcanzan valores entre 52 °C a 56 °C, sin embargo, las edificaciones de la acera izquierda proyectan sombra a lo largo de la mitad del cañón que ayuda a reducir los valores de PET alcanzando valores entre los 48 °C a 52 °C, mientras que la acera derecha no percibe proyección de las edificaciones y mantiene el valor de PET entre 52 °C a 56 °C.

Por último, a las 19 h se puede apreciar que el PET es más homogéneo a lo largo del cañón, presentando temperaturas entre 36 °C y 40 °C. Mientras que, a las 23 h, el valor de PET a lo largo del cañón ronda entre los 24 °C y 28 °C, con variaciones de PET influenciados por la presencia de vegetación ya que los puntos donde se encuentra la vegetación tienden a tener un valor mayor en la escala de PET (28 °C-32°C) que en el resto del cañón urbano (24 °C a 28°C).

Figura 46

Mapas comparativos de PET en escenario 4.

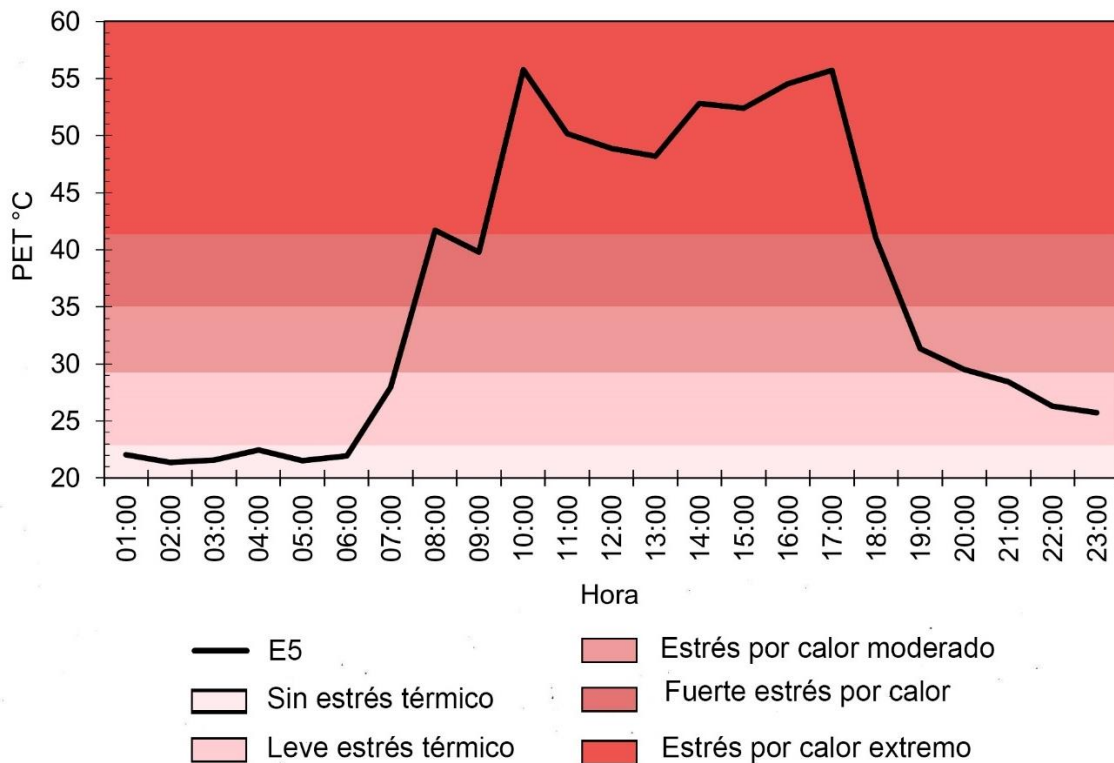


4.3.6. Temperatura Fisiológica Equivalente en cañones profundos

En la Figura 47, la cual corresponde al comportamiento de PET en el escenario de incremento en el aumento de relación aspecto (E5) se muestra que el PET oscila entre 21.3 °C y 55.8°C. La temperatura mínima se percibe alrededor de las 03 h, lo que es equivalente a una percepción confortable sin la presencia de estrés térmico. Mientras que por otro lado se puede observar en la figura que existen horas transitorias que abarcan de las 07 h a las 09 h, en que la escala de PET fluctúa rápidamente y cambia de leve estrés térmico a fuerte estrés por calor.

Por otro lado, estas condiciones cambian a partir de las 10 h y hasta las 18 h ya que se presentan condiciones de estrés por calor extremo que alcanzan su temperatura máxima alrededor de las 17 h con 55.9 °C. Además, existe otro periodo de transición que abarca de las 18 h hasta las 20 h en donde los valores de PET fluctúan rápidamente pasando por fuerte estrés por calor a estrés por calor moderado, y no es sino hasta alrededor de las 21 h en adelante que los valores de PET disminuyen y se mantienen constantes dentro del rango de leve estrés térmico.

Figura 47
PET en Escenario 5



En la Figura 48, se aprecia que el PET presenta valores por debajo de los 24 °C en la madrugada (03 h), sin embargo, a diferencia de los escenarios E3, y E4, este escenario no presenta variaciones térmicas influenciadas por la vegetación, por lo que el valor de PET menor a 24 °C es constante a lo largo del cañón. Mientras que por la mañana (07 h) puede observarse que la sombra proyectada de las edificaciones de la acera derecha mantiene los valores de PET a temperaturas menores a 24 °C, a lo largo del cañón, sin embargo, la sombra de las edificaciones no cubre la parte sur del cañón por lo que presenta en esta zona variaciones del valor de PET que oscilan entre los 24 °C y los 32 °C.

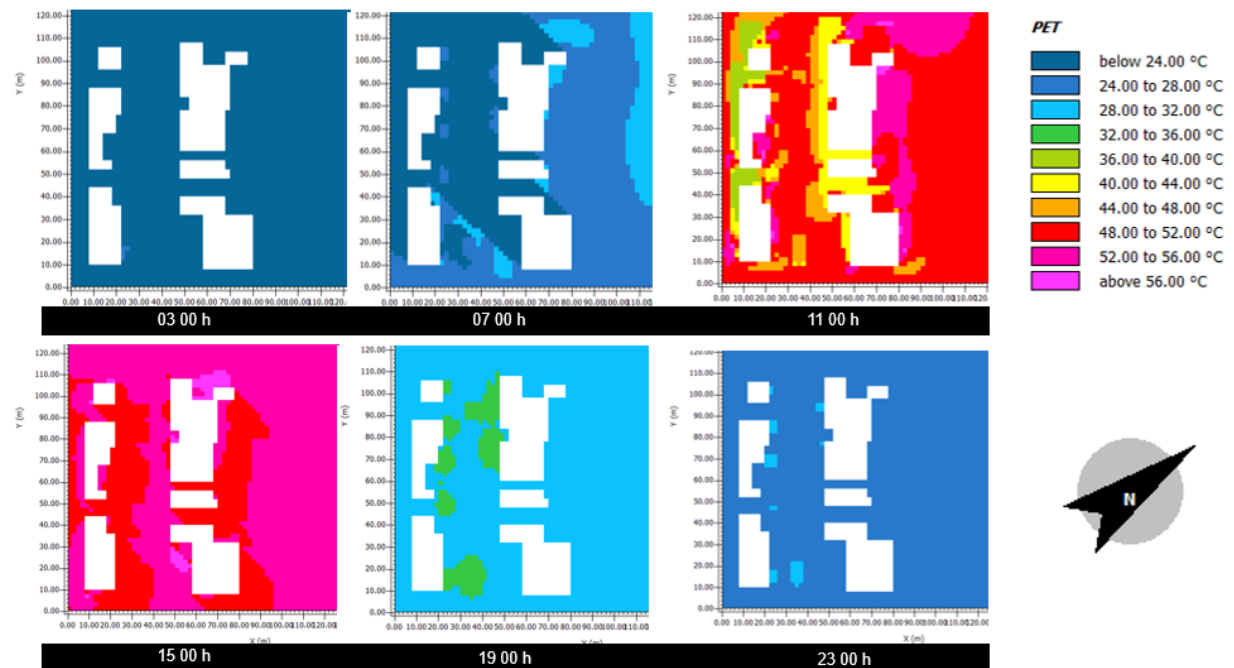
Por otro lado, a las 11 h el mapa de PET revela que el rango de PET que predomina a lo largo del cañón oscila entre los 48 °C a 52°C, se puede apreciar en la acera derecha del cañón que los valores de PET oscilan entre 40 °C y 48 °C, siendo menores los valores en comparación que en la acera derecha del cañón donde los valores de PET se mantienen entre los 48 °C a 52°C. Mientras que, a las 15 h se presentan las condiciones críticas debido a que se puede observar que en la zona

central del cañón la escala de PET muestra que se alcanzan valores entre 52 °C a 56 °C, sin embargo, las edificaciones de la acera izquierda proyecta sombra a lo largo de la mitad del cañón que ayuda a reducir los valores de PET alcanzando valores entre los 48 °C a 52 °C, mientras que la acera derecha no percibe proyección de las edificaciones y mantiene el valor de PET ente 52 °C a 56 °C.

Por último, a las 19 h se puede apreciar que se disminuyen los valores de PET, predominando los valores de PET entre 28 °C a 32 °C, sin embargo, se aprecian algunas áreas dentro de la imagen que representan la vegetación urbana y cuyo valor de PET (36 °C a 40).

Mientras que, a las 23 h, el valor de PET a lo largo del cañón ronda entre los 24 °C y 28 °C, con variaciones de PET influenciados por la presencia de vegetación ya que los puntos donde se encuentra la vegetación tienden a tener un valor mayor en la escala de PET (28 °C- 32°C) en comparación con en el resto del cañón urbano (24 °C a 28°C).

Figura 48
Mapas comparativos de PET en escenario 5.

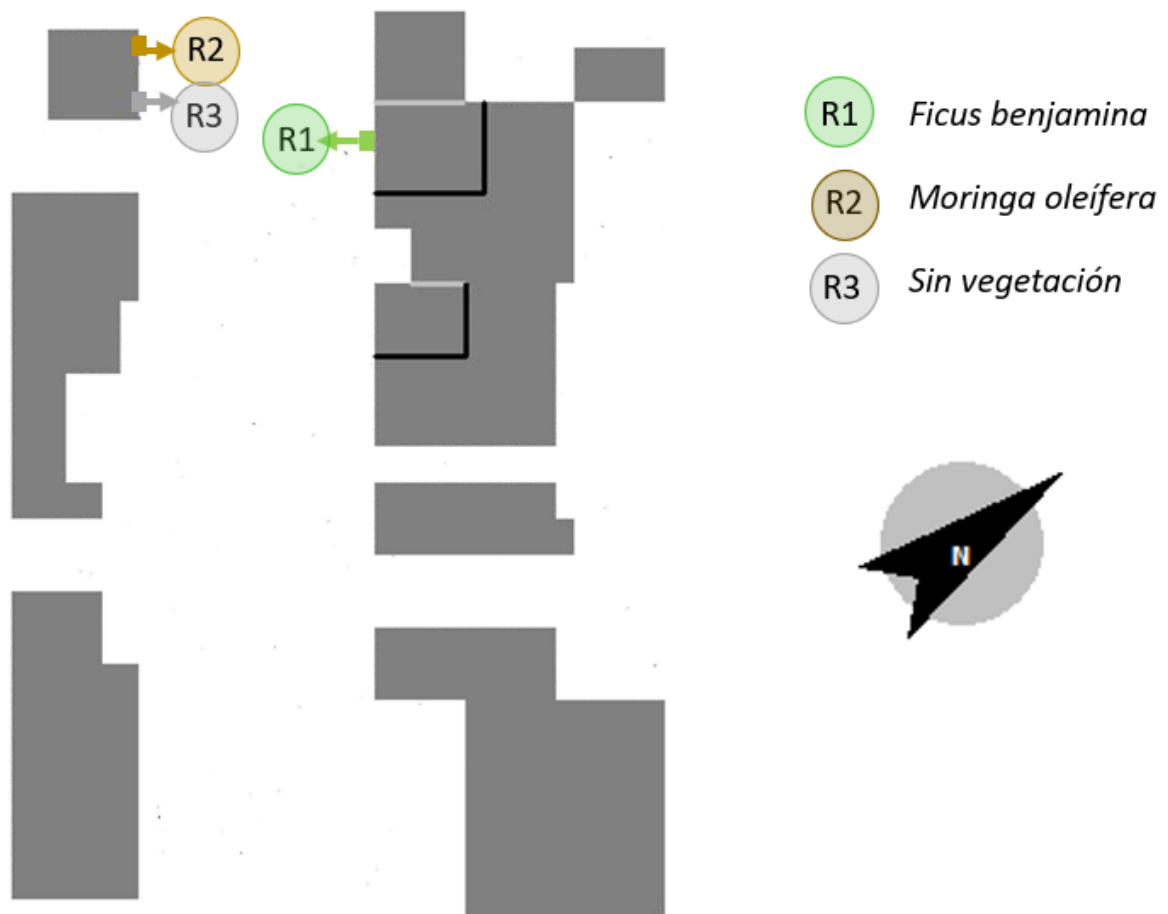


4.4. Variables de los escenarios

Este apartado se centra en los resultados obtenidos en los diferentes escenarios, y en donde se puede apreciar a detalle el comportamiento en los distintos receptores ubicados en el cañón urbano, por cada una de las variables medidas.

Por lo que es indispensable hacer referencia al significado de la simbología de los receptores, para su comprensión. El R1, hace referencia al receptor con vegetación (*Ficus benjamina*), mientras que el R2, hace referencia al receptor con vegetación (*Moringa oleífera*) y el R3, al receptor sin vegetación. En la Figura 49, se puede apreciar la distribución de los receptores en el cañón urbano.

Figura 49
Ubicación de receptores.



4.4.1. Temperatura del aire

En el EB, las condiciones de la temperatura del aire oscilan entre 25.96 °C, como (temperatura mínima) y 39.24 °C, (temperatura máxima), con una media de 31.86 °C. En la Figura 50, se puede apreciar que en los tres receptores existe poca variación de los datos, sin embargo, en el periodo que comprende de las 11 h hasta las 17 h, el R2, muestra un ligero incremento de la temperatura del aire, en comparación con el R1 y R3.

En cuanto a la Figura 51, se puede apreciar que la temperatura del aire es menor a los 27 °C entre las 03 h y las 07 h, mientras que a las 11 h se puede apreciar que predomina a lo largo del cañón una temperatura que oscila entre 33 °C a 35 °C, mientras que al sur este del cañón, se puede apreciar una zona amarilla la cual corresponde a un incremento de temperatura en esta zona que oscila entre los 35 °C a 37 °C. En tanto, a las 15 h se observa que existe un incremento de temperatura que oscila entre los 37 °C a 39 °C. Mientras que a las 19 h se puede apreciar que la temperatura empieza a disminuir y a homogeneizar a lo largo del cañón urbano, alcanzando un rango de temperatura que oscila entre los 33 °C a 35 °C hasta llegar a alcanzar un rango de 29 °C a 31 °C a las 23 h.

Figura 50
Temperatura del aire en EB.

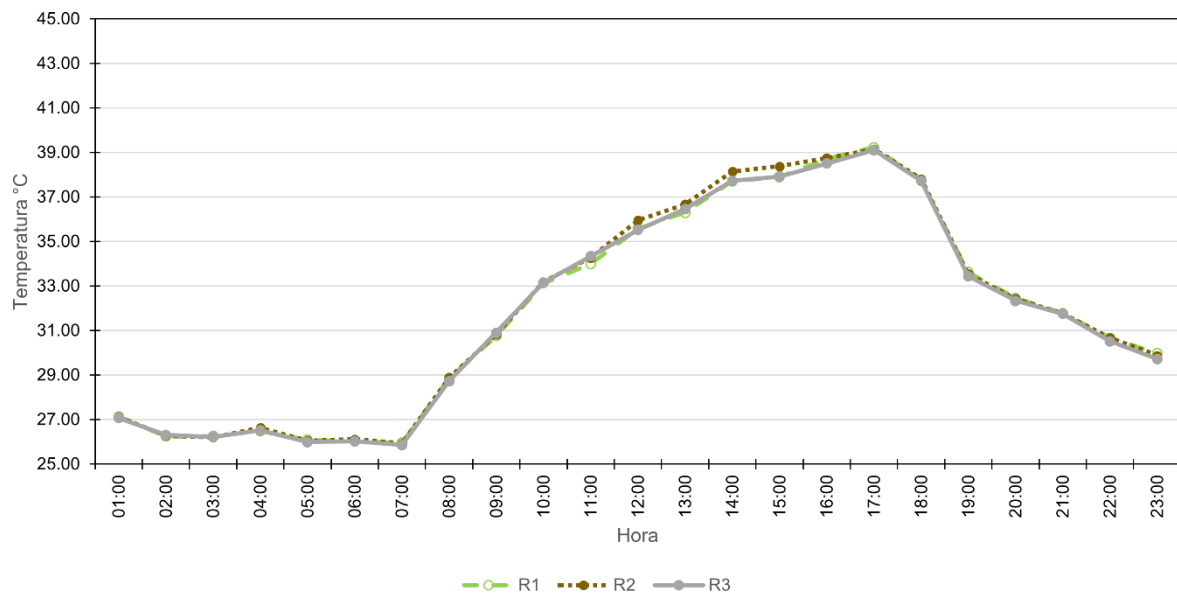
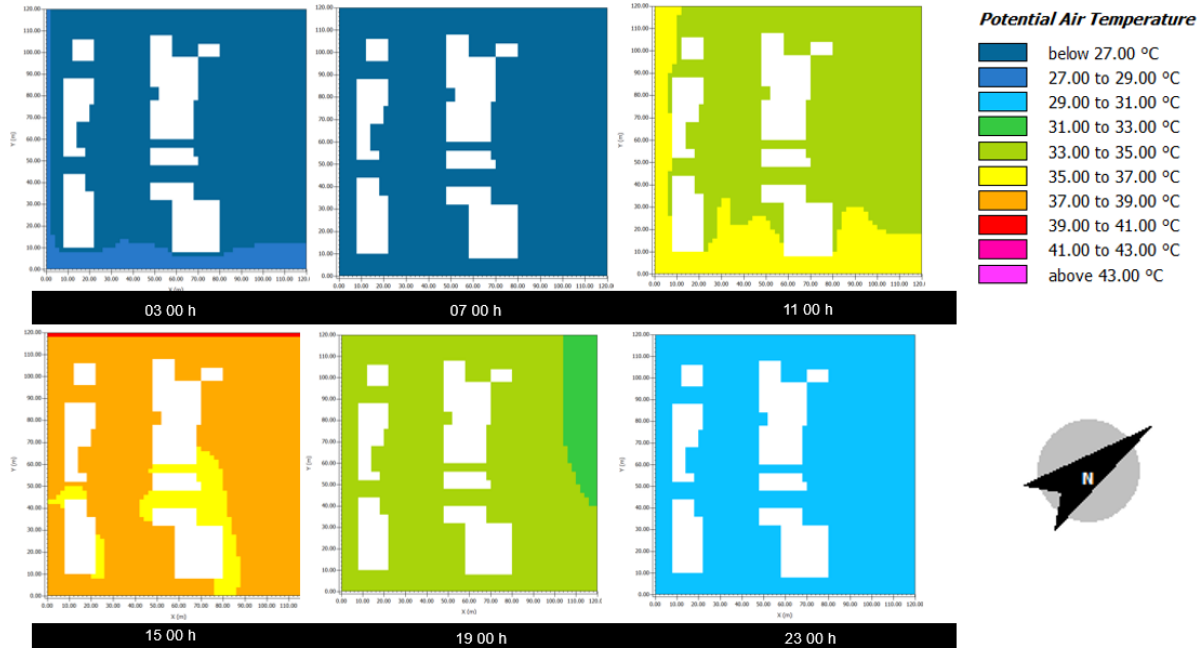


Figura 51

Mapas comparativos de la temperatura del aire en escenario EB.



Por otro lado, en la Figura 52, la cual corresponde a la temperatura, en el escenario sin vegetación (E1), se muestra que la temperatura oscila entre 26 °C y 41 °C. La temperatura mínima se percibe alrededor de las 07 h, y la máxima se manifiesta a las 17 h. Además, se puede apreciar que desde la 01 h a las 07 h la temperatura no presenta variaciones drásticas, sino a partir de las 08 h cuando la temperatura empieza a ascender, hasta llegar a su nivel máximo a las 17 h, para posteriormente empezar a disminuir.

Sin embargo, como puede apreciarse en la Figura 53, la temperatura presenta valores por debajo de los 27 °C durante las primeras horas del día (03 h a 07 h), en tanto que a las 11 h las condiciones cambian y se puede apreciar que a lo largo del cañón la temperatura oscila entre 37- 39 °C, a excepción de la zona sureste en donde las condiciones varían y la temperatura oscila entre 35-37 °C, mientras que la zona noroeste se puede apreciar un área en donde las temperaturas alcanzan un rango entre 39-41 °C. En cuanto a las 15 h, se puede apreciar que predomina el rango de temperatura que oscila entre 37-39 °C por lo que se presentan las condiciones más desfavorables del día. Sin embargo, a partir de las 19 h se observa que la temperatura

empieza a descender, hasta alcanzar temperaturas que oscilan entre 29-31 °C, alrededor de las 23 h.

Figura 52
Temperatura del aire en E1.

