

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

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

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO



**OPTIMIZACIÓN MORFOLÓGICA DE CAÑONES URBANOS
A TRAVÉS DE DISEÑO EVOLUTIVO COMO ESTRATEGIA
DE MITIGACIÓN DE LA ISLA URBANA DE CALOR**

T E S I S

que para obtener el grado de

MAESTRA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

Presenta

NAYELI MONTSERRAT CASTREJON ESPARZA

Director de Tesis

DR. MARCOS EDUARDO GONZÁLEZ TREVIZO

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

OPTIMIZACIÓN MORFOLÓGICA DE CAÑONES URBANOS A TARVÉS DE
DISEÑO EVOLUTIVO COMO ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN DE LA ISLA
URBANA DE CALOR

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

NAYELI MONTSERRAT CASTREJON ESPARZA

Correo electrónico: Nayeli.castrejon@uabc.edu.mx
Identificador ORCID: 0000-0001-7243-0999

Director de tesis: Dr. Marcos Eduardo González Trevizo
Identificador ORCID: 0000-0002-7382-2641

Co-Director de tesis: Dr. Jorge Armando Ojeda Sánchez
Identificador ORCID: 0000-0002-5026-5459

Revisor de tesis: Dra. Karen Estrella Martínez Torres

Revisor de tesis: Dr. Julio Cesar Rincón Martínez

Revisor de tesis: Dr. Francisco Fernández Melchor

Ensenada, B.C. 17 de junio de 2022

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

Optimización morfológica de cañones urbanos a través de diseño evolutivo como estrategia de mitigación de la isla urbana de calor

TESIS

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

Nayeli Montserrat Castrejon Esparza

aprobada por:

Dr. Marcos Eduardo González Trevizo

Director de tesis

Dr. Jorge Armando Ojeda Sánchez

Co-director de tesis

Dra. Karen Estrella Martínez Torres

Miembro del comité tutorial

Dr. Julio César Rincón Martínez

Miembro del comité tutorial

Dr. Francisco Fernández Melchor

Miembro del comité tutorial

Ensenada, Baja California, México. Junio 2022

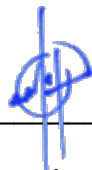
CARTA DE APROBACIÓN DE TESIS

La presente Tesis “OPTIMIZACIÓN MORFOLÓGICA DE CAÑONES URBANOS A TRAVÉS DE DISEÑO EVOLUTIVO COMO ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN DE LA ISLA URBANA DE CALOR” fue realizada por Nayeli Montserrat Castrejon Esparza y se presenta como requisito para obtener el Título de:

MAESTRA

El trabajo fue revisado con el Reglamento General Académico de la Universidad Autónoma de Baja California y el Reglamento Interno de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, y ha sido APROBADO por los siguientes sinodales:

Director de Tesis: _____



Dr. Marcos Eduardo González Trevizo

Codirector de Tesis: _____



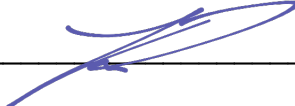
Dr. Jorge Armando Ojeda Sánchez

Miembro del comité: _____



Dra. Karen Estrella Martínez Torres

Miembro del comité: _____



Dr. Julio Cesar Rincón Martínez

Miembro del comité: _____



Dr. Francisco Fernández Melchor

Ensenada, Baja California, México. **Junio de 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



**Nayeli Montserrat Castrejon
Esparza**

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:

NAYELI MONTSERRAT CASTREJON ESPARZA

ha concluido su tesis de grado titulada:

**OPTIMIZACIÓN MORFOLÓGICA DE CAÑONES URBANOS A TRAVÉS DE DISEÑO
EVOLUTIVO COMO ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN DE LA ISLA URBANA DE CALOR**

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

DR. MARCOS EDUARDO GONZÁLEZ TREVIZO



FIRMA

DEDICATORIA

A mi madre,

Con amor y respeto,
por ser el motor de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Al forjador de mi camino, el que me acompaña y siempre me levanta de mi continuo tropiezo, al creador de mis padres y de las personas que más amo.