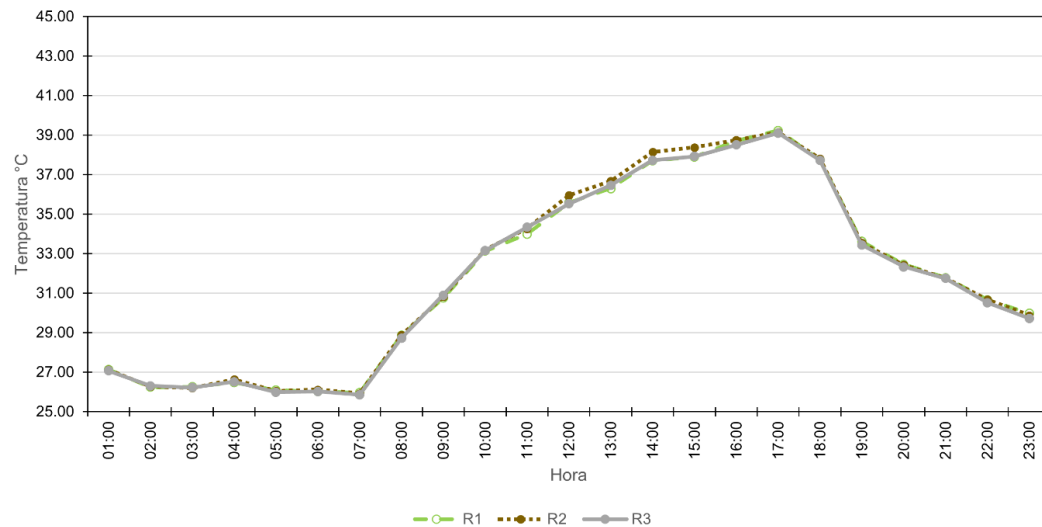
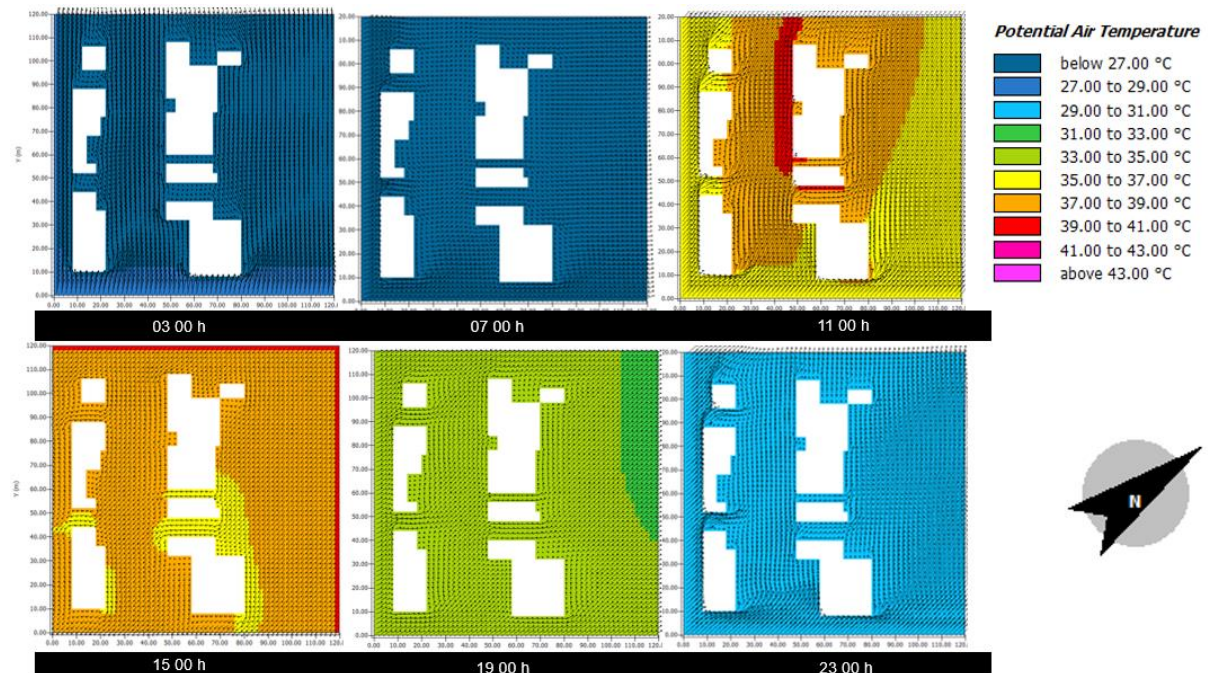


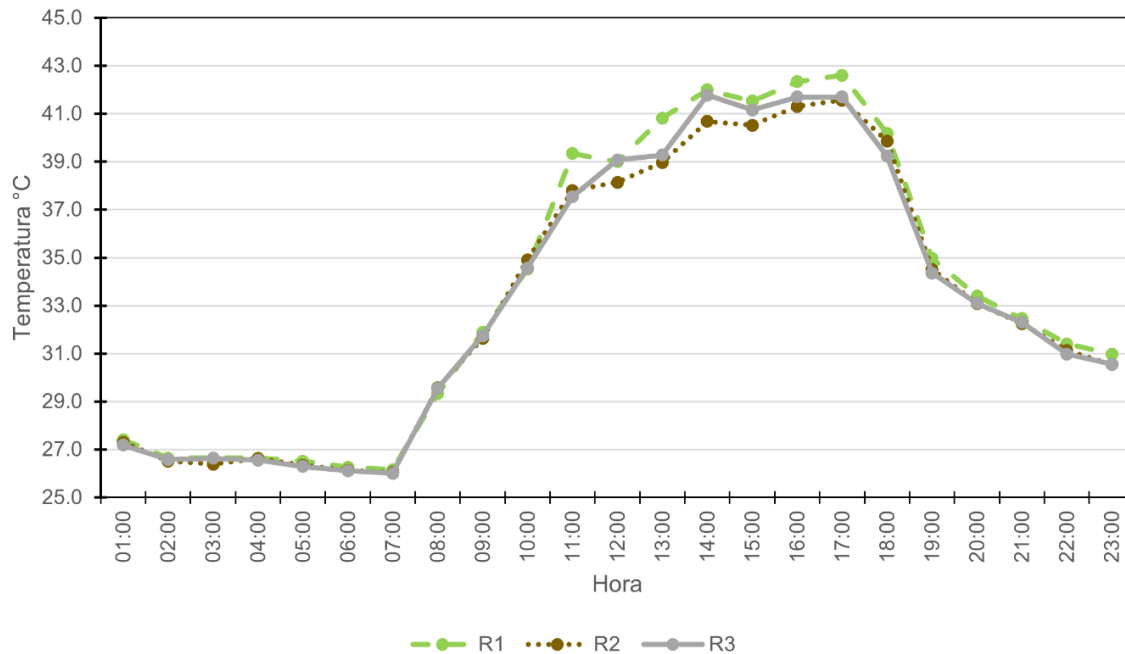
Figura 53
Mapas comparativos de la temperatura del aire en escenario E1.



En tanto a la Figura 54, la cual corresponde a la temperatura, en el escenario E2, se puede observar que la temperatura mínima se percibe alrededor de las 07 h, y la máxima se manifiesta a las 17 h. Además, se puede apreciar que desde la 01 h a

las 07 h la temperatura no presenta variaciones drásticas, sino a partir de las 08 h cuando la temperatura empieza a ascender, hasta llegar a su nivel máximo a las 17 h, para posteriormente empezar a disminuir.

Figura 54
Temperatura del aire en E2.

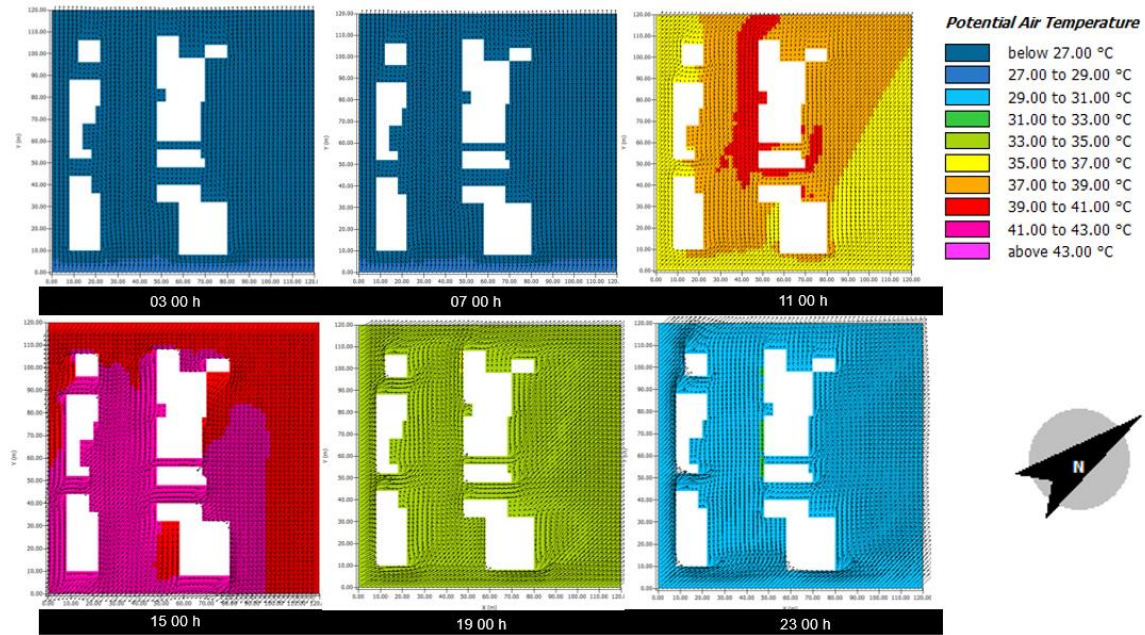


Mientras que, por otra parte, en la Figura 55, se aprecia que la temperatura no presenta variaciones entre las 03 h y 07 h, en donde los valores se mantienen por debajo de los 24 °C. Sin embargo, las condiciones cambian a las 11 h, ya que se puede observar que a esta hora predomina a lo largo del cañón una temperatura entre 37-39 °C, aunque en la zona noroeste, que corresponde a la acera derecha del cañón existe una variación de temperatura que oscila entre 39-41 °C.

Respecto a las 15 h se identifica que a lo largo del cañón predomina una temperatura que oscila entre 41-43 °C. Por último, a las 19 h se puede apreciar que se disminuyen los valores de temperatura, predominando los valores entre 33 °C a 35 °C. Por tanto, a las 23 h, el valor de la temperatura a lo largo del cañón oscila entre los 29 °C y 31 °C.

Figura 55

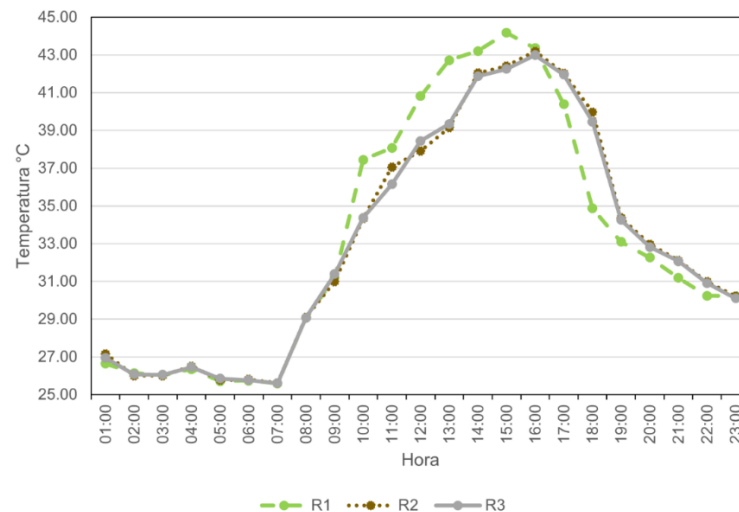
Mapas comparativos de la temperatura del aire en escenario E2.



En cuanto al escenario E3, se puede observar que en la Figura 56, que las condiciones de temperatura no presentan cambios drásticos de la 01-07 h, sino que a partir de las 08 h la curva empieza ascender, hasta alcanzar su nivel máximo alrededor de las 16 h (49 °C). Por lo que a partir de las 17 h se aprecia que la curva empieza a caer hasta llegar a los 30 °C a las 23 h.

Figura 56

Temperatura del aire en E3.

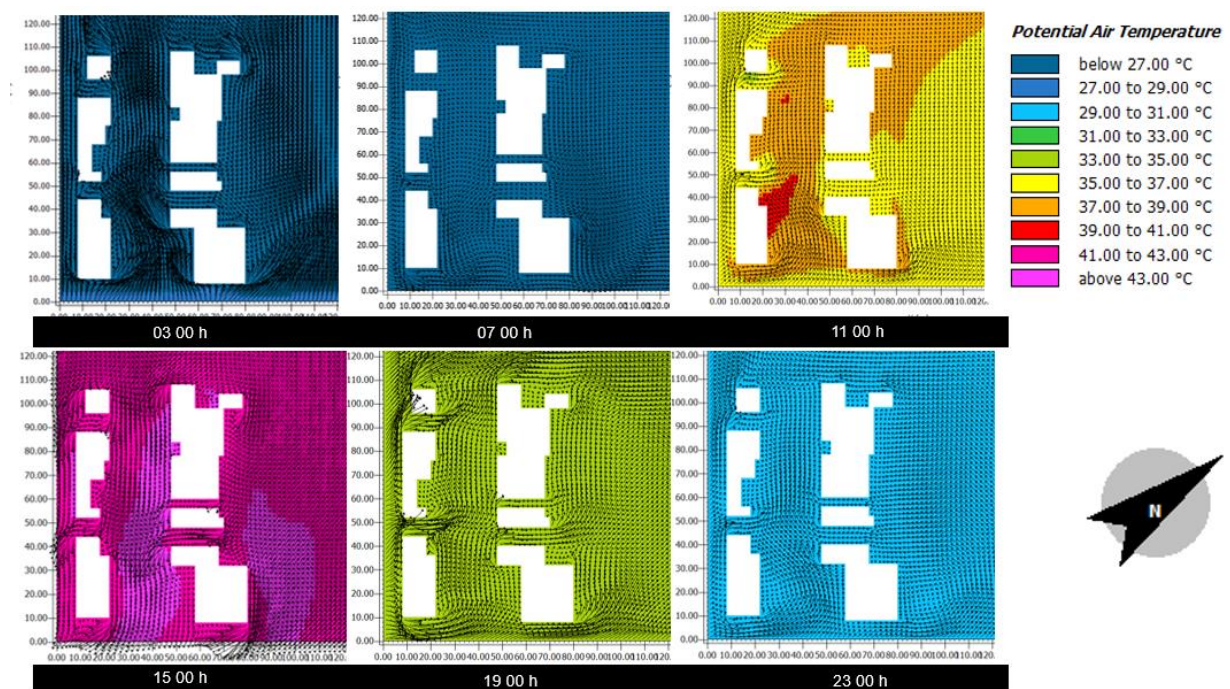


Por otro lado, en la Figura 57, se puede observar que a las 03 y 07 h la temperatura es menor a 27 °C, sin embargo, a las 11 h, se aprecia un aumento de temperatura en la que predomina un rango de 37-39 °C, pese a que se observa al centro del lateral izquierdo del cañón una zona en donde la temperatura se incrementa y los valores oscilan entre 39 a 41 °C.

Asimismo, a las 15 h, se aprecia que en la zona lateral derecha que corre a lo largo del cañón, que la temperatura es mayor a los 43 °C, pese a que el lateral izquierdo del cañón, la temperatura oscila entre 41-43 °C. Por el contrario, se aprecia la disminución de temperatura a lo largo del cañón urbano desde las 19 h, por lo que, a las 23 h, se llega una temperatura que oscila entre los 29-31 °C.

Figura 57

Mapas comparativos de la temperatura del aire en escenario E3.



A cerca del escenario E4, se puede apreciar que en la Figura 58, las condiciones de la temperatura que va de la 01-07 h, no presentan cambios drásticos, sino que a partir de las 08 h la curva empieza ascender, hasta alcanzar su nivel máximo alrededor de las 16 h (39.1 °C). Por lo que a partir de las 17 h la curva empieza a caer hasta llegar a los 29.73°C a las 23 h.

Figura 58
Temperatura del aire en E4.

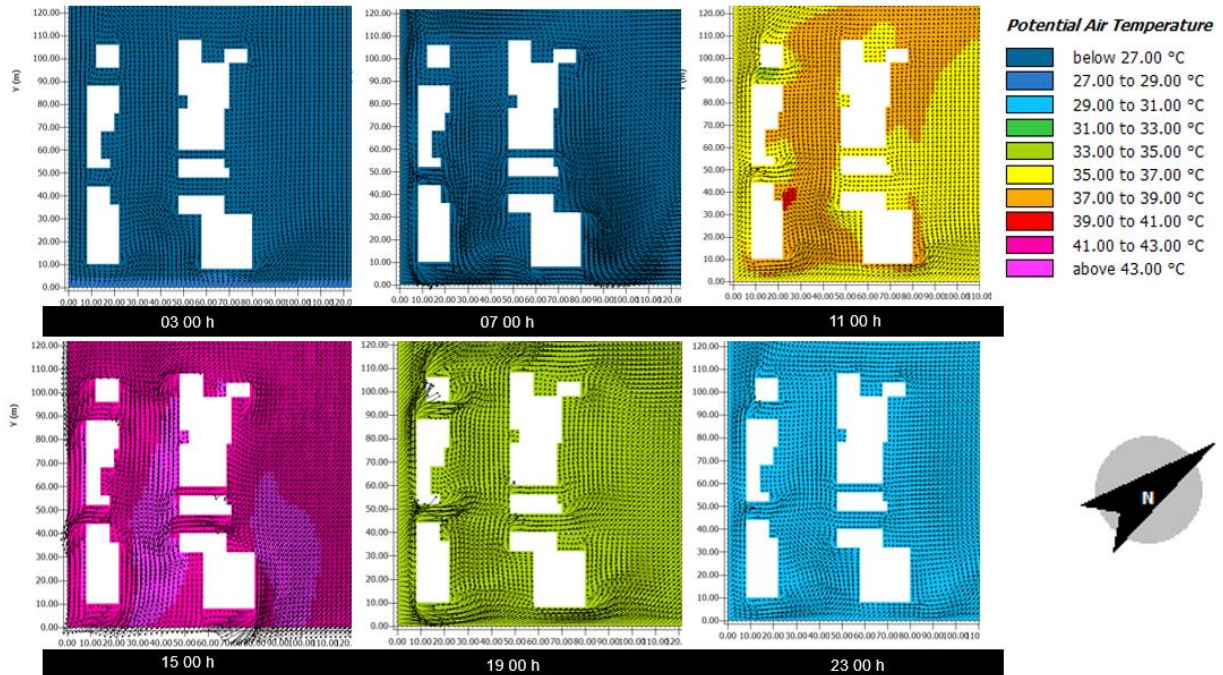


Por otra parte, en la Figura 59, se puede apreciar que a las 03 y 07 h la temperatura es menor a 27 °C, en cambio, a las 11 h, se aprecia un aumento de temperatura en la que predomina un rango de 37-39 °C, pese a que se observan al centro del lateral izquierdo del cañón dos zonas, una donde el valor de la temperatura oscila entre 35 - 37 °C, y la otra más cercana al sureste del cañón en donde la temperatura se incrementa y los valores oscilan entre 39 a 41 °C.

Así pues, a las 15 h, se aprecian las condiciones más críticas debido a que en la zona lateral derecha que corre a lo largo del cañón, la temperatura es superior a los 43 °C, pese a que el lateral izquierdo del cañón, la temperatura oscila entre 41-43 °C. Además, a las 19 h, se aprecia la disminución de temperatura a lo largo del cañón urbano, por lo que, a las 23 h, se llega una temperatura que oscila entre los 29-31 °C.

Figura 59

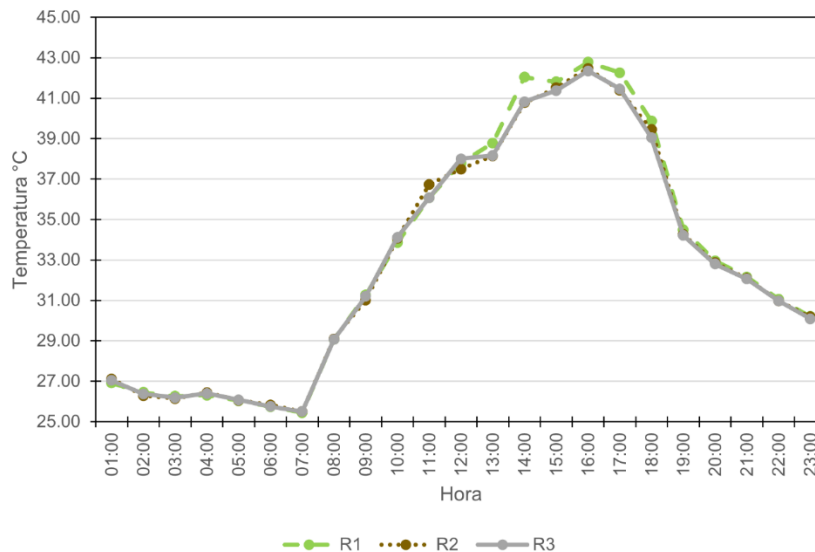
Mapa comparativo de la temperatura del aire en escenario E4.



En relación con el escenario E5, se puede apreciar que en la Figura 60, que, a partir de la 01 h, la temperatura comienza a descender hasta llegar a su valor mínimo a las 7 h (25.5 °C). Por lo que no es, sino a partir de las 08 h que la curva empieza ascender, hasta alcanzar su nivel máximo alrededor de las 16 h (42.35 °C) de manera que a partir de las 17 h la temperatura nuevamente empieza a descender.

Figura 60

Temperatura del aire en E5.

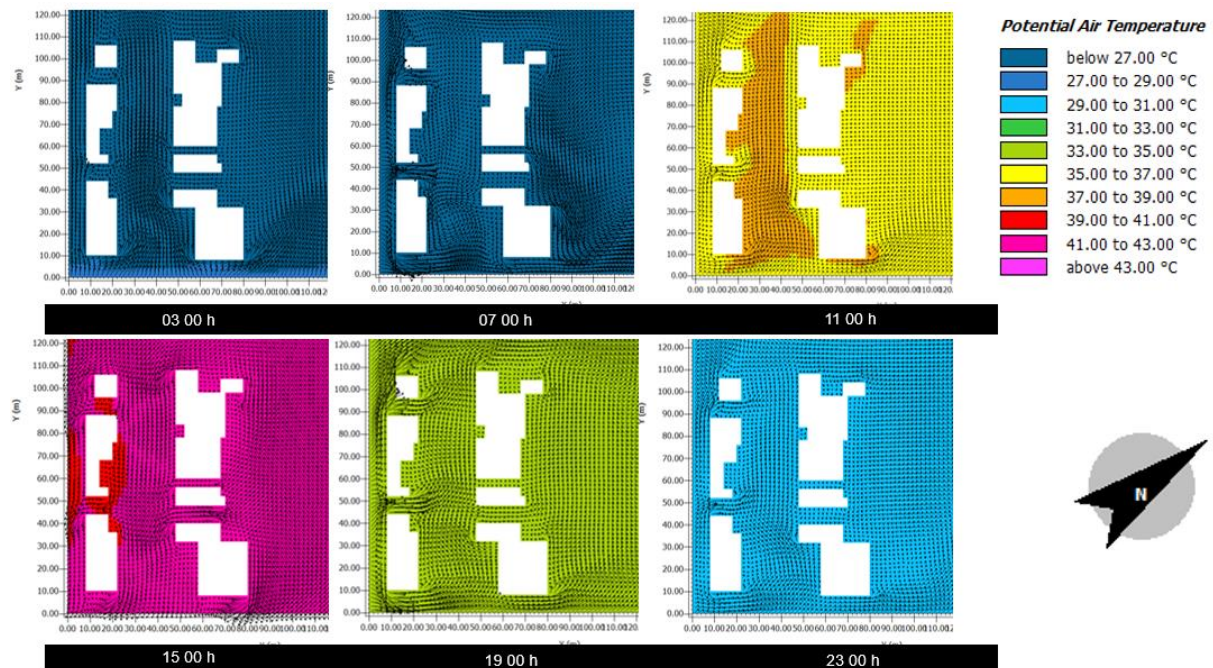


Además, en la Figura 61, se puede apreciar que a las 03 y 07 h la temperatura es menor a 27 °C, por otra parte, a las 11 h, se aprecia un aumento de temperatura en la que predomina un rango de 37-39 °C, pese a que se observa que a lo largo del lateral derecho del cañón predomina un rango de temperatura que oscila entre los 35 – 37 °C.

Por otro lado, a las 15 h, se aprecian las condiciones más desfavorables debido a que a lo largo del cañón urbano, la temperatura oscila entre 41 - 43 °C, sin embargo, se puede apreciar una zona al centro del lateral izquierdo en donde la temperatura oscila entre 39-41 °C. Finalmente, a las 19 h, se aprecia el descenso de temperatura a lo largo del cañón urbano, por lo que, a las 23 h, se llega una temperatura que oscila entre los 29-31 °C.

Figura 61

Mapa comparativo de la temperatura del aire en escenario E5.



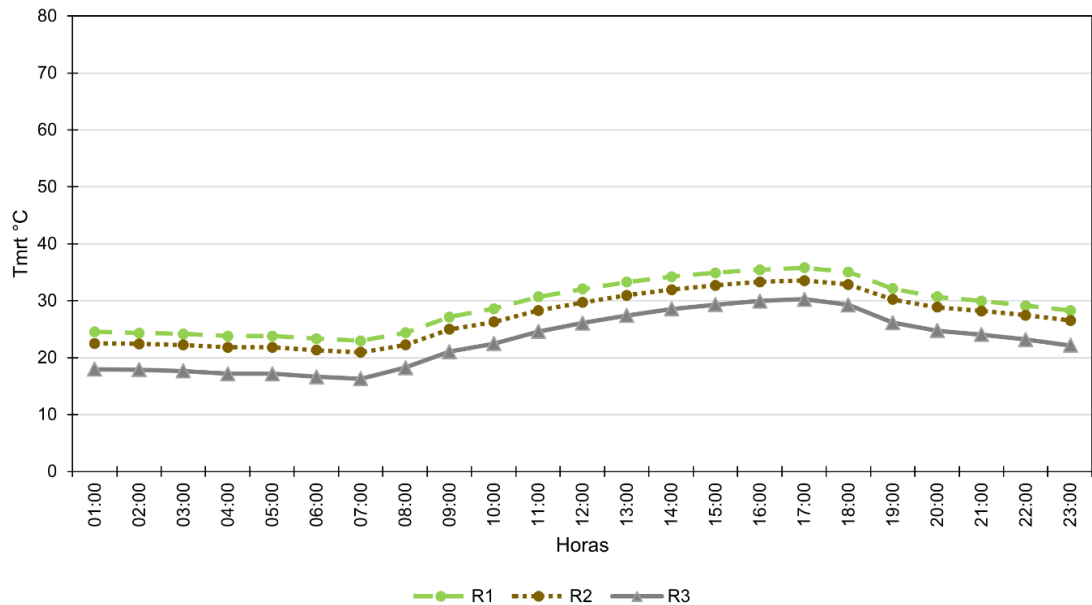
4.4.2. Temperatura Radiante media

En cuanto a la Tmrt, en la Figura 62, se observan los datos que corresponden al escenario base (EB). Se observa que la Tmrt mínima, en los tres receptores se presenta alrededor de las 07 h, mientras que, alrededor de las 17 h, se presentan en

los tres receptores los valores máximos de Tmrt, y es a partir de las 18 h cuando la Tmrt disminuye.

Figura 62

Tmrt de escenario base.



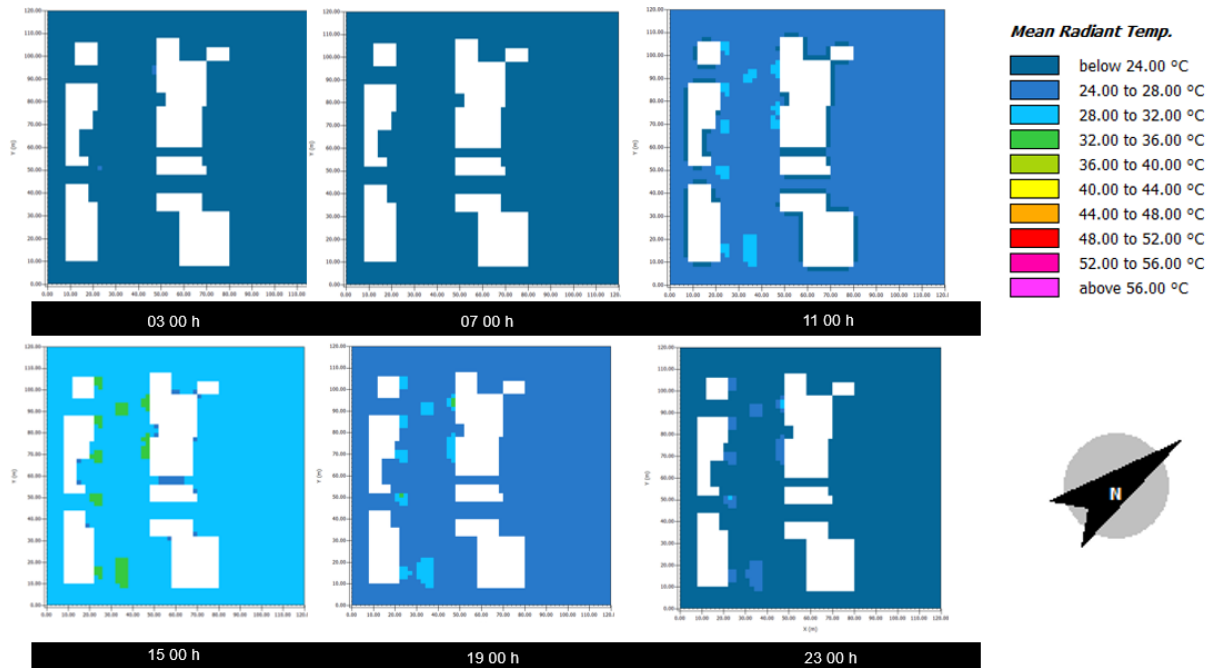
Por otra parte, en la Figura 63, se puede apreciar que la Tmrt a las 03 h y 07 h presenta valores menores a los 24 °C, mientras que a las 11 h se puede observar que incrementa la Tmrt a lo largo del cañón, situándose en un rango que oscila entre los 24 °C a 28 °C, mientras que debajo del dosel de la vegetación se presentan valores que alcanzan valores de 28 °C a 32 °C.

En el caso de las 15 h se aprecia un incremento de la Tmrt a lo largo del cañón que alcanza valores entre 28 °C y 32 °C, mientras que los valores debajo del dosel de la vegetación oscilan entre los 36 °C a 40 °C.

Posteriormente a las 19 h se aprecia una disminución de la Tmrt a lo largo del cañón, alcanzando condiciones similares a las que se presentan a las 11 h en donde los valores oscilan entre los 24 °C y 28 °C. Por último, a las 23 h, se observa que los valores de Tmrt continúan disminuyendo al alcanzar una temperatura menor a los 24 °C.

Figura 63

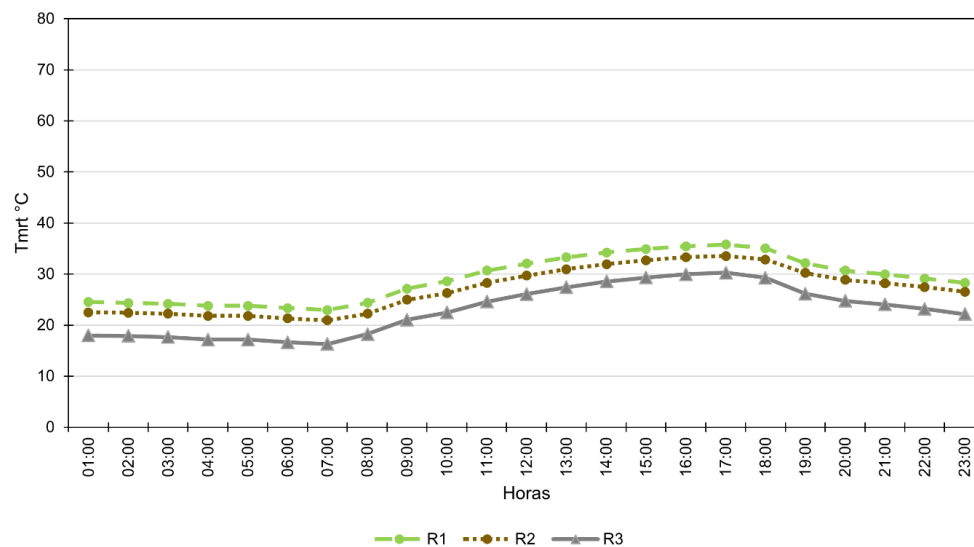
Mapas comparativos de la Tmrt en escenario EB.



En relación con el escenario E1, se puede apreciar que en la Figura 64, que, a partir de las 07 h la Tmrt empieza a ascender hasta llegar a su valor más alto alrededor de las 15 h (67.3 °C). y a partir de las 16 h empieza a descender hasta llegar a los 24.4 °C a las 23 h.

Figura 64

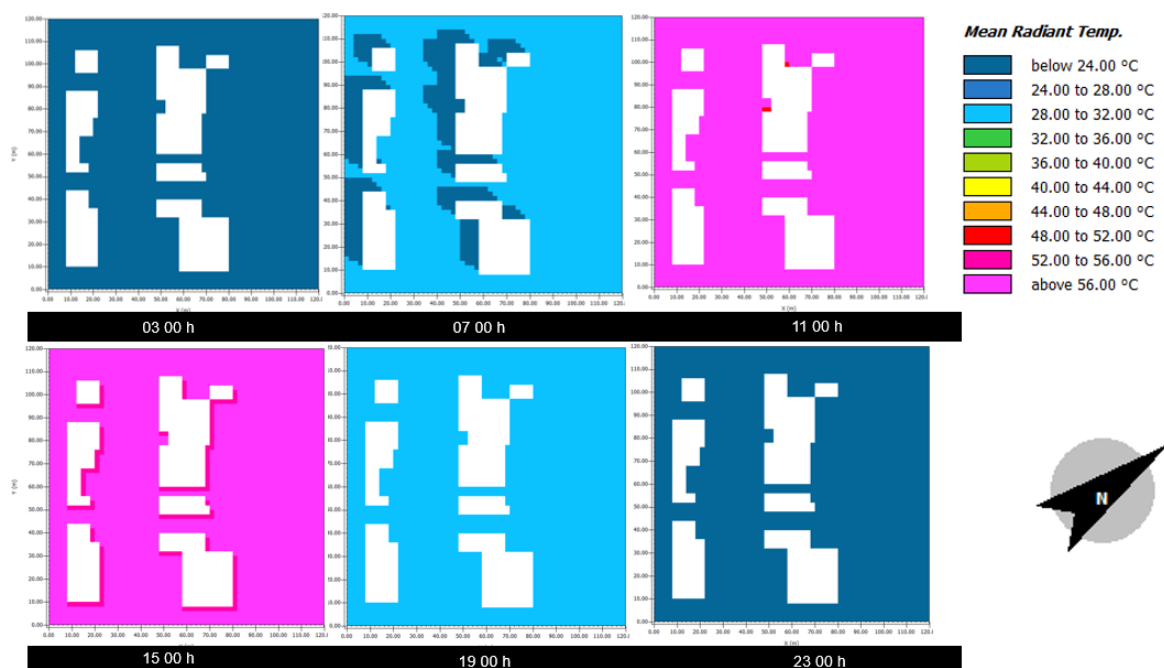
Tmrt de E1.



Además, en la Figura 65, se puede apreciar que a las 03 h la Tmrt se mantiene por debajo de los 24 °C, mientras que a las 07 h la temperatura se aprecia que la Tmrt oscila entre los 28 – 32 °C, pese a que en el lateral derecho del largo del cañón la Tmrt se mantiene por debajo de las 24 °C. Además, se puede observar que existen horas desfavorables como las 11 h y 15, en donde los valores de Tmrt son superiores a los 56 °C. Mientras que, a las 19 h, se aprecia el descenso de temperatura a lo largo del cañón urbano (28 °C – 32 °C) que finaliza a las 23 h con valores inferiores a los 24 °C.

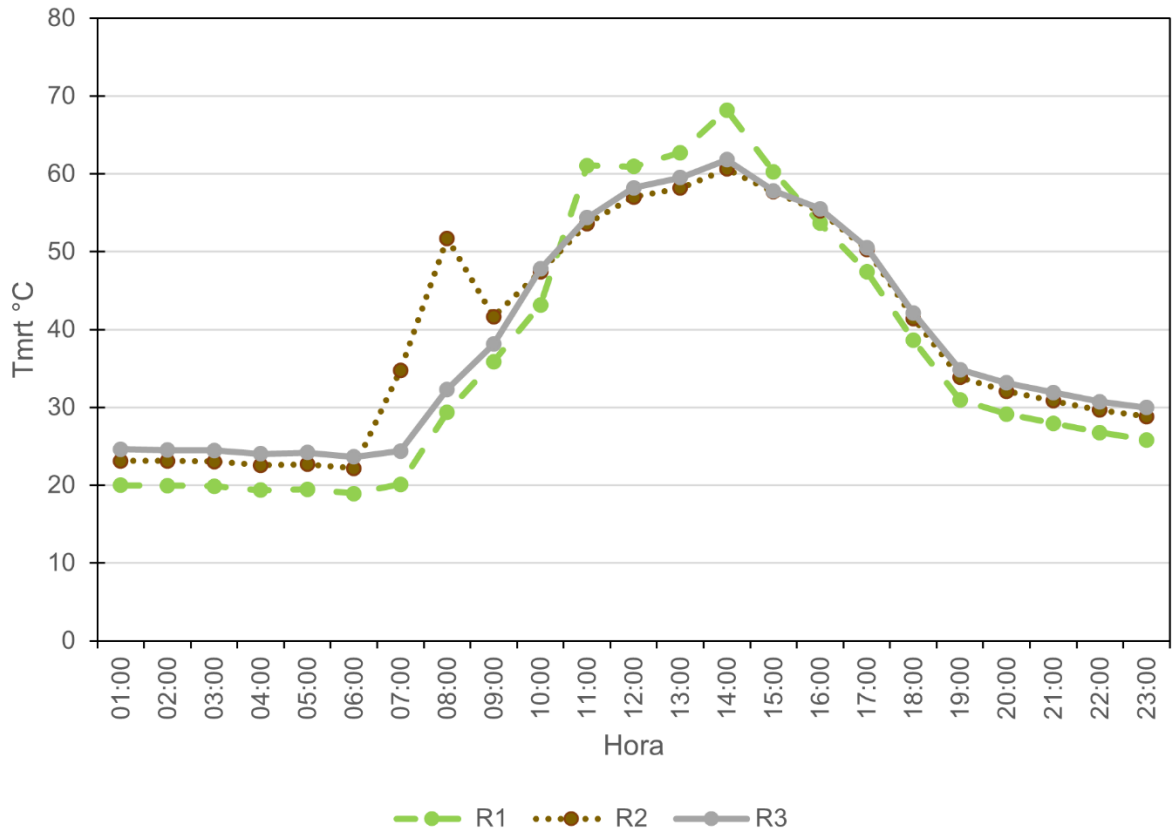
Figura 65

Mapas comparativos de la Tmrt en escenario E1.



Respecto al escenario E2, los valores de Tmrt mínimos se presentan a las 06 h, mientras que a las 14 h es cuando se manifiesta el valor máximo (61.8 °C, en R3). Además, se puede observar que en la Figura 66, las condiciones entre las -01 – 06 h, no presentan cambios drásticos en comparación con el resto del día. Ya que, a partir de las 07 h a las 19 h, la Tmrt presenta variaciones en sus valores, y no es hasta a partir de las 19 h que Tmrt empieza a regularse y presentar pocas variaciones.

Figura 66
Tmrt de E2.

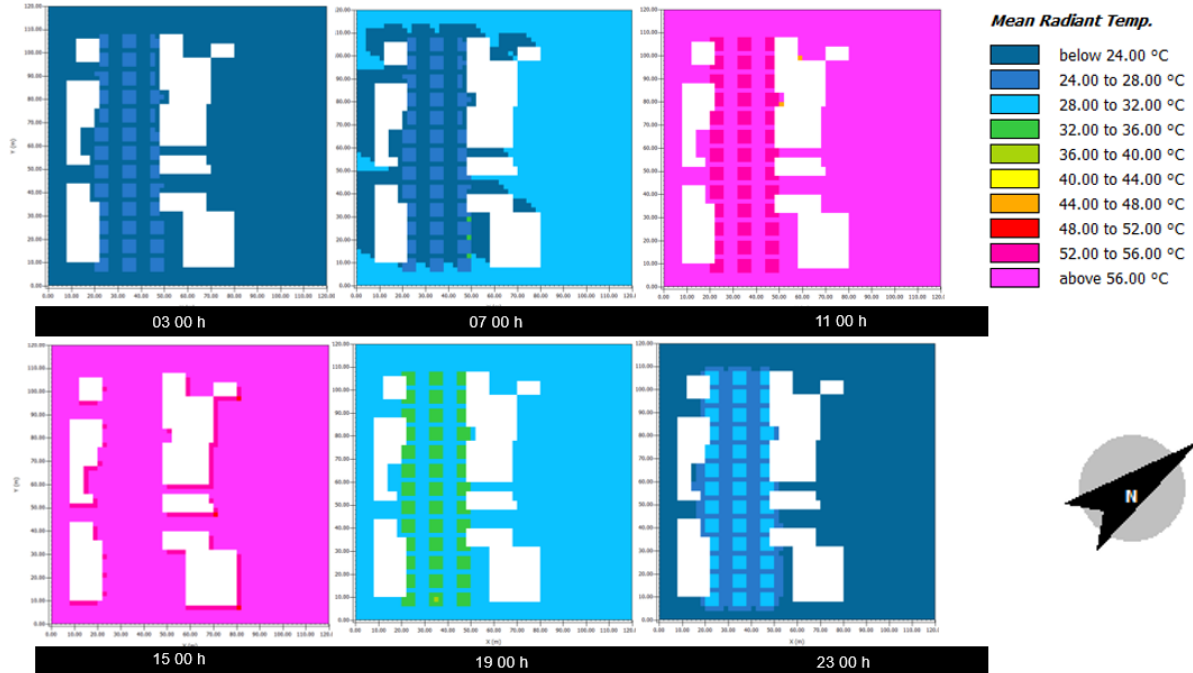


Por otro lado, en la Figura 67, se puede apreciar que a las 03 h la Tmrt se mantiene por debajo de los 24 °C, sin embargo, debajo del dosel de la vegetación la Tmrt mantiene valores que oscilan entre 24 -28 °C, mientras que a las 07 h la temperatura se observa que en la vegetación proyecta sombra que ayuda a mantener los valores de Tmrt por debajo de los 24 °C, a lo largo del cañón, mientras que debajo del dosel se presentan valores que oscilan entre 24 – 28 °C.

Por otra parte, a las 11 h, se puede apreciar que a lo largo del cañón se presentan valores de Tmrt superiores a los 56 °C, no obstante, la vegetación ayuda a reducir estos valores presentando valores que oscilan entre 52 – 56 °C, debajo del dosel del árbol, a diferencia de las 15 h en donde a lo largo del cañón se presentan valores superiores a los 56 °C, pero no se observa la relevancia de la presencia de la vegetación. Finalmente, a las 19 h y 23 h la Tmrt disminuye a lo largo del cañón concentrando debajo del dosel de los árboles un valor de Tmrt superior al presentado en el cañón.

Figura 67

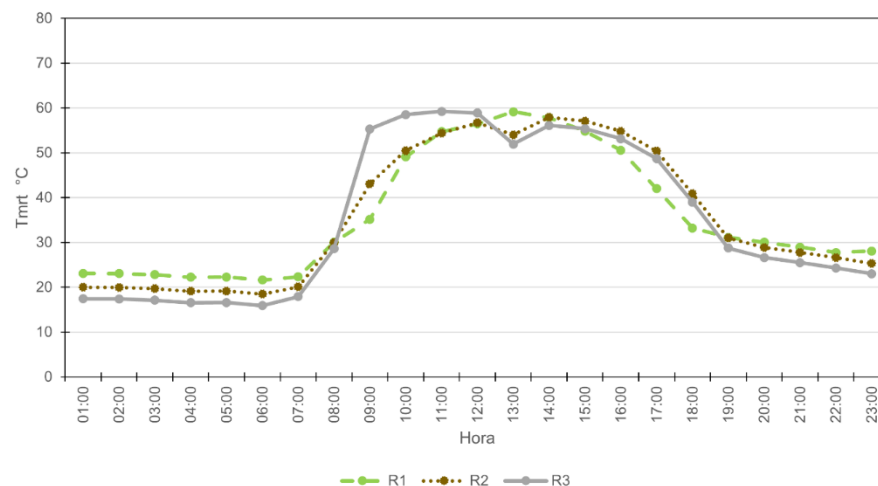
Mapas comparativos de la Tmrt en escenario E2.



En cuanto al escenario E3, los valores de Tmrt mínimos se presentan a las 06 h (15.9 °C, en R3), mientras que a las 11 h es cuando se manifiesta el valor máximo (59.2 °C, en R3). Además, se puede observar que las condiciones entre las -01 – 06 h, (ver Figura 68) no presentan cambios drásticos en comparación con el resto del día. Ya que, a partir de las 07 y hasta las 19 h, la Tmrt presenta variaciones en sus valores, y a partir de 19 h la Tmrt empieza a regularse y presentar pocas variaciones.

Figura 68

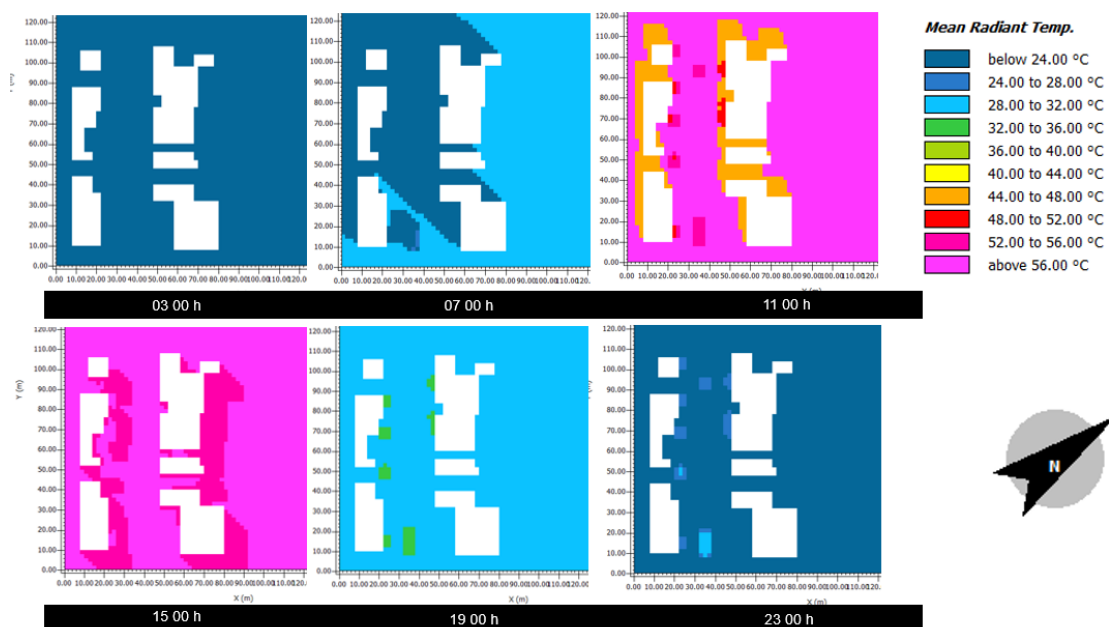
Tmrt de E3.



Por otro lado, en la Figura 69, se puede apreciar que a las 03 h la Tmrt se mantiene por debajo de los 24 °C, mientras que a las 07 h la temperatura se observa que en la parte sureste del cañón la Tmrt oscila entre los 28 – 32 °C, pese a que el resto del cañón no presenta cambios, y mantiene su Tmrt por debajo de los 24 °C. También, se puede observar que a las 11 h y 15, se presentan condiciones críticas ya que a las 11 h a lo largo del cañón las condiciones a lo largo del cañón superan los 56 °C, pese a que a lo largo del lateral derecho del cañón la Tmrt disminuye en las zonas donde se presenta la vegetación por lo que la Tmrt oscila entre los 44 – 52 °C mientras que en el lateral izquierdo la Tmrt oscila entre los 52 – 56 °C, debajo del dosel del árbol. Al contrario de lo anterior, a las 19 h la Tmrt a lo largo del cañón disminuye, sin embargo, en las zonas donde se encuentra la vegetación la Tmrt oscila entre 36 – 40 °C. Finalmente a las 23 h se aprecia que las condiciones de Tmrt disminuyen hasta llegar a un valor inferior a los 24 °C.

Figura 69

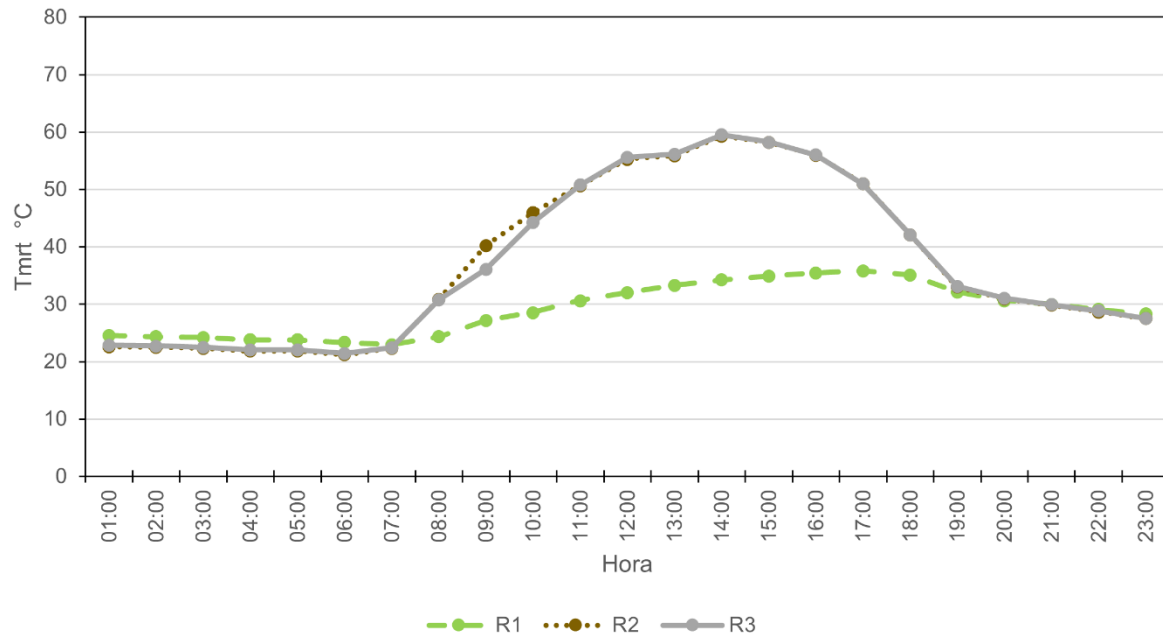
Mapas comparativos de la Tmrt en escenario E3.



En cuanto al escenario E4 (Figura 70), los valores de Tmrt mínimos se presentan a las 06 h (21.4 °C, en R3), mientras que a las 14 h es cuando se manifiesta el valor máximo (59.5 °C, en R3). Además, se puede observar que las condiciones entre las -01 – 07 h, no presentan cambios drásticos en comparación con el resto del

día. Ya que, a partir de las 08 y hasta las 19 h, la Tmrt presenta variaciones en sus valores, y a partir de 19 h la Tmrt empieza a regularse y presentar pocas variaciones.

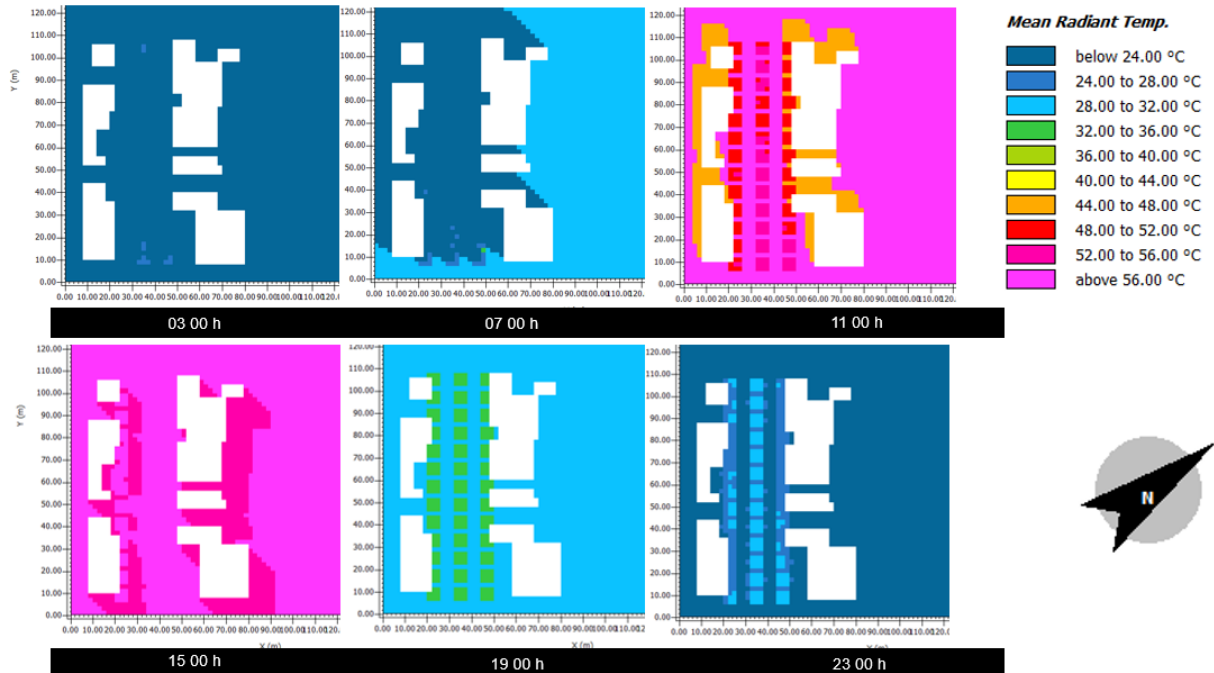
Figura 70
Tmrt de E4.



Por otro lado, en la Figura 71, se puede apreciar que a las 03 h la Tmrt se mantiene por debajo de los 24 °C, mientras que, a las 07 h, se observa que la Tmrt se mantiene debido a la proyección de sombra que las edificaciones y la vegetación del cañón urbano. También, se puede observar que a las 11 h y 15, se presentan condiciones extremas ya que a las 11 h a lo largo del cañón las condiciones a lo largo del cañón superan los 56 °C. sin embargo la diferencia en estos dos escenarios radica en que a las 11 h, se observa que a lo largo de los laterales y camellón del cañón la Tmrt disminuye en las zonas donde se presenta la vegetación por lo que la Tmrt oscila entre los 48 – 56 °C , a diferencia de las 15 h en donde solo se puede apreciar la proyección de la sombra del lateral derecho del cañón que ayuda a reducir la Tmrt en valores que oscilan entre 52 – 56 °C. Finalmente a las 19 h la Tmrt disminuye a lo largo del cañón, sin embargo, en las zonas donde se encuentra la vegetación la Tmrt oscila entre 36 – 40 °C y a las 23 h se aprecia que las condiciones disminuyen hasta llegar a un valor inferior a los 24 °C a lo largo del cañón mientras que debajo del dosel de los árboles la Tmrt alcanza valores entre 24 °C y 32 °C.

Figura 71

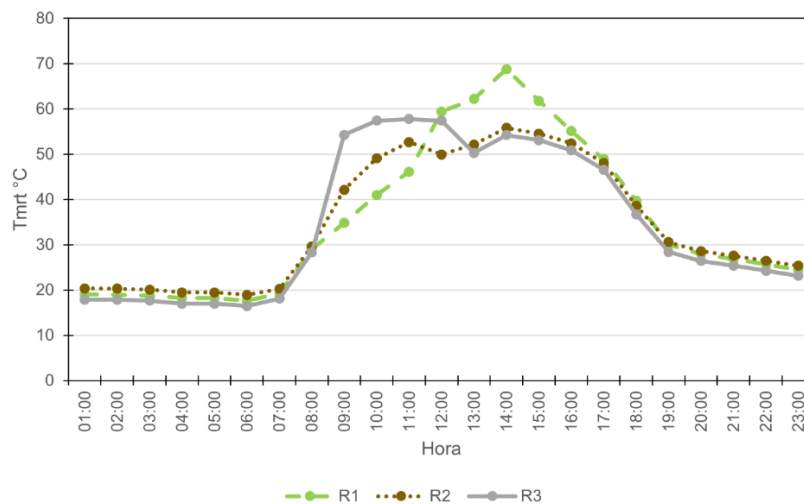
Mapas comparativos de la Tmrt en escenario E4.



Con respecto al escenario E5, los valores de Tmrt mínimos se presentan a las 06 h (17 °C, en R3), mientras que a las 10 h es cuando se manifiesta el valor máximo (57.4 °C, en R3). Además, se puede observar en la Figura 72, que las condiciones entre las 01 – 07 h, no presentan cambios drásticos en comparación con el resto del día. Ya que, a partir de las 08 y hasta las 12 h, la Tmrt presenta sus valores más altos, y a partir de 15 h la Tmrt empieza a descender.

Figura 72

Tmrt de E5

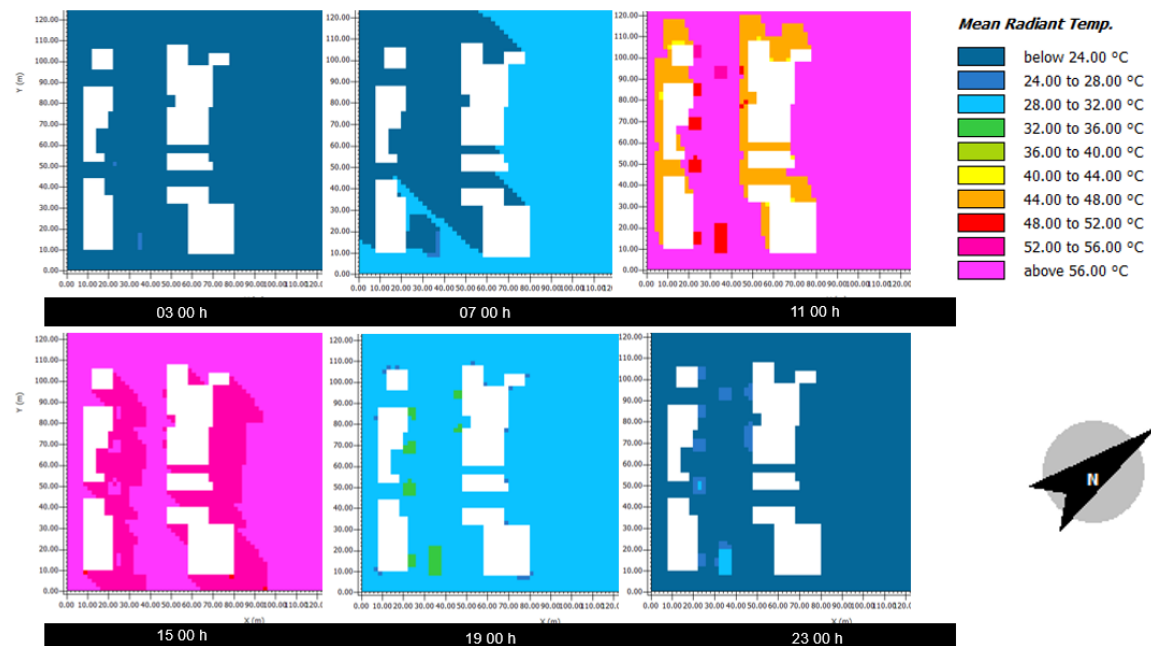


Por otra parte, en la Figura 73, se puede apreciar que a las 03 h la Tmrt se mantiene por debajo de los 24 °C, mientras que, a las 07 h, se observa que la Tmrt se mantiene debido a la proyección de sombra que las edificaciones y la vegetación del cañón urbano, sin embargo, en la parte sur del cañón se aprecia un ligero incremento de Tmrt que oscila entre 28 – 32 °C. También, se puede observar que a las 11 h y 15, se presentan las condiciones más extremas ya que a las 11 h a lo largo del cañón las condiciones superan los 56 °C. Sin embargo, la diferencia en estos dos escenarios radica en que, a las 11 h, se observa que a lo largo del lateral derecho del cañón urbano disminuye la Tmrt (44 – 48 °C), mientras que, en el lateral izquierdo el valor de Tmrt oscila entre los 48 – 52 °C debajo del dosel del árbol.

Por otra parte se puede observar que a las 19 h las condiciones mejoran y la Tmrt alcanza valores entre 28 – 32 °C a lo largo del cañón, mientras que, a las 23 h, la Tmrt se encuentra por debajo de los 24 °C.

Figura 73

Mapas comparativos de la Tmrt en escenario E5.



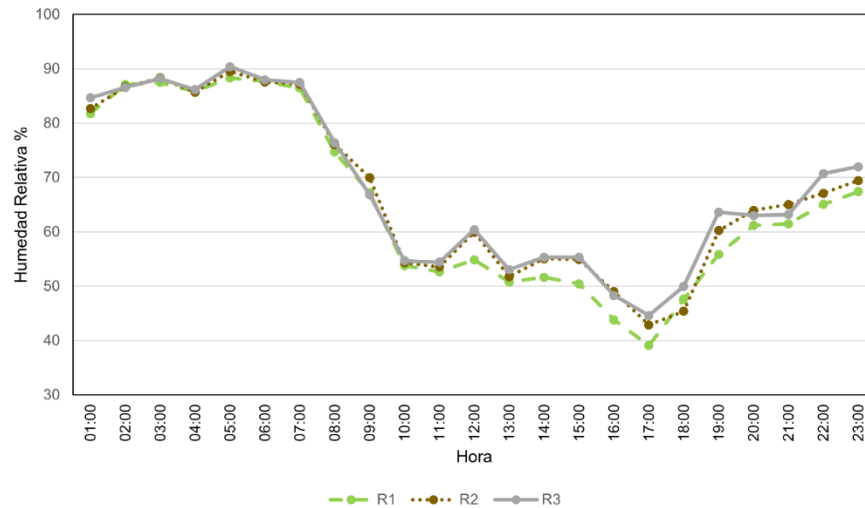
4.4.3. Humedad Relativa

Como puede apreciarse en la Figura 74, referente a los resultados de HR en el EB, los valores más altos de HR se manifiestan desde la 01 h hasta las 07 h, siendo

el valor máximo de 90.4% a las 05 h, y su media es de 67.9%. Se puede observar que a partir de las 08 h los valores comienzan a disminuir hasta alcanzar su valor más bajo de 44.6%, a las 17 h 00.

Figura 74

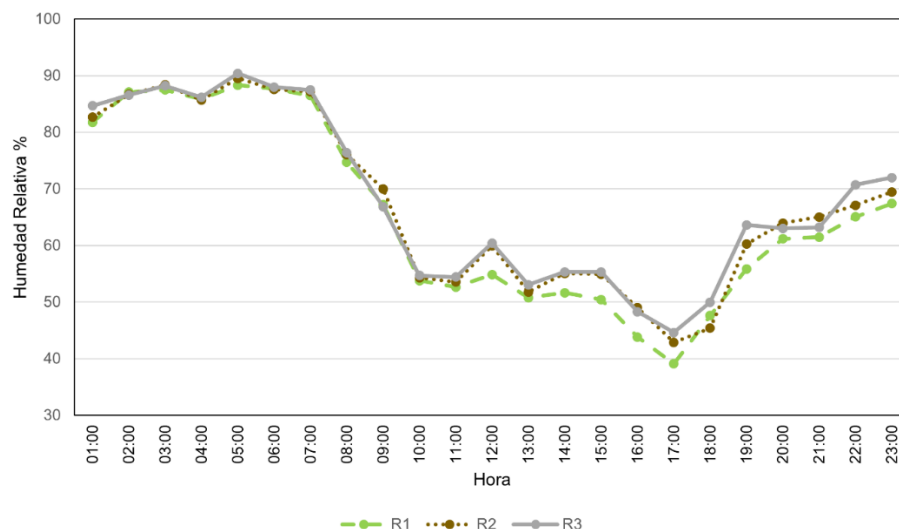
Humedad relativa en el escenario base.



En cuanto a los resultados del escenario E1, se puede apreciar en la Figura 75, que los valores más altos de HR se manifiestan desde la 01 h hasta las 07 h, siendo el valor máximo de 91.8% (R3) a las 06 h, y su media es de 69.5%. Además, se puede observar que a partir de las 08 h los valores comienzan a disminuir hasta alcanzar su valor más bajo de 44.6% (R3), a las 17 h 00.

Figura 75

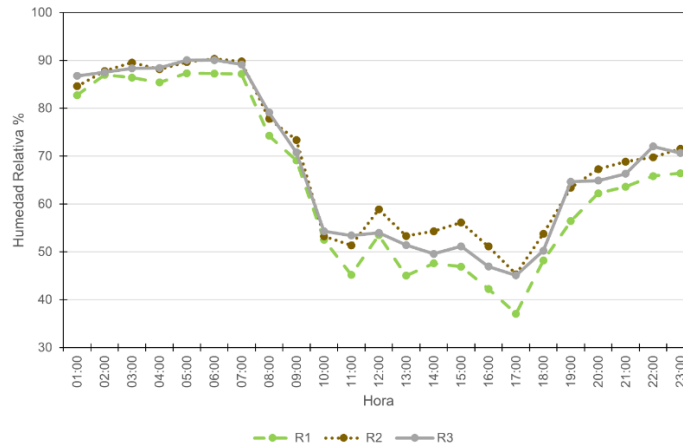
Humedad relativa en el E1.



Por otro lado, la HR del escenario E2, se puede apreciar en la Figura 76, los valores más altos de HR se manifiestan desde la 01 h hasta las 07 h, siendo el valor máximo de 90% (R3) a las 06 h, y su media es de 68%. Además, se puede observar que a partir de las 08 h los valores comienzan a disminuir hasta alcanzar su valor más bajo de 45.1% (R3), a las 17 h 00.

Figura 76

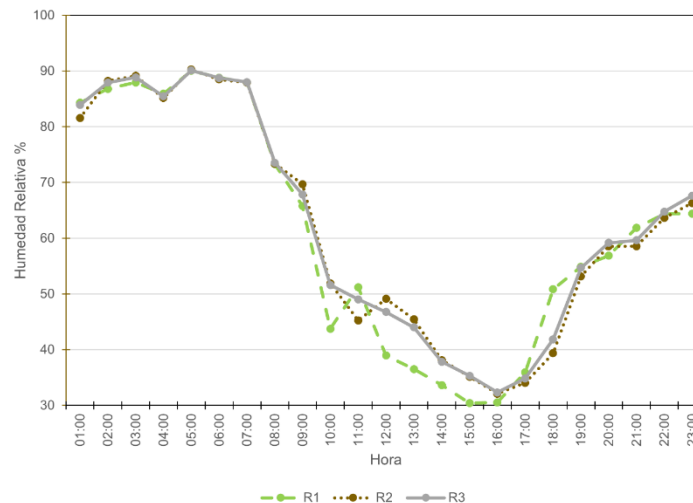
Humedad relativa en el E2.



En cuanto a la HR del escenario E3, se puede observar en la Figura 77, que los valores más altos de HR se manifiestan desde la 01 h hasta las 07 h, siendo el valor máximo de 88.7% (R3) a las 06 h, y su media es de 62.3%. Además, a partir de las 08 h los valores comienzan a disminuir hasta alcanzar su valor mínimo de 32.3% (R3), a las 17 h 00.

Figura 77

Humedad relativa en el E3.



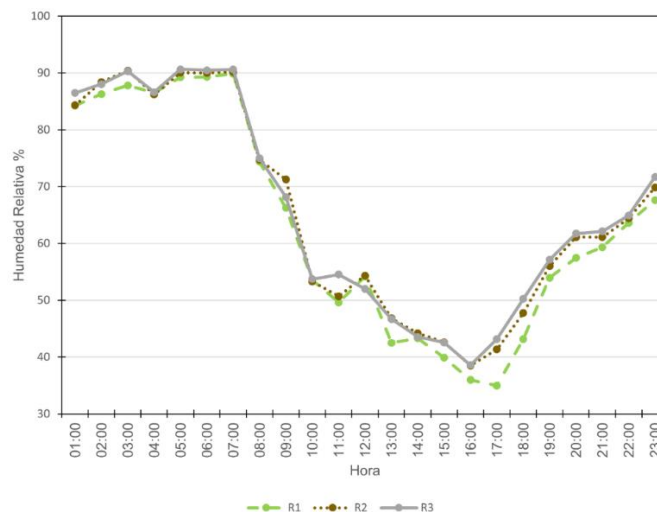
Respecto al escenario E4, se puede observar en la Figura 78, que los valores máximos de HR se manifiestan desde la 01 h hasta las 07 h, siendo el valor máximo de 89.7% (R3) a las 05 h, y su media es de 62.6%. Además, a partir de las 06 h los valores comienzan a disminuir hasta alcanzar su valor mínimo a las 16 h 00.

Figura 78
Humedad relativa en el E4.



Referente al escenario E5, se puede observar en la Figura 79, que los valores máximos de HR se manifiestan desde la 01 h hasta las 07 h, siendo el valor máximo de 90.6% (R3) a las 05 h, y su media es de 65.6%. Además, a partir de las 08 h los valores comienzan a disminuir hasta alcanzar su valor mínimo de 38.5% (R3), a las 16 h 00. En el Apéndice B (mapas de distribución HR) se puede observar a mayor detalle los resultados obtenidos de esta variable.

Figura 79
Humedad relativa en el E5.

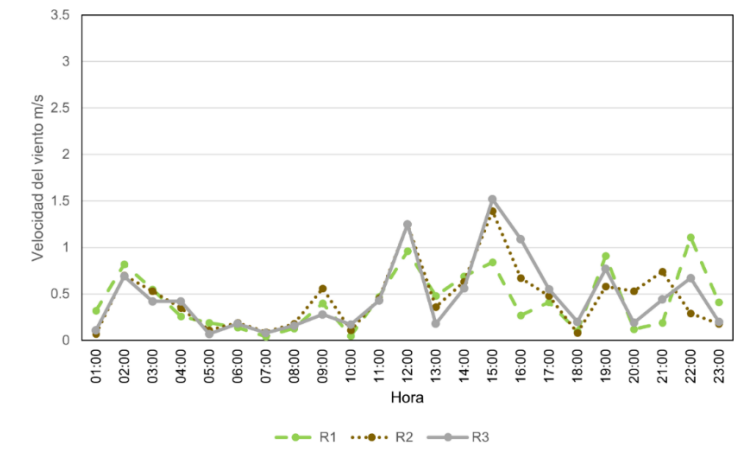


4.4.4. Velocidad del viento

La velocidad del viento referente al escenario EB, se aprecia en la Figura 80, en donde el valor máximo de velocidad del viento se manifiesta a las 13 h, (siendo el valor máximo de 1.5 m/s, en R3), mientras la mínima se presenta a las 07 h (0.1 m/s) y su media es de 0.4 m/s.

Figura 80

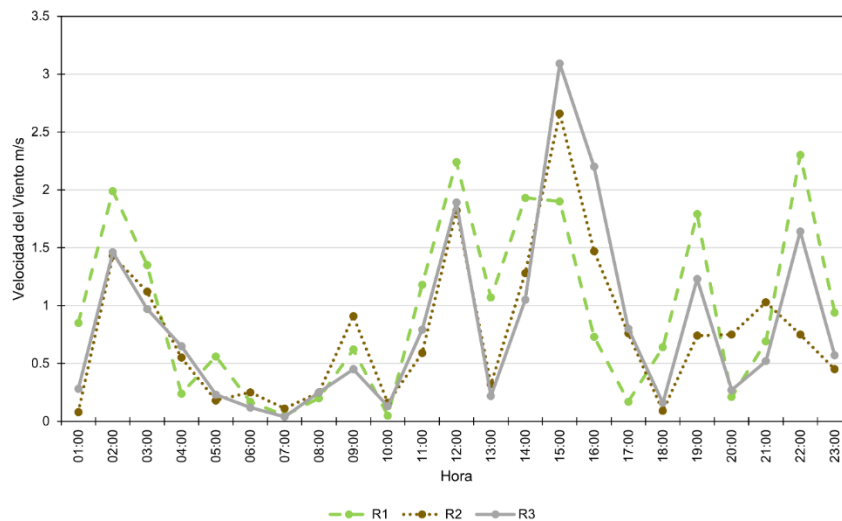
Velocidad del viento en el EB.



La velocidad del viento referente al escenario E1, se aprecia en la Figura 81, en donde el valor máximo de velocidad del viento se manifiesta a las 15 h, (siendo el valor máximo de 3.1 m/s, en R3), mientras que, a las 07 h, no se presentan registro de dinámica de la velocidad del viento. Sin embargo, su media es de 0.8 m/s.

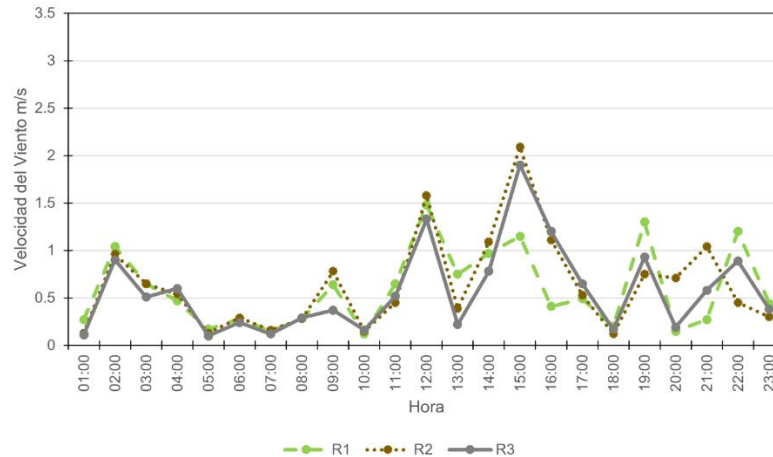
Figura 81

Velocidad del viento en el E1.



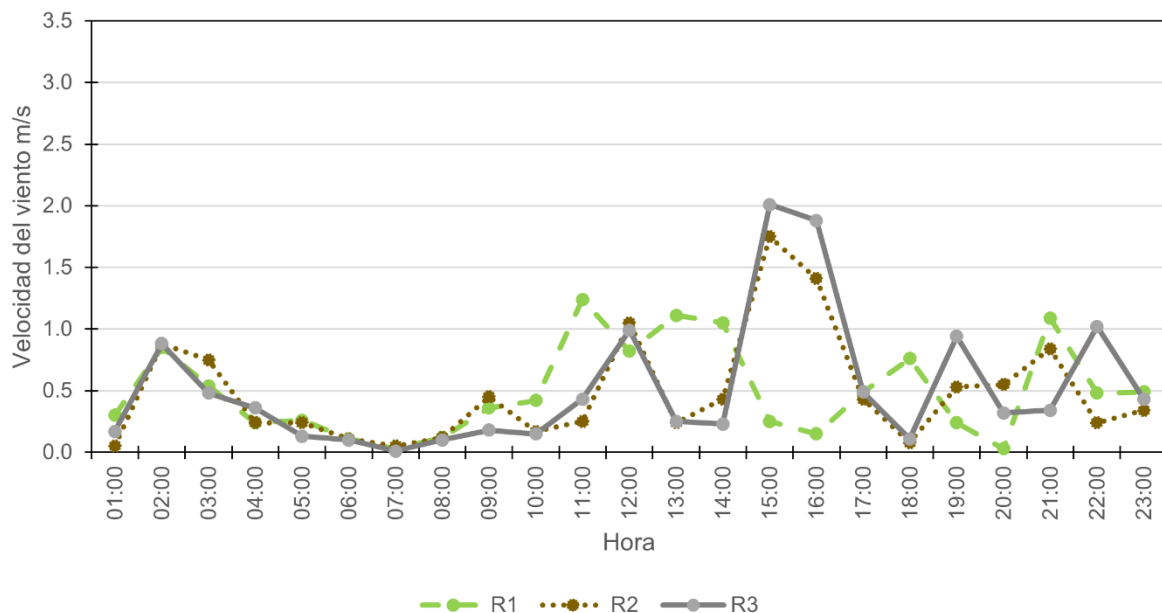
La velocidad del viento referente al escenario E2, se aprecia en la Figura 82, en donde el valor máximo de velocidad del viento se manifiesta a las 12 h, (siendo el valor máximo de 1.3 m/s, en R3), mientras la mínima se presenta a las 01 h (0.1 m/s) y su media es de 0.5 m/s.

Figura 82
Velocidad del viento en el E2.



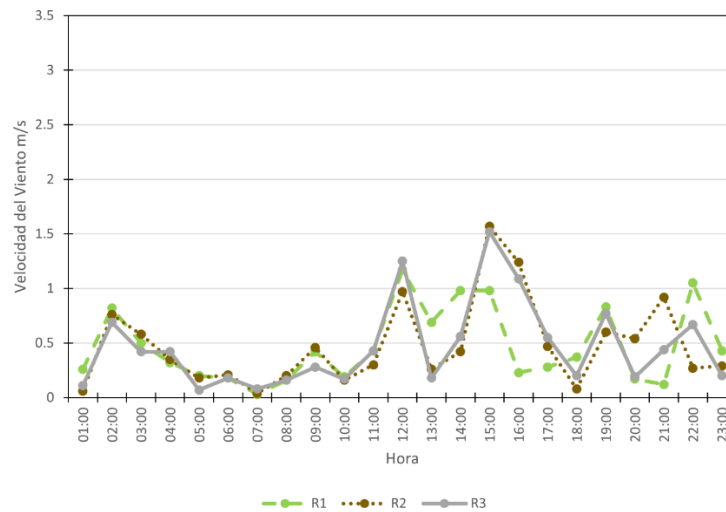
En los resultados del escenario E3, (Figura 83), en donde el valor máximo de velocidad del viento se manifiesta a las 15 h, (siendo el valor máximo de 2 m/s, en R3), mientras la mínima se presenta a las 07 h (0.1 m/s) y su media es de 0.5 m/s.

Figura 83
Velocidad del viento en el E3.



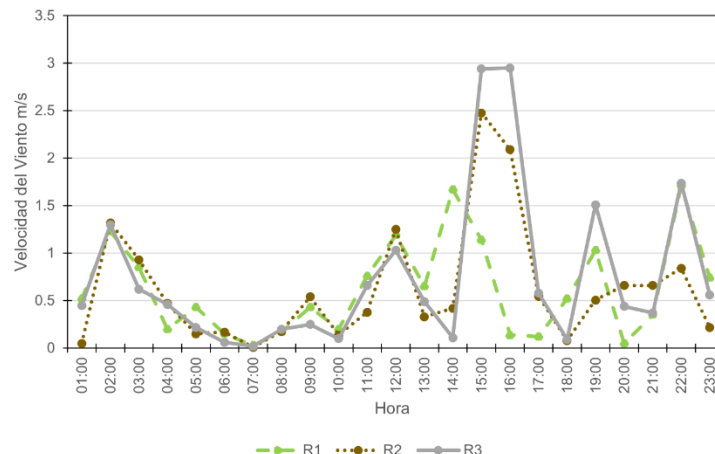
En los resultados del escenario E4, se aprecia en la Figura 84, que el valor máximo de velocidad del viento se manifiesta a las 15 h, (siendo el valor máximo de 1.5 m/s, en R3), mientras la mínima se presenta a las 01 h (0.1 m/s) y su media es de 0.4 m/s.

Figura 84
Velocidad del viento en el E4



En los resultados del escenario E5, (Figura 85), se puede observar que el valor máximo de velocidad del viento se manifiesta a las 16 h, (siendo el valor máximo de 2.9 m/s, en R3), mientras la mínima se presenta a las 06 h (0.1 m/s) y su media es de 0.7 m/s. Para mayor detalle de esta variable se recomienda recurrir al Apéndice C mapas de distribución del viento.

Figura 85
Velocidad del viento en el E5.



4.4.5. Factor del Cielo Visible

Los valores obtenidos del procesamiento de imágenes nos permiten tener resultados preliminares del SVF, en cada uno de los puntos determinados donde se llevó a cabo la recolección de datos, como se puede apreciar en la Tabla 29, los valores del SVF varían según el punto seleccionado de la captura debido a la configuración espacial del sitio.

Tabla 29
Valores del factor de cielo visible.

Campaña	Fotografías ojo de pez del estado actual		SVF
2			0.82
			0.68
			0.83

Para el caso de la segunda campaña de monitoreo se puede apreciar que en la primera fila que corresponde a la primera toma dentro del cañón urbano precisamente a la altura donde se encuentran los receptores el valor de SVF es de 0.82, lo que indica que existe un valor alto de apertura del cielo y por ende un valor que se traduce a un alto nivel de radiación ocasionado por la poca obstrucción del cielo. Por otro lado, en la segunda captura, la cual se realizó al centro del cañón el SVF es menor debido a la obstrucción de vegetación del sitio.

Por último, se aprecia que en la última fila refleja condiciones similares al primer punto, es decir exista poca obstrucción del cielo. Por lo que se puede concluir que el valor de SVF en este cañón tiene las condiciones óptimas para verse afectado por la radiación solar, y el incremento de temperatura, debido a la poca obstrucción por edificación y vegetación que existe en el sitio.

4.5. Discusión

4.5.1. Influencia de las características de la geometría urbana y la vegetación.

Los hallazgos encontrados en este estudio demuestran que los escenarios E2 y E4, (escenarios con aumento del porcentaje de vegetación) no presentan mejoría en la temperatura media del aire, debido a que se identificó un aumento entre 1.4 – 1.7 °C, respecto al EB, esto puede deberse por influencia de la radiación solar. Si bien los dos escenarios (E2 y E4) presentan las mismas condiciones en cuanto al aumento de vegetación, no presentan las mismas condiciones de H/W, por tanto, en el E2, el incremento de temperatura en el aire se deriva de la influencia de la radiación solar mientras que, en el E4, el incremento de temperatura está relacionado con el aumento del porcentaje de superficie construida que da pauta al almacenamiento de calor. Por lo que no solo la relación aspecto del cañón urbano influye en el desempeño de la vegetación, sino que también la orientación toma un papel importante (Sabrin et al., 2021; Srivanit & Jareemit, 2020). Esto coincide con lo expuesto por Lobaccaro et al. (2019) respecto a la influencia de la orientación en cañones de poca altura, ya que determinan que, los cañones urbanos con orientación noroeste - sureste presentan un incremento en el rango de confort térmico en comparación con el resto de las orientaciones evaluadas.

Además, los resultados obtenidos en el E4 coinciden con lo expuesto por Aboelata (2020) ya que señala que los escenarios con relación 1:1 (cañones uniformes) tienden a incrementar la temperatura del aire debido a la profundidad del cañón.

En cuanto a los hallazgos que competen a la relación aspecto se puede apreciar que el escenario que demuestra mayor rendimiento en cuanto a la temperatura media del aire es el E5, debido a que la propuesta de aumentar la relación aspecto del cañón urbano influye en la reducción de la temperatura del aire entre 0.1-0.6 °C, respecto a los demás escenarios propuestos, debido a la influencia de proyección de sombra de las edificaciones, inhibiendo el calentamiento del aire por radiación solar, lo que coincide con lo enunciado en los resultados expuestos por Sanagar Darbani et al. (2021) quienes demuestran en su estudio que el aumento de H/W reduce la exposición solar a las superficies, lo que relaciona la radiación solar con el incremento de temperatura.

4.5.2. Confort térmico (PET)

En cuanto a PET, los hallazgos que se obtuvieron revelaron que los valores son menores durante el transcurso de la madrugada en todos los escenarios, ya que se encuentran valores que de acuerdo a la escala propuesta por Molenaar et al. (2016), indican que existen condiciones de confort en todos los escenarios, por lo que no se observan condiciones de estrés térmico. Mientras que los resultados obtenidos por Galal et al. (2020) demuestran que los valores más bajos de PET se presentaban en cañones urbanos con orientación noroeste- sureste durante la noche. Esto demuestra que en los cañones urbanos con esta orientación las condiciones de confort son exclusivas de condiciones nocturnas cuando la exposición a la radiación solar es nula.

En tanto, en horas críticas (alrededor de las 15 h) las condiciones de PET incrementan hasta 1.8 °C, en el E4 respecto al E3, debido al aumento del 50 % de vegetación, por lo que se identifica que la vegetación propuesta influye en el aumento de PET, coincidiendo con los resultados de Yilmaz et al. (2021) y difiriendo de los resultados obtenidos por Ahmadi Venhari et al. (2019) y Lobaccaro et al. (2019), quienes hacen mención que los beneficios de enfriamiento que proporcionan los árboles son menores en cañones urbanos con orientación noroeste-sureste en comparación con el resto de las orientaciones.

Pese a que los valores de PET entre los escenarios no presentan cambios considerables, si se aprecia una tendencia de que la relación aspecto y la orientación

(geometría del cañón) influye en la reducción de los niveles de PET, lo que coincide con lo expuesto por Sanagar Darbani et al. (2021).

4.5.3. Temperatura radiante media

En cuanto a la T_{mrt} se aprecia que, en el E3, (cañón uniforme), donde el aumento de relación aspecto fue igual al E4, la T_{mrt} media ($R1$) incrementa, esto puede deberse a que no existió aumento de vegetación en el escenario propuesto y, por ende, durante las horas de asoleamiento, la T_{mrt} tiende a incrementarse. Siguiendo con la comparativa del E3 y E4, se puede apreciar que existe una disminución de T_{mrt} media ($R1$) en el E4, lo cual indica que la vegetación funge un papel importante para la proyección de sombra durante el cenit (punto culminante de la esfera celeste). Por lo que, el aumento de vegetación en cañones, ayuda a disminuir la T_{mrt} , durante las críticas, lo que coincide con los hallazgos obtenidos por Ahmadi Venhari et al. (2019), debido a que los elementos de vegetación contribuyen a reducir el campo de visión del SVF, inhibiendo así la T_{mrt} , lo que demuestra que a mayor relación aspecto e incremento de vegetación en el cañón urbano menor T_{mrt} . Confirmado lo señalado por Nasrollahi et al. (2021) de que la T_{mrt} se encuentra complementemente relacionada con el valor de SVF.

Por el contrario, en condiciones nocturnas y vespertinas se puede apreciar que la vegetación presente en el E4, tiende a aumentar los valores de T_{mrt} , debajo del dosel del árbol esto se debe a que durante el día la vegetación impide que la radiación llegue directamente hasta el suelo, mientras que en condiciones nocturnas el calor emitido por el suelo, se refleje de nuevo hacia él, debido al follaje de la vegetación (Sánchez, 2022). Siendo el follaje un factor relevante en la reducción de la radiación de onda larga, (Kwon & Lee, 2019). Sin embargo, en condiciones generales el E4, fue el escenario que presentó menores valores en cuanto a T_{mrt} , lo cual se relaciona directamente con la profundidad del cañón debido a que la altura de las edificaciones aumenta la proyección de sombra en la superficie, que aunado al incremento de la vegetación contribuye a la disminución de T_{mrt} .

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En este apartado se concentran las conclusiones del desarrollo de esta investigación, así como recomendaciones para futuras investigaciones

Esta investigación tuvo como objetivo principal evaluar las configuraciones espaciales y de vegetación en distintas tipologías de cañones urbanos con el propósito de optimizar el confort en cañones urbanos con orientación noroeste - sureste de la ciudad de La Paz, Baja California Sur.

Lo anterior, conlleva a la pregunta de investigación: ¿qué tipo de configuración espacial de un cañón urbano optimiza el nivel de confort? Además, para responder este cuestionamiento se requiere comprender la influencia de la relación aspecto y T_{mrt} , así como el efecto que tiene la vegetación sobre la temperatura del aire, el viento y HR, lo que deriva en las siguientes preguntas:

- 1) - ¿cuál es el efecto que genera el aumento de la relación aspecto del cañón urbano, sobre la T_{mrt} y el SVF?
- 2) - ¿qué efecto tiene el aumento de vegetación en el cañón urbano sobre las variables de temperatura del aire, velocidad del viento y el porcentaje de HR?
- 3) - ¿qué configuración espacial influye de manera positiva sobre la reducción de PET?

5.1. Efecto de la relación aspecto sobre la T_{mrt} y el SVF

Tanto la T_{mrt} y el SVF, reducen a medida de que se aumenta la relación aspecto del cañón urbano, la proyección de sombra que generan las edificaciones sobre el cañón es mayor cuando la relación aspecto se incrementa, debido a que aumenta el porcentaje de superficie sombreada, lo que reduce la radiación solar, asimismo la relación de aspecto también impacta en los valores de SVF, ya que el cielo se ve obstruido, y el ángulo de visión del cielo se reduce, bloqueando la radiación solar entrante. Sin embargo, aumentar la relación de aspecto conlleva a incrementar los porcentajes del área de edificación, lo que genera el aumento de T_{mrt} debido a la absorción y emisión de los materiales de la edificación. No obstante, el incremento de relación aspecto favorece la reducción de T_{mrt} , durante el día, en tanto, durante la noche el incremento de relación aspecto parece retrasar el proceso de enfriamiento.

5.2. Relación entre el aumento de vegetación y las variables ambientales.

En cuanto a la temperatura del aire, al comparar la tendencia del EB con la simulación del resto de los escenarios, se refleja un aumento de la temperatura que va desde las 08 h a las 17 h. Pero al comparar el EB con el E3, se puede apreciar que este escenario, en particular presenta temperaturas inferiores al EB, en los horarios de las 01 – a las 07 h y de las 18 h a las 22, mientras que en el resto del día la temperatura del aire alcanza valores de hasta 44 °C. Por tanto, se puede deducir que aumentar la relación aspecto del cañón (pasar de cañón poco profundo a uniforme) sin modificar las condiciones de vegetación (respecto al EB), reduce la temperatura del aire durante la madrugada y noche, cuando existe un aumento de la HR y la radiación directa es nula.

Sin embargo, en el escenario E4, el cual presenta las mismas condiciones de relación aspecto (cañón uniforme) que el E3, pero presenta un incremento en el porcentaje de la vegetación, las condiciones durante la madrugada fueron similares, presentando valores inferiores al EB.

Por otro lado, durante las horas que van de las 10 h a las 16 h, el E4 el cual presenta aumento de vegetación logra reducir la temperatura del aire en comparación con el E3 en el mismo horario, demostrando que la vegetación tiene un efecto de enfriamiento, durante las horas críticas, en condiciones donde la relación aspecto del cañón es uniforme, esto se debe a que la proyección de sombra de las edificaciones ayuda a reducir la radiación solar.

Caso contrario a lo que pasa en el E2 donde el cañón es poco profundo por lo que se presenta mayor incidencia de radiación solar, aumentando la temperatura en comparación con el EB, esto permite deducir que el aumento de T_{mrt} en el E2, se ve relacionado al aumento de relación aspecto, ya que, al no existir incremento de altura, no se genera proyección de sombra a lo largo del cañón, lo cual para el E2 resulta ser contraproducente presentar condiciones de un cañón poco profundo, debido a que el albedo de la copa del árbol está sujeto a la reflectividad de las hojas a lo largo del día, por lo que la vegetación está expuesta durante mayor tiempo a la radiación solar, por

lo cual la radiación incidente se refleja en repetidas ocasiones entre las hojas provocando un efecto trampa de radiación solar y dando pauta a la presencia de un albedo dinámico, es decir que no presenta los mismos valores a lo largo del día, según lo expuesto por He et al. (2021). En tanto el albedo que presenta la vegetación propuesta (0.18), puede presentar variaciones relacionadas a la incidencia solar, que influyen al incremento de T_{mrt} .

En tanto a la variable de la velocidad del viento, se observó que las condiciones incrementaron en el E2 por encima del EB, mientras que, en el E4, las condiciones permanecieron sin cambios, por lo cual el porcentaje de vegetación propuesto, incrementa la velocidad del viento en cañones poco profundos, mientras que en cañones uniforme se demuestran cambios en la velocidad del viento, esto puede deberse al incremento de H/W .

Por otro lado, el porcentaje de humedad, en el E2, mostró un aumento de 2.1% de HR respecto al EB, mientras que el E4, sufrió una reducción en su porcentaje de humedad del 4.7% en comparación con el EB.

5.3. Configuración espacial óptima para reducir niveles de PET

Un antagonismo presentado, en los resultados de esta investigación, se centran en los valores obtenidos en la T_{mrt} , debido a que los valores fueron sobreestimados, repercutiendo directamente en los valores de PET, esto demuestra que los valores calculados con full forcing, no reflejan las condiciones cercanas para esta variable. Por lo que, a partir de los resultados obtenidos se recomienda complementar la recolección de datos con piranómetros para medir la radiación solar y realizar la validación del modelo, con la finalidad de obtener resultados más certeros.

Pese a lo mencionado anteriormente, los resultados demuestran que los cambios de la morfología urbana y vegetación propuesta tuvieron un impacto en los parámetros de temperatura del aire, T_{mrt} y PET. Por lo que aumentar la relación aspecto y vegetación urbana en los cañones (E3 y E4), muestra mayor rendimiento. Ya que debido al incremento de altura de los edificios se proyectó sombra a lo largo del día en el cañón urbano, por lo que el E4, al presentar también aumento de

vegetación tiene tendencia a mantener una temperatura de PET menor que el resto de los escenarios, hasta poco antes del mediodía, ya que después de esta hora tiende a estar expuesto a altos niveles de radiación solar, que posteriormente repercuten en los resultados expuestos, influenciados por la reducción de albedo.

Mientras que el E3, al no presentar aumento de vegetación permite generar la reflectancia de los materiales en horas críticas, influenciado en gran medida por la obstrucción de radiación solar provocada por el aumento de H/W, lo anterior permite concluir que para condiciones de verano el escenario que mejores condiciones proporciona en cuanto a PET es aquel, en donde se incrementa la relación aspecto a tal grado de tener una relación proporcional en cuanto altura y ancho del cañón (cañones uniformes)

En cuanto a la hipótesis donde se planteó que los cañones urbanos con orientación noroeste -sureste, poco profundos y con aumento del 50% de vegetación (E2) presentaban las condiciones óptimas de confort térmico, queda refutada, ya que debido la radiación solar que se presenta en la zona, ocasionada por la ubicación geográfica de la ciudad, es indispensable incrementar el porcentaje de sombra en los cañones urbanos, refiriéndose así a que la configuración espacial idónea para optimizar los valores de PET, es aquella que relaciona el aumento de relación aspecto.

5.4. Recomendaciones

De acuerdo con el análisis realizado previamente, en donde se identificó la gran influencia que tiene la T_{mrt} en los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes recomendaciones:

- Indagar en los servicios ecosistémicos de la vegetación urbana.
- Comparar los resultados obtenidos de PET con el programa ENVI-met con programas como Rayman, para evaluar el desempeño del índice térmico.
- Considerar el cálculo de otros índices, como el PMV -PPD y UTCI para obtener resultados integrales.
- Es recomendable que para realizar el monitoreo se cuente con el mayor número de equipos disponible para obtener datos más precisos, y colocar el

mismo número de dispositivos en cada una de las aceras del cañón debido a que el proceso de radiación solar es diferente en cada uno de los dos laterales del cañón urbano.

- Se aconseja realizar una mejor distribución de la vegetación a lo largo del cañón para bloquear la radiación solar y reducir el valor de SVF y por ende la T_{mrt} .
- En cañones urbanos que fungan como vialidades primarias y que cuentan con características similares al modelo evaluado, (que presenten una orientación NE-SO, un camellón central y amplias banquetas) se aconseja que la relación aspecto del cañón urbano sea uniforme con la finalidad de proporcionar sombra en la superficie a lo largo del día.

5.5. Futuras investigaciones

Tomando en consideración los resultados de esta investigación en donde la relación aspecto, y la T_{mrt} tiene impactos significativos en el confort térmico de los cañones urbanos, se enuncian algunas recomendaciones para futuras investigaciones:

- Es necesario profundizar en la emitancia y reflectividad de los materiales de la superficie y de cómo esto influye en la demanda energética del sitio, por lo que sería prudente realizar estudios por medio de zonas climáticas locales para estandarizar resultados. Por lo tanto, una pregunta de investigación estaría centrada en ¿cómo influye la orientación de la traza urbana de la ciudad en el incremento de temperatura?, y ¿qué tipo de materiales implican un sobrecalentamiento urbano que contribuye en el incremento de la demanda de energía?
- Considerar un análisis en cuanto a la influencia que tiene la interacción del cañón urbano y los nodos viales que se generan por el cruce con otros cañones urbanos, por lo que realizar un análisis a mayor escala permite un panorama más detallado de la relación entre la morfología de LCZ y la ICU, por lo que una pregunta de investigación estaría enfocada en ¿qué tipo de edificación de edificación y superficie urbana dan pauta al sobrecalentamiento urbano? y ¿cómo influye la configuración de las LCZ en la salud?

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abaas, Z. R. (2020). Impact of development on Baghdad's urban microclimate and human thermal comfort. *Alexandria Engineering Journal*, 59(1), 275–290. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.12.040>
- Abdollahzadeh, N., & Biloria, N. (2020a). Outdoor thermal comfort: Analyzing the impact of urban configurations on the thermal performance of street canyons in the humid subtropical climate of Sydney. *Frontiers of Architectural Research*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.11.006>
- Abdollahzadeh, N., & Biloria, N. (2020b). Outdoor thermal comfort: Analyzing the impact of urban configurations on the thermal performance of street canyons in the humid subtropical climate of Sydney. *Frontiers of Architectural Research*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.11.006>
- Abdollahzadeh, N., & Biloria, N. (2021). Outdoor thermal comfort: Analyzing the impact of urban configurations on the thermal performance of street canyons in the humid subtropical climate of Sydney. *Frontiers of Architectural Research*, 10(2), 394–409. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.11.006>
- Abdulateef, M. F., & Al-alwan, H. A. S. (2022). The effectiveness of urban green infrastructure in reducing surface urban heat island Baghdad city as a case study. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(1), 101526. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.06.012>
- Aboelata, A. (2020). Vegetation in different street orientations of aspect ratio (H/W 1:1) to mitigate UHI and reduce buildings' energy in arid climate. *Building and Environment*, 172(October 2019), 106712. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106712>
- Aboelata, A., & Sodoudi, S. (2019). Evaluating urban vegetation scenarios to mitigate urban heat island and reduce buildings' energy in dense built-up areas in Cairo. *Building and Environment*, 166(September), 106407. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106407>
- Aboelata, A., & Sodoudi, S. (2020). Evaluating the effect of trees on UHI mitigation and reduction of energy usage in different built up areas in Cairo. *Building and Environment*, 168(October 2019), 106490. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106490>
- 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(November 2020), 100775. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100775>
- Aflaki, A., Mirnezhad, M., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Omrany, H., Wang, Z. H., & Akbari, H. (2017). Urban heat island mitigation strategies: A state-of-the-art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong Kong. *Cities*, 62, 131–145. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.09.003>
- Ahmad, K., Khare, M., & Chaudhry, K. K. (2005). Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections - A review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(9), 697–717. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2005.04.002>
- Ahmadi Venhari, A., Tenpierik, M., & Taleghani, M. (2019). The role of sky view factor and urban street greenery in human thermal comfort and heat stress in a desert climate. *Journal of Arid Environments*, 166(July 2018), 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.04.009>
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2007). Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar Energy*, 81(6), 742–754.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.10.007>

- Ali, M. H., & Abustan, I. (2014). A new novel index for evaluating model performance. *Journal of Natural Resources and Development*, 2002, 1–9. <https://doi.org/10.5027/jnrd.v4i0.01>
- Alobaydi, D., Bakarman, M. A., & Obeidat, B. (2016). The Impact of Urban Form Configuration on the Urban Heat Island: The Case Study of Baghdad, Iraq. *Procedia Engineering*, 145, 820–827. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.107>
- Aminipouri, M., Knudby, A. J., Krayenhoff, E. S., Zickfeld, K., & Middel, A. (2019). Modelling the impact of increased street tree cover on mean radiant temperature across Vancouver's local climate zones. *Urban Forestry and Urban Greening*, 39(July 2018), 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.01.016>
- Ang, Y. Q., Berzolla, Z. M., & Reinhart, C. F. (2020). From concept to application: A review of use cases in urban building energy modeling. *Applied Energy*, 279, 115738. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115738>
- ANSI/ASHRAE_55. (2017). Thermal environmental conditions for human occupancy. *ASHRAE Standard*, 7(55).
- Aram, F., Higuera García, E., Solgi, E., & Mansournia, S. (2019). Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon*, 5(4), e01339. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339>
- Ayuntamiento, H. (2018). *Plan Municipal de Desarrollo, La Paz 2018-2021*. 1.
- Barakat, A., Ayad, H., & El-Sayed, Z. (2017). Urban design in favor of human thermal comfort for hot arid climate using advanced simulation methods. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 533–543. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.04.008>
- Bartesaghi Koc, C., Osmond, P., & Peters, A. (2018). Evaluating the cooling effects of green infrastructure: A systematic review of methods, indicators and data sources. *Solar Energy*, 166(February), 486–508. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.008>
- bcsnoticias. (2019). *La Paz está que arde: rompe récords por su calor en México; llegó a los 53 °C este sábado - BCS Noticias*. BCS Noticias. <https://www.bcsnoticias.mx/la-paz-esta-que-arde-rompe-records-por-su-calor-en-mexico-llego-a-los-53°C-este-sabado/>
- Bhaskar, D. E., & Mukherjee, M. (2017). Optimizing street canyon orientation for Rajarhat Newtown, Kolkata, India. *Environmental and Climate Technologies*, 21(1), 5–17. <https://doi.org/10.1515/rtuect-2017-0012>
- Bruse, M. (1999). *Die Auswirkungen kleinskaliger Umweltgestaltung auf das Mikroklima*. 192. <http://e-docs.geo-leo.de/handle/11858/00-1735-0000-0001-3248-5>
- Chatterjee, S., Khan, A., Dinda, A., Mithun, S., Khatun, R., Akbari, H., Kusaka, H., Mitra, C., Bhatti, S. S., Doan, Q. Van, & Wang, Y. (2019). Simulating micro-scale thermal interactions in different building environments for mitigating urban heat islands. *Science of the Total Environment*, 663, 610–631. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.299>
- Chen, L., & Ng, E. (2013). Simulation of the effect of downtown greenery on thermal comfort in subtropical climate using PET index: A case study in Hong Kong. *Architectural Science Review*, 56(4), 297–305. <https://doi.org/10.1080/00038628.2012.684871>
- Colunga, M. L., Cambrón-Sandoval, V. H., Suzán-Azpiri, H., Guevara-Escobar, A., & Luna-Soria, H. (2015). The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Querétaro city, Mexico. *Atmosfera*, 28(3), 205–218. <https://doi.org/10.20937/ATM.2015.28.03.05>

- Coutts, A. M., White, E. C., Tapper, N. J., Beringer, J., & Livesley, S. J. (2016). Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(1–2), 55–68. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1409-y>
- Davtalab, J., Deyhimi, S. P., Dessi, V., Hafezi, M. R., & Adib, M. (2020). The impact of green space structure on physiological equivalent temperature index in open space. *Urban Climate*, 31(December 2019), 100574. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100574>
- Deng, J. Y., & Wong, N. H. (2020). Impact of urban canyon geometries on outdoor thermal comfort in central business districts. *Sustainable Cities and Society*, 53(November 2019), 101966. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101966>
- Domingo, F., Villagarcía, L., & Were, A. (2003). ¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?: Estado actual y evolución. *Ecosistemas*, 12(1).
- Duarte, D. H. S., Shinzato, P., Gusson, C. dos S., & Alves, C. A. (2015). The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. *Urban Climate*, 14, 224–239. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.09.006>
- Fang, H., & Liang, S. (2014). Leaf Area Index Models. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (Issue January). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.09076-x>
- Farhadi, H., Faizi, M., & Sanaieian, H. (2019). Mitigating the urban heat island in a residential area in Tehran: Investigating the role of vegetation, materials, and orientation of buildings. *Sustainable Cities and Society*, 46(January), 101448. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101448>
- Ferrando, M., & Causone, F. (2019). *An overview of urban building energy modelling (UBEM) tools Energy Department, Politecnico di Milano, Milano, Italy Urban modelling approaches*. 3452–3459.
- Galal, O. M., Mahmoud, H., & Sailor, D. (2020). Impact of evolving building morphology on microclimate in a hot arid climate. *Sustainable Cities and Society*, 54(December 2019), 102011. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.102011>
- Gámez, A. E., Geiger, A., Ivanova, A., Trasviña, A., Muhlia, A., Breceda, A., Lluch, D., Romero, E., Reyes, H., Wurl, J., Angeles, M., Cariño, M., Arizpe, O., Lluch, S., Díaz, S., Gamez, A., Geigner, A., De la Toba, D., Diaz, S., & Zenteno, T. (2012). *Plan Estatal de Acción ante el Cambio Climático para Baja California Sur*.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. In *Instituto de Geografía Universidad Nacional Autónoma de México*. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1xxv3n.2>
- Golasi, I., Salata, F., de Lieto Vollaro, E., & Coppi, M. (2018). Complying with the demand of standardization in outdoor thermal comfort: a first approach to the Global Outdoor Comfort Index (GOCI). In *Building and Environment* (Vol. 130). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.021>
- He, Y., Lin, E. S., Yu, Z., Tan, C. L., Tan, P. Y., & Wong, N. H. (2021). The effect of dynamic albedos of plant canopy on thermal performance of rooftop greenery: A case study in Singapore. *Building and Environment*, 205(April), 108247. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108247>
- Heaviside, C., Macintyre, H., & Vardoulakis, S. (2017). The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. *Current Environmental Health Reports*, 4(3), 296–305.

<https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>

- Hegazy, I. R., & Qurnfulah, E. M. (2020). Thermal comfort of urban spaces using simulation tools exploring street orientation influence of on the outdoor thermal comfort: A case study of Jeddah, Saudi Arabia. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 15(4), 594–606. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa028>
- Hernández, R. (2014). Metodología de la Investigación. In *Mc Graw Hill Education* (Mc Graw Hi, Vol. 1).
- Hong, T., Chen, Y., Luo, X., Luo, N., & Lee, S. H. (2020). Ten questions on urban building energy modeling. *Building and Environment*, 168(October 2019), 106508. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106508>
- Hoppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71–75.
- Howard, L. (1833). *The climate of London*. III, 458.
- Hu, C. B., Zhang, F., Gong, F. Y., Ratti, C., & Li, X. (2020). Classification and mapping of urban canyon geometry using Google Street View images and deep multitask learning. *Building and Environment*, 167(May 2019), 106424. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106424>
- Hwang, R. L., Lin, T. P., & Matzarakis, A. (2011). Seasonal effects of urban street shading on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment*, 46(4), 863–870. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.017>
- Iain, S. (2019). Why should urban heat island researchers study history? *Urban Climate*, 30(May), 100484. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100484>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático | Gobierno | gob.mx. (n.d.). Retrieved December 8, 2020, from <https://www.gob.mx/inecc>
- ISO_9920. (2008). *International Standard Iso*.
- ISO-10551. (1995). *Ergonomics of the thermal environment - Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales Ergonomie*. 1995.
- ISO-7726. (1998). *Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities. Ergonomics*, 1998.
- Jamei, E., & Rajagopalan, P. (2019). Effect of street design on pedestrian thermal comfort. *Architectural Science Review*, 62(2), 92–111. <https://doi.org/10.1080/00038628.2018.1537236>
- Jamei, Ossen, D. R., Seyedmahmoudian, M., Sandanayake, M., Stojcevski, A., & Horan, B. (2020). Urban design parameters for heat mitigation in tropics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134(September), 110362. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110362>
- Jareemit, D., & Srivanit, M. (2019). Effect of Street Canyon Configurations and Orientations on Urban Wind Velocity in Bangkok Suburb Areas. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 690(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/690/1/012006>
- Jiang, Y., Song, D., Shi, T., & Han, X. (2018). Adaptive analysis of green space network planning for the cooling effect of residential blocks in summer: A case study in Shanghai. *Sustainability (Switzerland)*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/su10093189>

- Kaluarachichi, T. U. N., Tjoelker, M. G., & Pfautsch, S. (2020). Temperature reduction in urban surface materials through tree shading depends on surface type not tree species. *Forests*, 11(11), 1–14. <https://doi.org/10.3390/f11111141>
- Karimi, A., Sanaieian, H., Farhadi, H., & Norouzian-Maleki, S. (2020). Evaluation of the thermal indices and thermal comfort improvement by different vegetation species and materials in a medium-sized urban park. *Energy Reports*, 6, 1670–1684. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.06.015>
- Klemm, W., Heusinkveld, B. G., Lenzholzer, S., & van Hove, B. (2015). Street greenery and its physical and psychological impact on thermal comfort. *Landscape and Urban Planning*, 138(February 2018), 87–98. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.009>
- Krüger. (2017). Impact of site-specific morphology on outdoor thermal perception: A case-study in a subtropical location. *Urban Climate*, 21, 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.06.001>
- Krüger, E. L., Minella, F. O., & Rasia, F. (2011). Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. *Building and Environment*, 46(3), 621–634. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.09.006>
- Kumar, P., & Sharma, A. (2020). Study on importance, procedure, and scope of outdoor thermal comfort –A review. *Sustainable Cities and Society*, 61(May), 102297. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102297>
- Kwon, Y. J., & Lee, D. K. (2019). Thermal comfort and longwave radiation over time in urban residential complexes. *Sustainability (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/su11082251>
- Lai, A., Maing, M., & Ng, E. (2017). Observational studies of mean radiant temperature across different outdoor spaces under shaded conditions in densely built environment. *Building and Environment*, 114, 397–409. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.034>
- 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>
- Lai, Guo, D., Hou, Y., Lin, C., & Chen, Q. (2014). Studies of outdoor thermal comfort in northern China. *Building and Environment*, 77, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.026>
- Landsberg, H. E. (1982). The urban climate. In *The urban climate*. <https://doi.org/10.2307/214663>
- Lee, H., Mayer, H., & Chen, L. (2016). Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. *Landscape and Urban Planning*, 148, 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.004>
- Lee, H., Mayer, H., & Kuttler, W. (2020). Impact of the spacing between tree crowns on the mitigation of daytime heat stress for pedestrians inside E-W urban street canyons under Central European conditions. *Urban Forestry and Urban Greening*, 48(December 2019), 126558. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126558>
- Li, X., Zhou, Y., Yu, S., Jia, G., Li, H., & Li, W. (2019). Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings. *Energy*, 174, 407–419. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.183>
- Limona, S. S., Al-hagla, K. S., & El-sayad, Z. T. (2019). Using simulation methods to investigate

- the impact of urban form on human comfort. Case study: Coast of Baltim, North Coast, Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 58(1), 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.02.002>
- Lindberg, F., & Grimmond, C. S. B. (2011). The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: Model development and evaluation. *Theoretical and Applied Climatology*, 105(3), 311–323. <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0382-8>
- Lizárraga, A. L. (2013). La Configuración Urbana de la ciudad de La Paz, Baja California Sur desde la perspectiva de genero. *Tesis*, 1(1). <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2013.06.007>
- Lobaccaro, G., & Acero, J. A. (2015). Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons. *Urban Climate*, 14, 251–267. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.10.002>
- Lobaccaro, G., Acero, J. A., Martinez, G. S., Padro, A., Laburu, T., & Fernandez, G. (2019). Effects of orientations, aspect ratios, pavement materials and vegetation elements on thermal stress inside typical urban canyons. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(19). <https://doi.org/10.3390/ijerph16193574>
- López-Ordóñez, C. F., Roset, J., & Rojas-Cortorreal, G. (2017). Análisis de la radiación solar directa en las calles de barcelona, en base a la relación entre su morfología y vegetación. *Architecture, City and Environment*, 12(34), 45–68. <https://doi.org/10.5821/ace.12.34.4708>
- Manley, G. (1958). On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 84(359), 70–72. <https://doi.org/10.1002/qj.49708435910>
- Matzarakis, A. (2018). *RayMan Pro*.
- Matzarakis, A., Rocco, M., & Najjar, G. (2009). Thermal bioclimate in Strasbourg - The 2003 heat wave. *Theoretical and Applied Climatology*, 98(3–4), 209–220. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0102-4>
- Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - Application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 51(4), 323–334. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0061-8>
- Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2010). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 54(2), 131–139. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0>
- Merino, Á. (2020). *El mapa político de México*. El Orden Mundial. <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/mapa-politico-mexico/>
- Miao, C., Yu, S., Hu, Y., Zhang, H., He, X., & Chen, W. (2020). Review of methods used to estimate the sky view factor in urban street canyons. *Building and Environment*, 168(72), 106497. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106497>
- Middel Ariane, Lukasczyk, J., & Maciejewski, R. (2017). Sky view factors from synthetic fisheye photos for thermal comfort routing—A case study in Phoenix, Arizona. *Urban Planning*, 2(1), 19–30. <https://doi.org/10.17645/up.v2i1.855>
- Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 197, 522–538.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.095>

- Molenaar, R. E., Heusinkveld, B. G., & Steeneveld, G. J. (2016). Projection of rural and urban human thermal comfort in The Netherlands for 2050. *International Journal of Climatology*, 36(4), 1708–1723. <https://doi.org/10.1002/joc.4453>
- Morakinyo, T. E., & Lam, Y. F. (2016). Simulation study on the impact of tree-configuration, planting pattern and wind condition on street-canyon's micro-climate and thermal comfort. *Building and Environment*, 103, 262–275. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.025>
- 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>
- Morakinyo, T. E., Ren, C., Shi, Y., Lau, K. K. L., Tong, H. W., Choy, C. W., & Ng, E. (2019). Estimates of the impact of extreme heat events on cooling energy demand in Hong Kong. *Renewable Energy*, 142, 73–84. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.077>
- Mouada, N., Zemmouri, N., & Meziani, R. (2019). Urban morphology, outdoor thermal comfort and walkability in hot, dry cities: Case study in Sidi Okba, Algeria. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, 7(1), 117–133. https://doi.org/10.14246/IRSPSDA.7.1_117
- Mücke, H. G., & Litvinovitch, J. M. (2020). Heat extremes, public health impacts, and adaptation policy in Germany. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ijerph17217862>
- Muniz-Gaal, L. P., Pezzuto, C. C., Carvalho, M. F. H. de, & Mota, L. T. M. (2020). Urban geometry and the microclimate of street canyons in tropical climate. *Building and Environment*, 169(November 2019). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106547>
- Narvarez, A. M. (2018). *Paleta Vegetal*.
- Nasir, D. S., Pantua, C. A. J., Zhou, B., Vital, B., Calautit, J., & Hughes, B. (2021). Numerical analysis of an urban road pavement solar collector (U-RPSC) for heat island mitigation: Impact on the urban environment. *Renewable Energy*, 164, 618–641. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.107>
- Nasrollahi, N., Namazi, Y., & Taleghani, M. (2021). The effect of urban shading and canyon geometry on outdoor thermal comfort in hot climates: A case study of Ahvaz, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102638. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102638>
- Nastos, P. T., Vassilakis, E., Nastos, M. P. P., Charalampopoulos, I., & Matzarakis, A. (2017). Assessment of continuous sky view factor based on ultra-high resolution natural colour images acquired by remotely piloted airborne systems for applications in an urban area of athens. *International Journal of Remote Sensing*, 38(20), 5814–5829. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1346845>
- Ng, E., Chen, L., Wang, Y., & Yuan, C. (2012). A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and Environment*, 47(1), 256–271. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.014>
- Nouri, A. S., Costa, J. P., & Matzarakis, A. (2017). Examining default urban-aspect-ratios and sky-view-factors to identify priorities for thermal-sensitive public space design in hot-summer Mediterranean climates: The Lisbon case. *Building and Environment*, 126(July), 442–456. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.027>

- Nuruzzaman, M. (2015). Urban Heat Island: Causes, Effects and Mitigation Measures - A Review. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 3(2), 67. <https://doi.org/10.11648/j.ijema.20150302.15>
- Observing System, E. (2021). *Bandas Landsat 8: Combinaciones Y Usos En Imágenes*. 18.06.2021. [https://eos.com/es/blog/bandas-landsat-8/#:~:text=Landsat 8 es un satélite,térmico \(de onda larga\)](https://eos.com/es/blog/bandas-landsat-8/#:~:text=Landsat 8 es un satélite,térmico (de onda larga))
- Oke, T. R. (1981). Canyon Geometry and the Urban Heat Island. *Journal of Climatology*, 1, 237–254.
- Oke, T. R., Johnson, G. T., Steyn, D. G., & Watson, I. D. (1991). Simulation of surface urban heat islands under “ideal” conditions at night part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology*, 56(4), 339–358. <https://doi.org/10.1007/BF00119211>
- Olesen, B. W., & Brager, G. S. (2004). A better way to predict comfort. *ASHRAE Journal*, 46(8), 20–28.
- ONU. (2020). *Día de la Tierra: también hay que aplanar la curva del cambio climático La pandemia del coronavirus, una llamada de atención de la Madre Tierra | Noticias ONU*. ONU News. <https://news.un.org/es/story/2020/04/1473182>
- Oshio, H., Asawa, T., Hoyano, A., & Miyasaka, S. (2015). Estimation of the leaf area density distribution of individual trees using high-resolution and multi-return airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 166, 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.001>
- Ouali, K., Abidi, M. larbi, & El Harrouni, K. (2018). Urban surface albedo as a tool of a bioclimatic design in semi-aride climate: Case of fez. *Proceedings of 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2018*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2018.8702274>
- Ouyang, W., Morakinyo, T. E., & Ng, E. (2019). The Cooling Efficiency of Urban Greenery Coverage in a High-density City. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 329(1), 0–7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/329/1/012043>
- Palme, M. (2021). Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies. In *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-65421-4>
- Paravantis, J., Santamouris, M., Cartalis, C., Efthymiou, C., & Kontoulis, N. (2017). Mortality associated with high ambient temperatures, heatwaves, and the urban heat island in Athens, Greece. *Sustainability (Switzerland)*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/su9040606>
- Patz, J. A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., & Foley, J. A. (2005). Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438(7066), 310–317. <https://doi.org/10.1038/nature04188>
- Piñeiro-Sande, N., Sande, N. P., Martínez Melgar, J. L., Alemparte Pardavila, E., & Rodríguez García, J. C. (2004). Golpe de calor Definición e Incidencia. *Emergencias*, 16, 116–125.
- Potchter, O., Cohen, P., Lin, T. P., & Matzarakis, A. (2018). Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification. *Science of the Total Environment*, 631–632, 390–406. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.276>
- Qaid, A., Lamit, H. Bin, Ossen, D. R., & Rasidi, M. H. (2018). Effect of the position of the visible sky in determining the sky view factor on micrometeorological and human thermal comfort conditions in urban street canyons. *Theoretical and Applied Climatology*, 131(3–4), 1083–

1100. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-2023-3>

- Ridha, S. J. (2018). Effect of Aspect Ratio and Symmetrical Distribution on Urban Design in Baghdad City, and the Impact of Greenery Strategies on improving Outdoor Thermal Comfort. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 151(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/151/1/012035>
- Roy Choudhury, A. K., Majumdar, P. K., & Datta, C. (2011). Factors affecting comfort: human physiology and the role of clothing. In *Improving Comfort in Clothing* (Issue 1985). Elsevier Masson SAS. <https://doi.org/10.1533/9780857090645.1.3>
- Sabrin, S., Karimi, M., Nazari, R., Pratt, J., & Bryk, J. (2021). Effects of Different Urban-Vegetation Morphology on the Canopy-level Thermal Comfort and the Cooling Benefits of Shade Trees: Case-study in Philadelphia. *Sustainable Cities and Society*, 66(September 2020), 102684. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102684>
- Sanagar Darbani, E., Monsefi Parapari, D., Boland, J., & Sharifi, E. (2021). Impacts of urban form and urban heat island on the outdoor thermal comfort: a pilot study on Mashhad. *International Journal of Biometeorology*. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02091-3>
- Sánchez, J. (2022). *Como influye la vegetación en el clima*. Ecología Verde. <https://www.ecologiaverde.com/como-influye-la-vegetacion-en-el-clima-1478.html>
- Santamouris, M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of the Total Environment*, 512–513, 582–598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.060>
- Sharmin, T., Steemers, K., & Matzarakis, A. (2017). Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment. *Sustainable Cities and Society*, 34, 293–308. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.07.006>
- Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street. *Energy and Buildings*, 31(3), 221–235. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(99\)00018-3](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(99)00018-3)
- Shashua-Bar, Potchter, O., Bitan, A., Boltansky, D., & Yaakov, Y. (2009). Microclimate modelling of street tree species effects within the varied urban morphology in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology*, 30(1), 44–57. <https://doi.org/10.1002/joc.1869>
- Skilling, E. J., & Munro, C. (2016). Environmental ergonomics. In *Human Factors in the Chemical and Process Industries: Making it Work in Practice*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803806-2.00016-9>
- Srivanit, M., & Jareemit, D. (2020). Modeling the influences of layouts of residential townhouses and tree-planting patterns on outdoor thermal comfort in Bangkok suburb. *Journal of Building Engineering*, 30(July 2019), 101262. <https://doi.org/10.1016/j.jobeb.2020.101262>
- Stepani, H. M. N., & Emmanuel, R. (2022). How Much Green Is Really “Cool”? Target Setting for Thermal Comfort Enhancement in a Warm, Humid City (Jakarta, Indonesia). *Atmosphere*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/atmos13020184>
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Stone, B., Hess, J. J., & Frumkin, H. (2010). Urban form and extreme heat events: Are sprawling cities more vulnerable to climate change than compact cities? *Environmental*

- Health Perspectives*, 118(10), 1425–1428. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901879>
- Taher, H., Elsharkawy, H., & Newport, D. (2019). The influence of urban green systems on the urban heat island effect in London. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 329(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/329/1/012046>
- Taleghani, M. (2018). Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(October 2016), 2011–2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.010>
- 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>
- Tsoka, S., Leduc, T., & Rodler, A. (2021). Assessing the effects of urban street trees on building cooling energy needs: The role of foliage density and planting pattern. *Sustainable Cities and Society*, 65(December 2020), 102633. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102633>
- Universidad, E. (n.d.). *Catálogo virtual de flora del valle de Aburrá*. <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/>
- Vollmann, F. (2019). *Las ciudades, “causa y solución” del cambio climático* | Noticias ONU. ONU HABITAT. <https://news.un.org/es/story/2019/09/1462322>
- Wang, Y., Berardi, U., & Akbari, H. (2015). The Urban Heat Island Effect in the City of Toronto. *Procedia Engineering*, 118, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.412>
- Wang, Y., Berardi, U., & Akbari, H. (2016). Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada. *Energy and Buildings*, 114, 2–19. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.046>
- Wu, J., Zhang, Y., & Meng, Q. (2013). *Calculation Method of Sky View Factor Based on Rhino -Grasshopper Platform*.
- Yang. (2015). Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a “silver bullet” for mitigating urban heat island? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 830–843. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.092>
- Yang, W., Wong, N. H., & Li, C.-Q. (2016). Effect of Street Design on Outdoor Thermal Comfort in an Urban Street in Singapore. *Journal of Urban Planning and Development*, 142(1), 05015003. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)up.1943-5444.0000285](https://doi.org/10.1061/(asce)up.1943-5444.0000285)
- Yilmaz, S., Mutlu, B. E., Aksu, A., Mutlu, E., & Qaid, A. (2021). Street design scenarios using vegetation for sustainable thermal comfort in Erzurum, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(3), 3672–3693. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10555-z>
- Yin, S., Lang, W., Xiao, Y., & Xu, Z. (2019). Correlative impact of shading strategies and configurations design on pedestrian-level thermal comfort in traditional shophouse neighbourhoods, Southern China. *Sustainability (Switzerland)*, 11(5), 1–26. <https://doi.org/10.3390/su11051355>
- Zhang, L., Zhan, Q., & Lan, Y. (2018). Effects of the tree distribution and species on outdoor environment conditions in a hot summer and cold winter zone: A case study in Wuhan residential quarters. *Building and Environment*, 130(December 2017), 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.014>
- Zheng, B., Bedra, K. B., Zheng, J., & Wang, G. (2018). Combination of tree configuration with street configuration for thermal comfort optimization under extreme summer conditions in

the urban center of Shantou City, China. *Sustainability (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/su10114192>

Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Fnais, M., & Lelieveld, J. (2016). Projected changes in heat wave characteristics in the eastern Mediterranean and the Middle East. *Regional Environmental Change*, 16(7), 1863–1876. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0753-2>

APÉNDICES

En este apartado se incluye información adicional generada en la presente investigación.

Apéndice A. Tabla de comparación de datos monitoreados y simulados

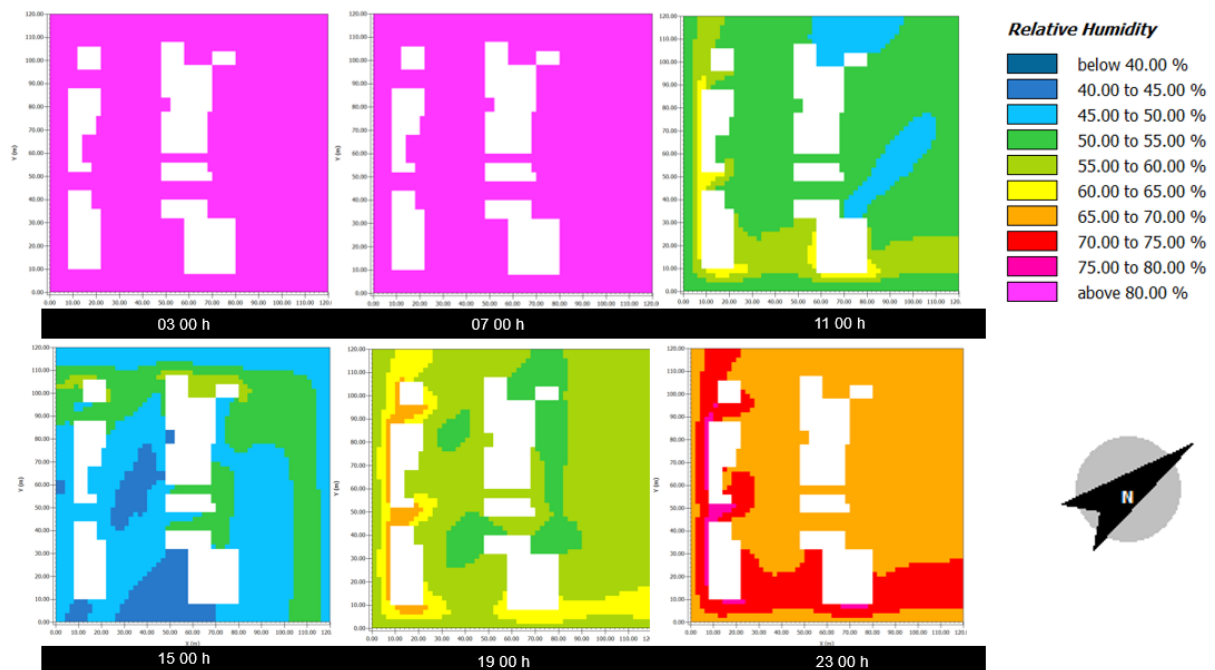
Fecha	Hora	Monitoreado	Simulado	$(X-Y)^2$
07.08.2021	01:00	27.83	27.81	0.00
07.08.2021	02:00	27.28	28.53	1.56
07.08.2021	03:00	27.28	30.44	9.97
07.08.2021	04:00	27.11	30.57	11.95
07.08.2021	05:00	26.89	30.19	10.92
07.08.2021	06:00	26.44	30.23	14.33
07.08.2021	07:00	26.33	28.59	5.09
07.08.2021	08:00	29.44	31.41	3.89
07.08.2021	09:00	31.67	33.27	2.57
07.08.2021	10:00	33.61	35.13	2.31
07.08.2021	11:00	35.61	36.05	0.19
07.08.2021	12:00	36.56	36.67	0.01
07.08.2021	13:00	37.67	37.43	0.06
07.08.2021	14:00	38.72	38.47	0.06
07.08.2021	15:00	39	38.79	0.05
07.08.2021	16:00	39.5	39.24	0.07
07.08.2021	17:00	40.11	39.70	0.17
07.08.2021	18:00	38.67	38.30	0.14
07.08.2021	19:00	34.17	34.02	0.02
07.08.2021	20:00	32.83	32.73	0.01
07.08.2021	21:00	32.11	32.02	0.01
07.08.2021	22:00	31	30.86	0.02
07.08.2021	23:00	30.22	30.04	0.03
			RMSE	1.66

Apéndice B. Mapas de distribución de humedad

En la Figura 1, se observa que los valores máximos de HR se presentan a las 03 y 07 h, mientras que, a las 11 h, las condiciones cambian y disminuye el porcentaje de humedad (50 -55 %), mientras que en la zona sureste el valor es ligeramente mayor (55 -70 %) en comparación con el resto del cañón. A las 15 h las condiciones de humedad se reducen al sureste del cañón (menor a 40 %) mientras que al noroeste del cañón el porcentaje es un poco mayor (55 60 %). También se puede observar que a las 19 h el porcentaje de humedad en el cañón disminuye, e incluso en el lateral izquierdo se pueden apreciar zonas donde el porcentaje de humedad oscila entre 60 – 65 %. Mientras que a las 23 h se incrementa e incluso en la parte sureste se aprecia una zona donde el porcentaje de humedad oscila entre los 70 a 75 % de HR.

Figura 1

Mapas comparativos de humedad relativa en escenario EB

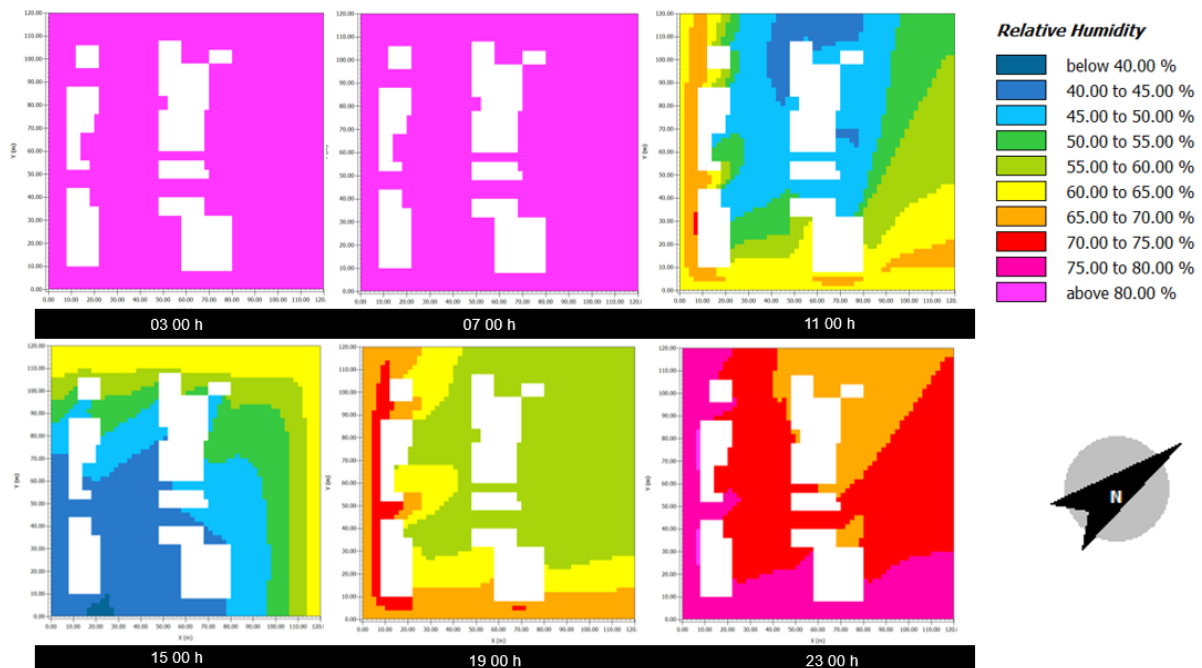


En la Figura 2, se observa que los valores con mayor HR se presentan a las 03 y 07 h, mientras que, a las 11 h, las condiciones varían y disminuye el porcentaje de humedad, en donde se puede observar que predomina un valor que oscila entre 45 - 50 %, sin embargo, en la zona central se aprecia una zona donde la HR oscila entre 50 a 55°C y al sureste la HR oscila entre 60 – 65 %.

En contra parte a las 15 h las condiciones de humedad se reducen, apreciándose en el mapa que los porcentajes de humedad más bajos se concentran al sureste del cañón, mientras que al noroeste los valores se incrementan oscilando entre 60 – 65 También se puede observar que a las 19 h el porcentaje de humedad en el cañón aumenta (55 – 60 %), aunque en el lateral izquierdo los valores de humedad son más altos identificándose valores que oscilan entre 60 – 65 %. Por último, a las 23 h se observa que la HR sigue en ascenso hasta alcanzar valores que oscilan entre los 75 a 80% de HR al sureste del cañón.

Figura 2

Mapas comparativos de humedad relativa en escenario E1



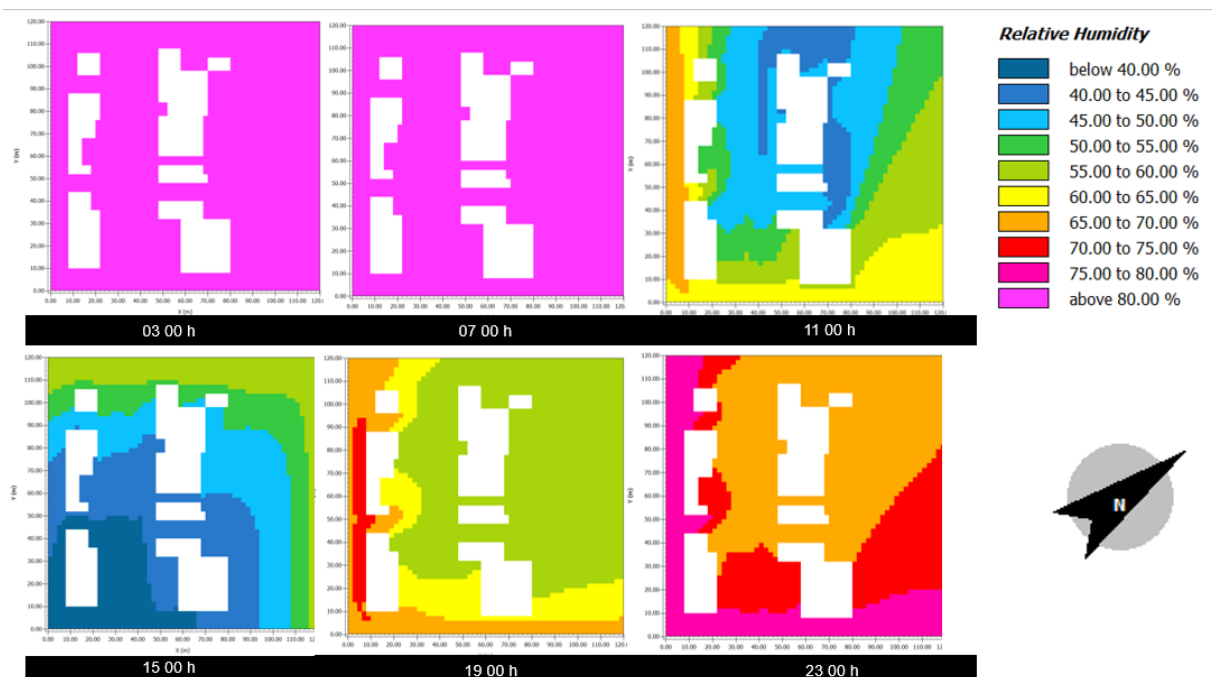
Por otra parte, en la Figura 3, se observa que los valores con mayor HR se presentan a las 03 y 07 h, por tanto, a las 11 h, las condiciones varían y disminuye el porcentaje de humedad, en donde se puede observar que predomina un valor que oscila entre 45 -50 %, sin embargo, en la zona central se aprecia un área donde la humedad relativa oscila entre 50 a 55°C y va incrementando su valor en dirección al sureste (60 – 65 %).

En contra parte a las 15 h las condiciones de humedad se reducen, apreciándose en el mapa que los porcentajes de humedad más bajos se concentran

al sureste del cañón, mientras que al noroeste los valores se incrementan oscilando entre 55 – 60 %. También se puede observar que a las 19 h el porcentaje de humedad en el cañón aumenta (55 – 60 %), sin embargo, en el lateral izquierdo los valores de humedad son más altos identificándose valores que oscilan entre 60 – 65 %. Finalmente, a las 23 h se observa que la HR sigue en ascenso hasta alcanzar valores que oscilan entre los 75 a 80% de HR al sureste del cañón, sin embargo, el porcentaje de humedad que predomina a lo largo del cañón oscila entre 65 a 70 %.

Figura 3

Mapas comparativos de humedad relativa en escenario E2



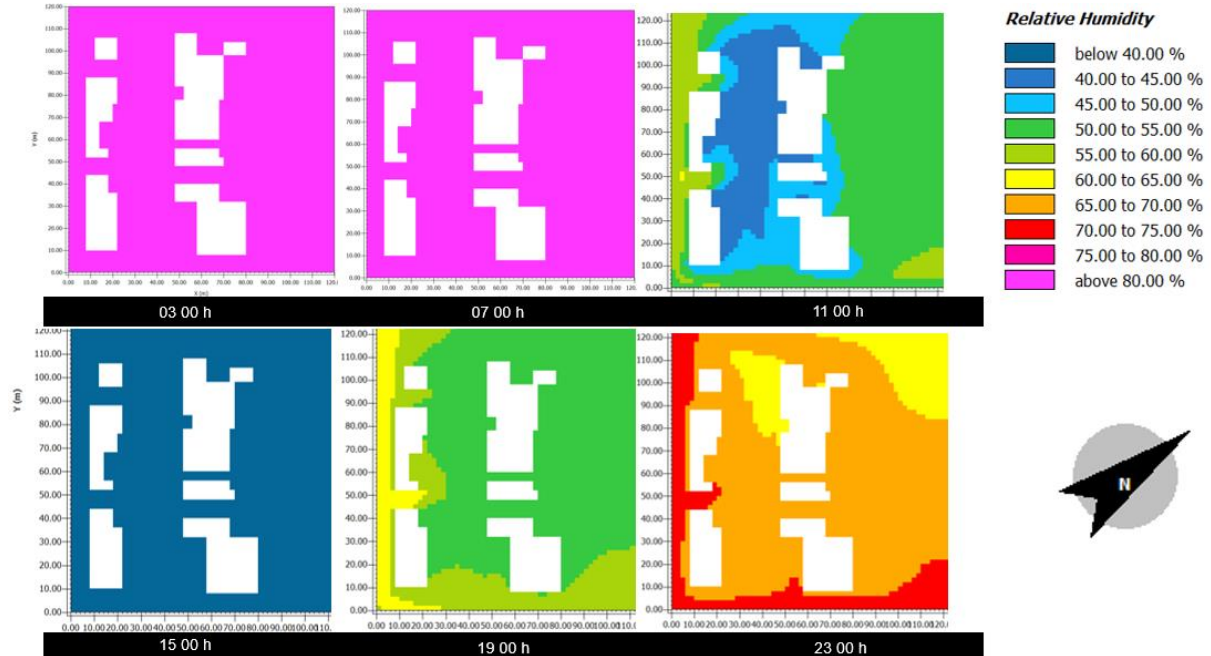
Además, en la Figura 4, se puede apreciar que los valores con mayor HR se presentan a las 03 y 07 h, por tanto, a las 11 h, las condiciones varían y disminuye el porcentaje de humedad, en donde se observa que predomina un valor que oscila entre 45 -50 % al sureste del cañón, mientras que al noroeste del cañón la humedad relativa oscila entre 40 – 45 %.

En cuanto a las 15 h las condiciones de humedad se reducen, apreciándose en el mapa que los porcentajes de humedad alcanzan valores inferiores a 40 %. Sin embargo, a las 19 h el porcentaje de humedad en el cañón aumenta (50 – 55 %), y se identifica que al sureste del cañón la HR oscila entre 55 – 60% sin embargo, a las 23

h se observa que la HR sigue en ascenso hasta alcanzar valores que oscilan entre los 65 a 70% de HR mientras que al noroeste del cañón la HR oscila entre 60 – 65 %.

Figura 4

Mapas comparativos de humedad relativa en escenario E3

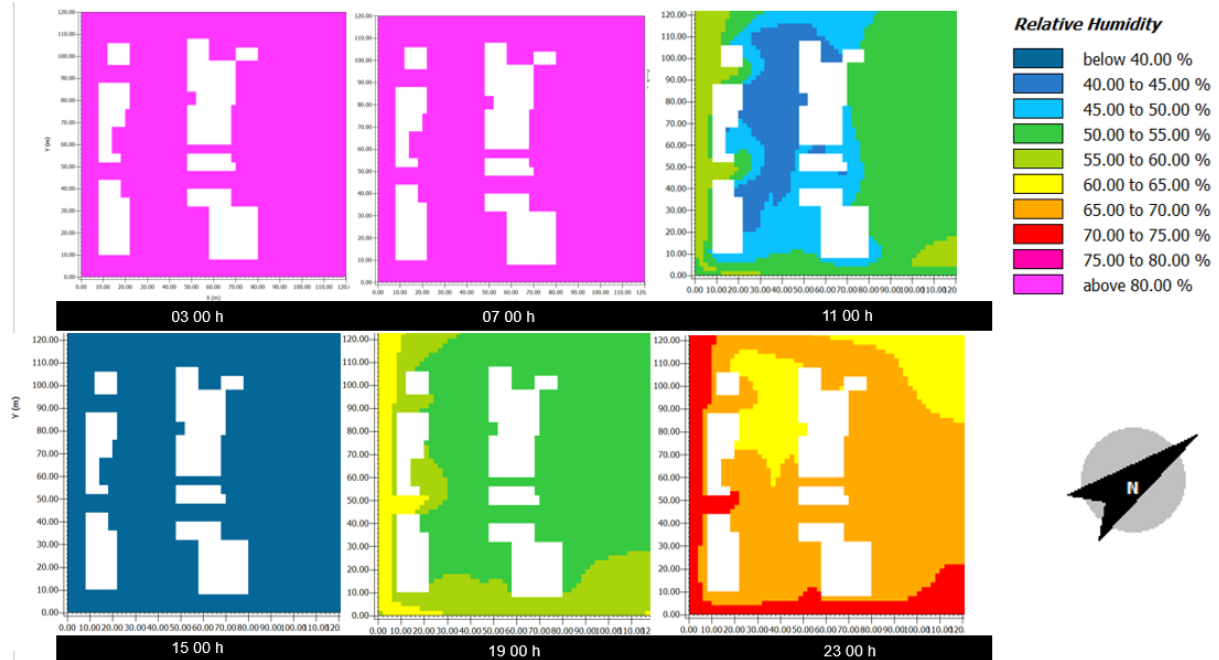


En la Figura 5, se puede apreciar que, a las 03 y 07 h, se presentan los valores con mayor HR , contrario a lo que pasa a las 11 h, en donde las condiciones de HR disminuyen, en donde se observa que predomina un valor que oscila entre 40 -45 % al noroeste del cañón, mientras que al sureste del cañón la HR oscila entre 45 – 50 %.

Por otro lado, a las 15 h las se presentan condiciones de HR por debajo de 40 %. Sin embargo, a las 19 h el porcentaje de humedad en el cañón aumenta (50 – 55 %), y se identifica que, al sureste del cañón, y en la zona central del lateral derecho, que la HR oscila entre 55 – 60%. Finalmente, a las 23 h se observa que la HR aumenta hasta alcanzar valores que oscilan entre los 65 a 70% en la zona central y sureste del cañón mientras que al noroeste la HR oscila entre 60 – 65 %.

Figura 5

Mapas comparativos de humedad relativa en escenario E4.

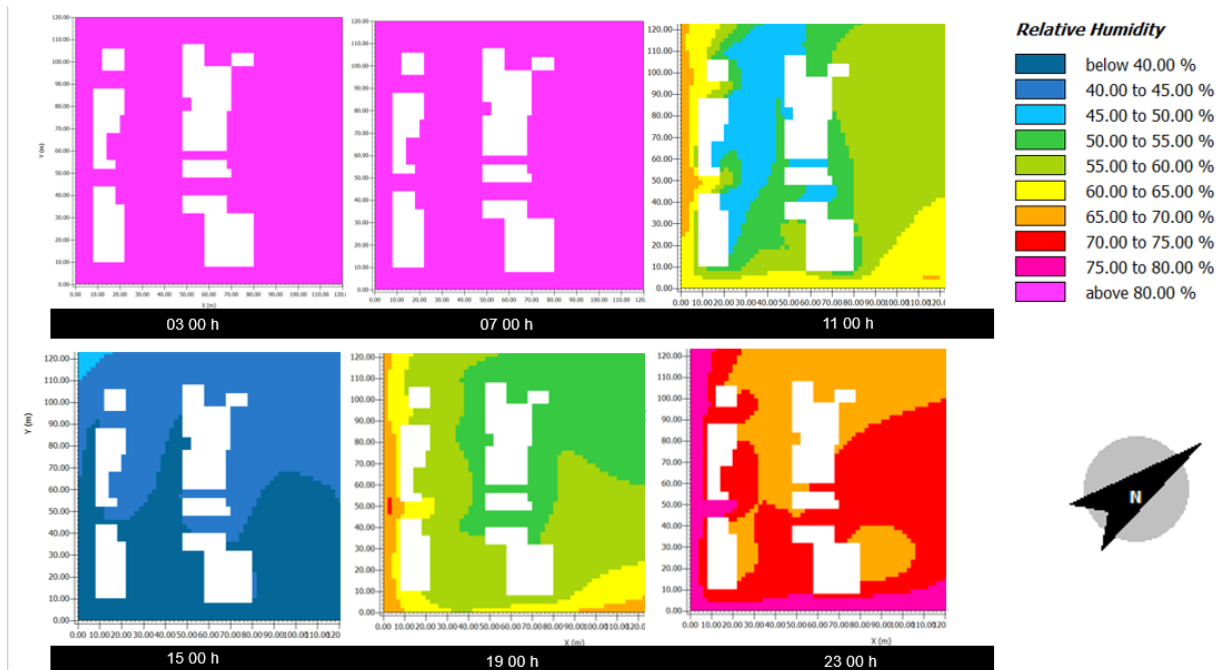


En la Figura 6, se observa que, a las 03 y 07 h, se presentan los valores con mayor HR, mientras que, a las 11 h, las condiciones cambian, debido a que la humedad relativa disminuye, en donde se observa que predomina un valor que oscila entre 45 - 50 % al noroeste del cañón, mientras que al sureste del cañón la HR oscila entre 50 – 60 %.

En tanto, a las 15 h las se presentan condiciones de HR por debajo de 40 % en la zona central y sureste del cañón. Mientras que, a las 19 h el porcentaje de humedad en el cañón aumenta (55 – 60 %) a lo largo del lateral izquierdo, mientras que en la zona central y noroeste del lateral derecho se aprecia un área donde la HR oscila entre 50 – 55. Finalmente, a las 23 h se observa que la HR aumenta hasta alcanzar valores que oscilan entre los 65 a 75%.

Figura 6

Mapas comparativos de humedad relativa en escenario E5

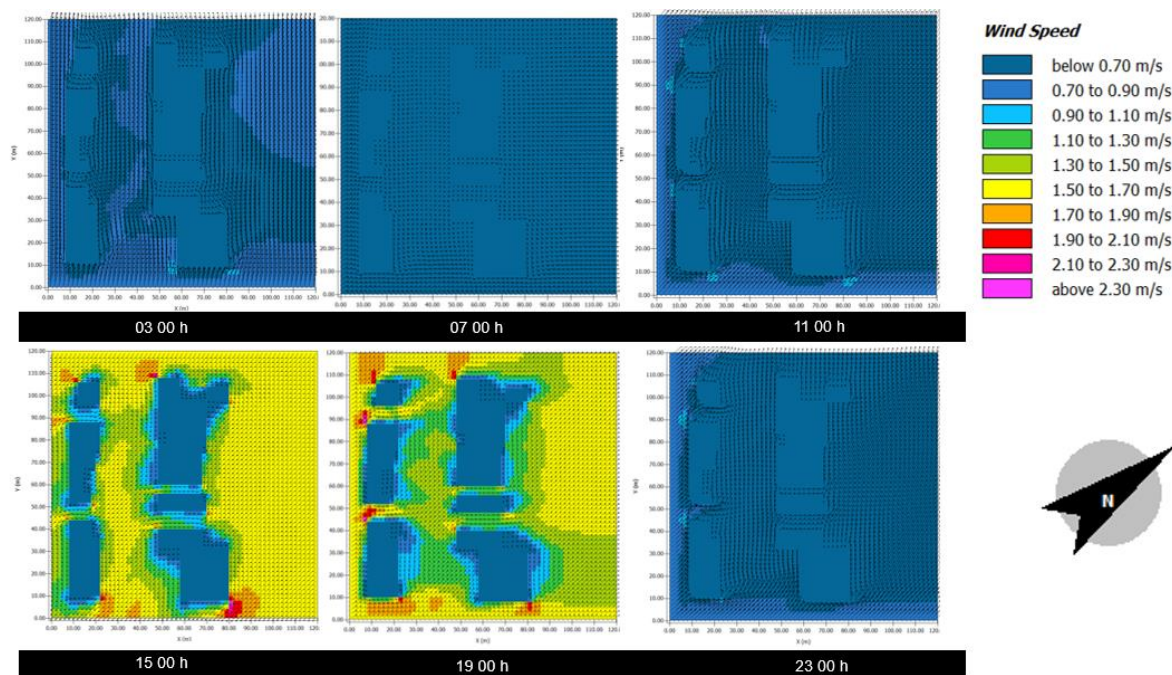


Apéndice C. Mapas de distribución de velocidad del viento

En la Figura 1, se observa que, existe poca variación en la velocidad del viento a lo largo día, sin embargo, a las 15 h las se presentan condiciones de mayor interacción de viento, debido a que se observa que a lo largo del cañón la velocidad oscila entre 1.5 – 1.7 m/s, pese a que existe una zona en la zona noroeste del cañón una variante que oscila entre 1.3 – 1.5 m/s. Mientras que las 19 h, las condiciones se asemejan a las 15 h, existen algunas variaciones debido a que a esta ahora la velocidad del viento disminuye al en las extremidades del cañón (1- 1.3 m/s) mientras que al centro del cañón la velocidad del viento se mantiene en un rango entre 1.30 – 1.5 m/s, sin embargo, existen zonas a lo largo del cañón en donde la velocidad del viento se ve afectada por las edificaciones y disminuye oscilando entre (0.90 – 1.10 m/s)

Figura1

Mapas comparativos de viento en escenario EB



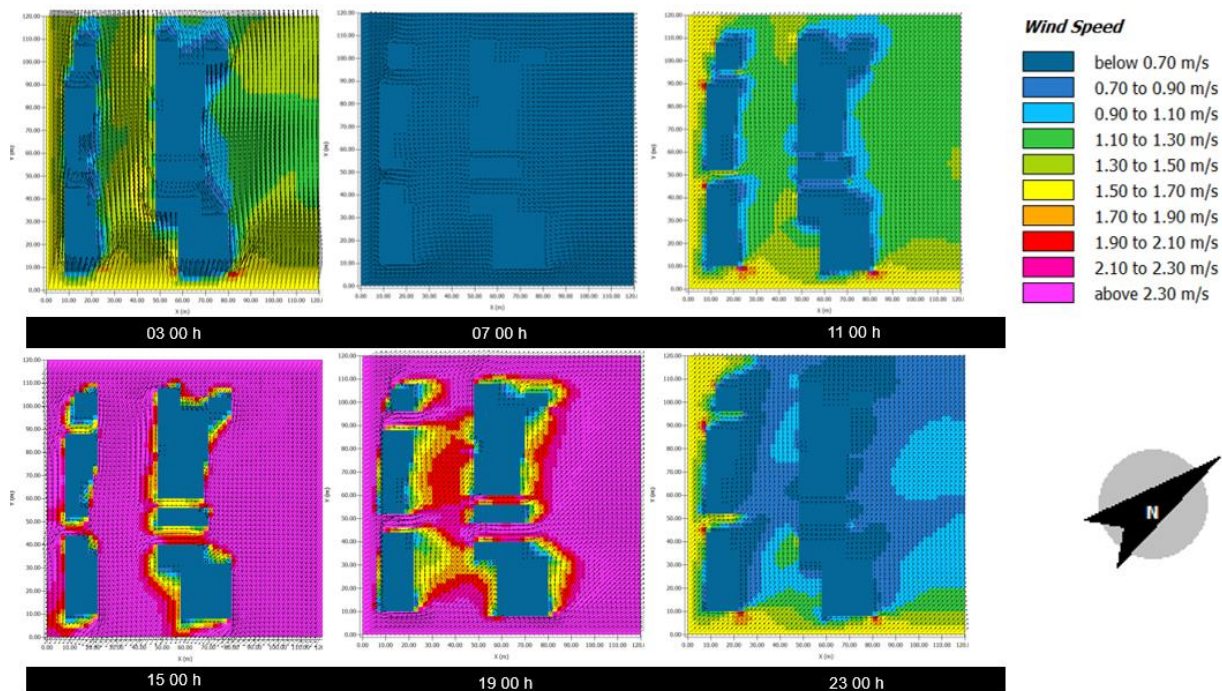
En la Figura 2, se observa que, a las 03 h la velocidad del viento oscila entre 1.30- 1.5 m/s, mientras que, a las 07 h, no se presentan registros de la velocidad del

viento. Por el contrario, a las 15 h, la velocidad del viento oscila entre 2.10 – 2.30 m/s. Mientras que, a las 19 h, se observa que al centro del cañón la velocidad del viento es mayor, en consideración de la velocidad que se presenta en la cercanía a las edificaciones en donde los valores oscilan entre 1.3 – 1.70 m/s.

En cuanto a las 23 h, se presenta poca velocidad del viento, inferior a 0.7 m/s, al centro del cañón, mientras que en la zona central y sureste existen valores que oscilan entre 0.90 – 1.30 m/s.

Figura 2

Mapas comparativos de viento en escenario E1

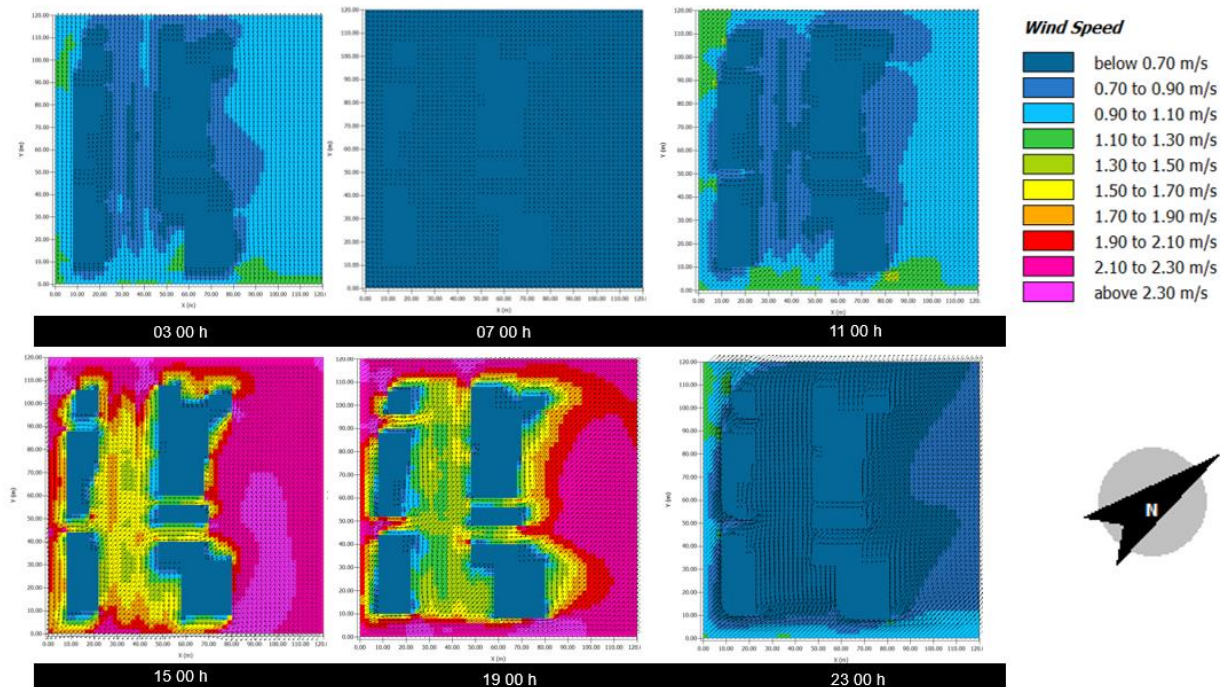


En la Figura 3, se observa que, a las 03 h la velocidad del viento oscila entre 0.70 – 0.90 m/s, a lo largo del cañón, sin embargo, se ve reducido (inferior a los 0.70 m/s) en el camellón y laterales del cañón que se ven influenciados por la presencia de vegetación. Mientras que, a las 07 h, no se presentan registros de la velocidad del viento. Por el contrario, a las 15 h, la velocidad del viento oscila entre 1.5 – 1.7 m/s, a lo largo del cañón, pese a que en la zona del camellón y laterales del cañón se aprecian valores que rondan entre 1.30 – 1.5 m/s. Por otro lado, a las 19 h, se observa que a lo largo del cañón la velocidad oscila entre 1.30 – 1.50 m/s, pese a que en la zona del

camellón la velocidad se reduce (1.1 – 1.3 m/s). En cuanto a las 23 h, se presenta poca velocidad del viento, inferior a 0.7 m/s, a lo largo del cañón.

Figura 3

Mapas comparativos de viento en escenario E2

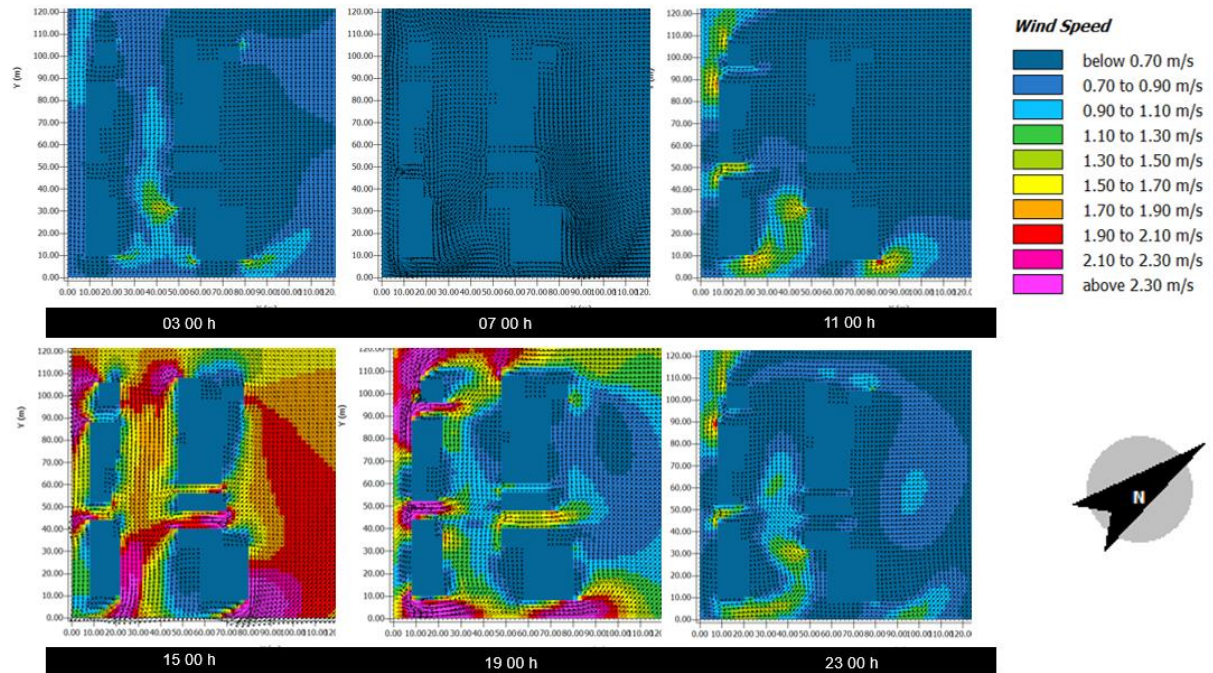


En la Figura 4, se observa que en la zona central y sur este del cañón, a las 03 h la velocidad del viento oscila entre 0.90 – 1.10 m/s, a lo largo del cañón, sin embargo, se ve reducido (inferior a los 0.70 m/s) en la zona noroeste del cañón. Mientras que, a las 07 h, se presentan registros mínimos de la velocidad del viento. En tanto a las 11 h, la velocidad del viento al sureste del cañón como en donde la velocidad oscila entre 0.90 – 1.50 m/s. Por el contrario, a las 15 h, la velocidad del viento es superior a los 2.3 m/s al sureste del cañón, mientras que al centro del cañón la velocidad oscila entre 1.5 – 1.90 m/s.

Por otro lado, a las 19 h, se observa que a lo largo del cañón la velocidad oscila entre 1.30 – 1.50 m/s, pese a que en la zona central del cañón se aprecia una velocidad que oscila entre 0.90 – 1.10 m/s. En cuanto a las 23 h, se presenta poca velocidad del viento, inferior a 0.7 m/s, al noroeste del cañón, mientras que al sureste las condiciones varían entre 1.30 – 1.50 m/s.

Figura 4

Mapas comparativos de viento en escenario E3

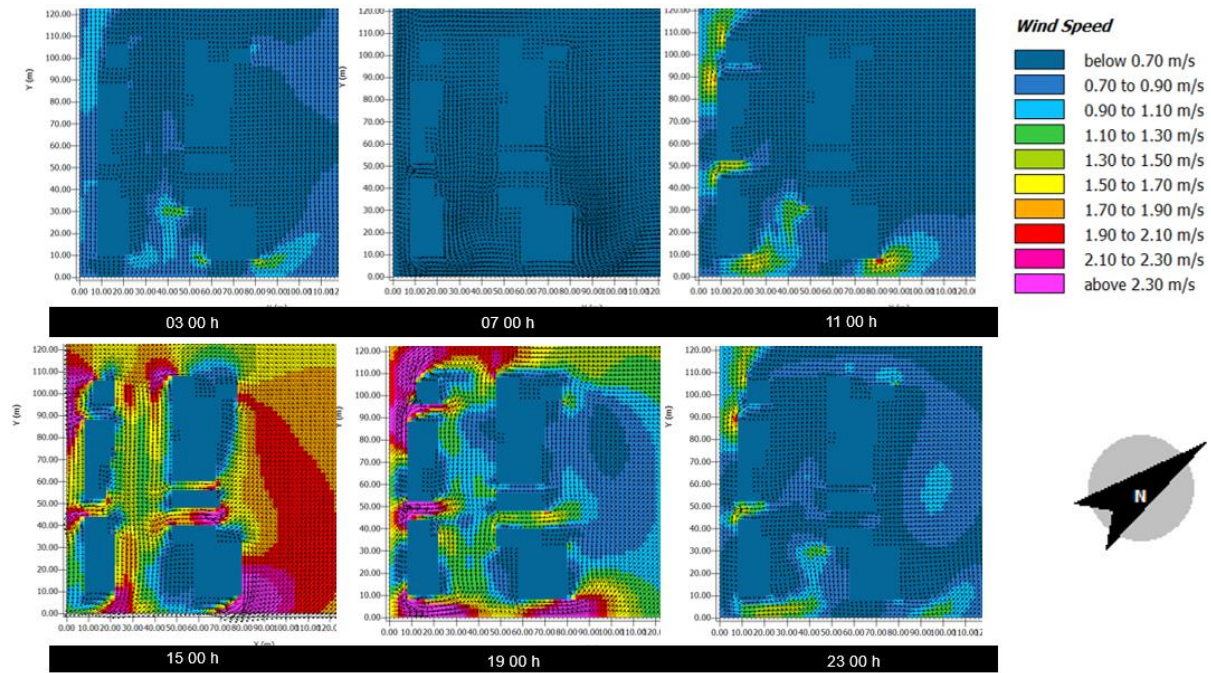


Por tanto, en la Figura 5, se observa que, en la zona sureste del cañón, la velocidad del viento oscila entre 0.90 y 1.10 m/s, mientras que al noroeste los valores están por debajo de los 0.70 m/s. En cuanto a las 03 h, se aprecia que la velocidad del viento es mínima (por debajo de los 0.7 m/s). Mientras que, a las 15 horas se aprecia que a lo largo del cañón la velocidad oscila entre 1.1- 1.9 m/s, a diferencia de lo que ocurre en la zona del camellón donde los valores van de 1.1 – 1.3 m/s y en la zona sureste donde los valores van de 2.1- 2.3 m/s.

Sin embargo, a las 19 h, las condiciones vuelven a cambiar y se aprecia que ahora la velocidad del viento en la zona central del cañón oscila entre 0.9 – 1.1 m/s, mientras que en el resto del cañón la velocidad oscila entre 1.1 – 1.5 m/s. Finalmente a las 19 horas se aprecia que la velocidad del viento se reduce, alcanzando valores inferiores a los 0.70 m/s en la zona noroeste, mientras que en la zona sureste los valores oscilan entre 0.9 – 1.5 m/s.

Figura 5

Mapas comparativos de viento en escenario E4

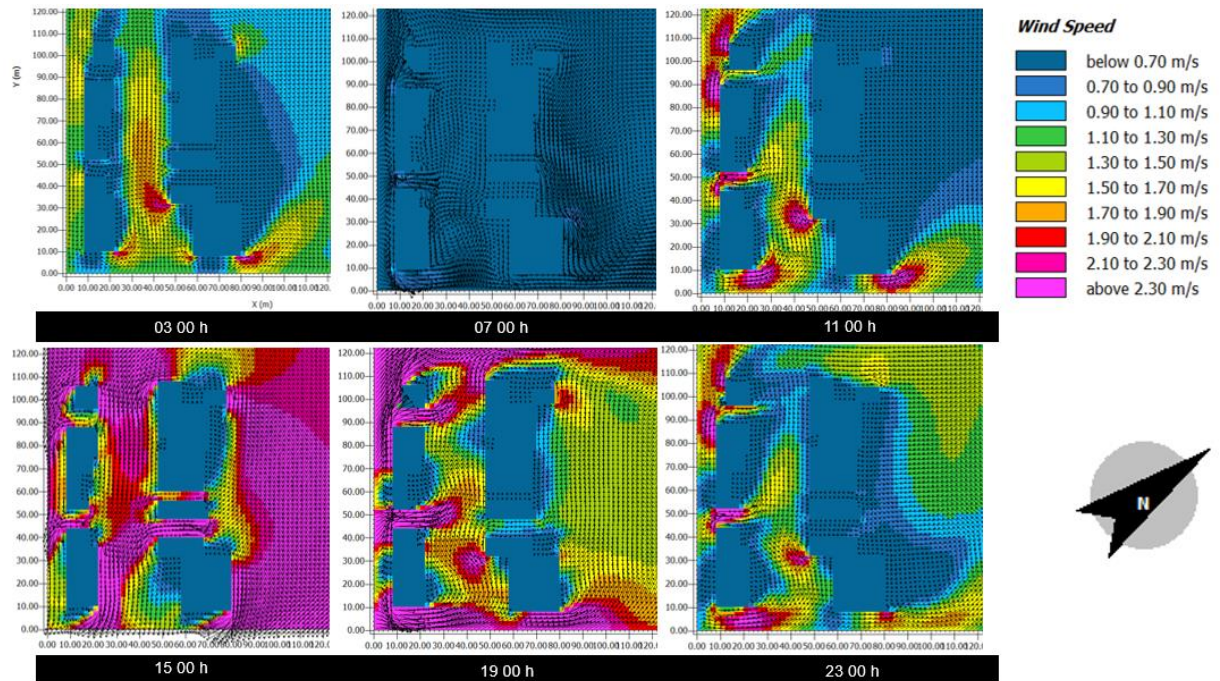


En la Figura 6, se observa que en la zona central y sur este del cañón, a las 03 h la velocidad del viento es mayor que en las extremidades del cañón ya que alcanza valores que oscilan entre 1.90 – 2.10 m/s. Mientras que, a las 07 h, se presentan registros mínimos de la velocidad del viento. En tanto a las 11 h, la velocidad del viento al sureste del cañón es mayor (1.5 1.7 m/s) que la presentada al noroeste del cañón (0.7 – 1.1 m/s).

Por el contrario, a las 15 h, la velocidad del viento es superior a los 2.3 m/s en las extremidades del cañón, mientras que al centro del cañón la velocidad oscila entre 1.9 – 2.1 m/s.

Figura 6

Mapas comparativos de viento en escenario E5



ANEXOS

En este apartado se incluye información adicional.

Anexo A. Informe de originalidad

Impacto de la vegetación y configuración espacial de cañones urbanos, sobre el confort térmico.

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorioinstitucional.uabc.mx Internet	259 palabras — 1%
2	uwhuisdier.nl Internet	182 palabras — < 1%
3	es.scribd.com Internet	113 palabras — < 1%
4	hdl.handle.net Internet	112 palabras — < 1%
5	arquitectura.mxl.uabc.mx Internet	78 palabras — < 1%
6	repository.udistrital.edu.co Internet	70 palabras — < 1%
7	repositorio.cuc.edu.co Internet	60 palabras — < 1%
8	www.dbnl.org Internet	56 palabras — < 1%
9	www.semanticscholar.org Internet	52 palabras — < 1%

10	www.theibfr.com Internet	50 palabras — < 1 %
11	electricayelectronica.uniandes.edu.co Internet	45 palabras — < 1 %
12	docplayer.es Internet	41 palabras — < 1 %
13	issuu.com Internet	39 palabras — < 1 %
14	repositorio.unfv.edu.pe Internet	39 palabras — < 1 %
15	www.scielo.org.mx Internet	39 palabras — < 1 %
16	www.scribd.com Internet	39 palabras — < 1 %
17	myslide.es Internet	35 palabras — < 1 %
18	scielo.sld.cu Internet	34 palabras — < 1 %
19	www.researchgate.net Internet	33 palabras — < 1 %
20	erma.asades.org.ar Internet	31 palabras — < 1 %
21	www.hydrol-earth-syst-sci.net Internet	29 palabras — < 1 %

repositorio.unal.edu.co

22	Internet	28 palabras — < 1 %
23	biblio.uabcs.mx Internet	27 palabras — < 1 %
24	eos.com Internet	27 palabras — < 1 %
25	moam.info Internet	27 palabras — < 1 %
26	doku.pub Internet	26 palabras — < 1 %
27	eprints.uanl.mx Internet	25 palabras — < 1 %
28	repositorio.uchile.cl Internet	25 palabras — < 1 %
29	repositoriodigital.uns.edu.ar Internet	25 palabras — < 1 %
30	upcommons.upc.edu Internet	25 palabras — < 1 %
31	Luis Reinaldo Alvis Estrada. "Impacto económico de la carga de enfermedad de complicaciones de pacientes diabéticos tipo II en afiliados a una aseguradora de salud en Colombia", Universitat Politècnica de Valencia, 2020 Crossref Posted Content	22 palabras — < 1 %
32	bdigital.unal.edu.co Internet	22 palabras — < 1 %

33	livrepository.liverpool.ac.uk Internet	22 palabras — < 1 %
34	repositorio.itesm.mx Internet	20 palabras — < 1 %
35	www.lawndalenews.com Internet	20 palabras — < 1 %
36	Tanja Mastroiacovo. "Diseño de tablas de registro unificadas para el diagnóstico y estimación del indicador de riesgo del patrimonio cultural", Universitat Politecnica de Valencia, 2021 Crossref Posted Content	19 palabras — < 1 %
37	repository.unimilitar.edu.co Internet	19 palabras — < 1 %
38	JADER RODRIGUEZ CORTINA. "CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LA INTENSIFICACION DEL PROCESO DE SECADO DE TOMILLO (Thymus Vulgaris L.): APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS DE POTENCIA Y SECADO INTERMITENTE", Universitat Politecnica de Valencia, 2013 Crossref Posted Content	18 palabras — < 1 %
39	repositorio.undac.edu.pe Internet	18 palabras — < 1 %
40	rua.ua.es Internet	18 palabras — < 1 %
41	www.aie.webs.upc.edu Internet	18 palabras — < 1 %
42	id.booksc.eu Internet	17 palabras — < 1 %

43	livrosdeamor.com.br Internet	17 palabras — < 1 %
44	qdoc.tips Internet	17 palabras — < 1 %
45	www.journals.elsevier.com Internet	17 palabras — < 1 %
46	Jose Olaso Melis. "Predicción del confort a partir de prototipos virtuales de calzado y modelos de ingeniería asistida por ordenador", Universitat Politècnica de Valencia, 2010 Crossref Posted Content	16 palabras — < 1 %
47	ciencia.lasalle.edu.co Internet	16 palabras — < 1 %
48	d-nb.info Internet	16 palabras — < 1 %
49	tesis.ucsm.edu.pe Internet	16 palabras — < 1 %
50	thesis.eur.nl Internet	16 palabras — < 1 %
51	archive.org Internet	15 palabras — < 1 %
52	pt.scribd.com Internet	15 palabras — < 1 %
53	repositorio.uax.es Internet	15 palabras — < 1 %
54	Internet	15 palabras — < 1 %

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

< 15 PALABRAS

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS

DESACTIVADO



**ARQUITECTURA
URBANISMO Y DISEÑO**
MAESTRÍA Y DOCTORADO
"Investigación de frontera en diseño"

IMPACTO DE LA VEGETACIÓN Y CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE CAÑONES URBANOS, SOBRE EL CONFORT TÉRMICO.

GLADYS ADRIANA ACOSTA FÉRNANDEZ

MAESTRIA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, FACULTAD DE INGENIERIA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

JUNIO 2022