A mi Madre

Guadalupe Esparza Plascencia

Con todo mi cariño a la persona que siempre ha estado a mi lado, todo mi esfuerzo es gracias a tu ejemplo. Agradezco que confiaras en mí siempre y me alentaras a seguir adelante.

A mi director de tesis

Dr. Arq. Marcos Eduardo González Trevizo

Quiero agradecerle por la paciencia, enseñanzas y el tiempo que invirtió en mí para aclarar cualquier tipo de duda, le agradezco su apoyo y su esfuerzo diario que me brindó.

A mi codirector y comité

Dr. Armando Ojeda, Dra. Karen Estrella, Dr. Julio Rincón y Dr. Francisco Fernández

Les agradezco el apoyo y esfuerzo que me brindaron durante los dos años de esta trayectoria. Por el tiempo dedicado en revisar este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Por la beca otorgada para realizar mi investigación con clave 2020-000026-02NACF

RESUMEN

Debido al continuo crecimiento de las ciudades y al calentamiento global en las últimas décadas, los efectos de la isla de calor urbana (ICU) se han convertido en un problema inminente para las poblaciones urbanas. Las características morfológicas de las ciudades influyen en el desarrollo de microclimas urbanos e inducen el fenómeno de ICU. En este sentido, el presente estudio analiza a nivel microescala, bajo un enfoque cuantitativo la implementación de la técnica algorítmica de diseño evolutivo para la optimización morfológica de un cañón urbano como estrategia de mitigación de la ICU. El propósito consiste en analizar y evaluar multifactorialmente bajo un principio evolutivo de elitismo un conjunto de escenarios en función a tres objetivos de aptitud: maximizar la densificación urbana del cañón y la relación de aspecto y minimizar los valores del índice universal de confort térmico (UTCI). Lo anterior, a través del uso de la computación evolutiva integrada en una interfaz gráfica de diseño computacional asistido por algoritmos y un visualizador 3D, el experimento emplea el algoritmo multiobjetivo NSGA-II como algoritmo evolutivo principal. En las etapas iniciales del estudio se recurrió al uso de información climática interpolada con la herramienta Meteonorm®, lo que permitió modelar un año meteorológico típico y establecer el día cálido extremo para la simulación de los escenarios. Los resultados obtenidos muestran un potencial significativo de obstrucción al acceso solar debido a una mayor relación de aspecto $HW > 2$ como resultado de la densificación vertical, lo que promovió la disminución del índice UTCI de hasta 2°C de 35°C a 33°C al centro del cañón urbano debido al aumento en la proyección de sombras por edificios más altos, asimismo, la cantidad total de radiación solar que llega al centro geométrico de la superficie del cañón se reduce de 6.39 a 4 kWh/m^2 lo que representa una disminución del 2.3 kWh/m^2 , y las horas de luz solar disponibles disminuyeron de $11\text{ h }00$ a $7\text{ h }00$ lo que representa hasta 4 horas menos de iluminación solar directa al centro del cañón, proporcionando entornos urbanos térmicamente más frescos. Sin embargo, si la política de redensificación o instrumentos de ordenamiento y planeación territorial de los centros urbanos opta por la contención de modelos dispersos de crecimiento urbano a través del desarrollo vertical de las ciudades, tendrá que precisar las medidas que permitan la ocupación y usos de suelo con frentes y fondos de lotes habitacionales consecuentes con la tipología y régimen de propiedad condominal.

Palabras clave: Algoritmos evolutivos, Sobrecalentamiento urbano, Isla de calor urbana, Cañón urbano, Estrategias de mitigación, Densificación urbana

ABSTRACT

Due to the continuous growth of cities and global warming in recent decades, urban heat island (UHI) effects have become an imminent problem for urban populations. The morphological characteristics of cities influence the development of urban microclimates and induce the ICU phenomenon. In this sense, this study analyzes at the microscale level, under a quantitative approach, the implementation of the algorithmic technique of evolutionary design for the morphological optimization of an urban canyon as a mitigation strategy for ICU. The purpose is to analyze and evaluate multifactorial under the evolutionary principle of elitism a set of scenarios based on three fitness objectives: maximizing the urban densification of the canyon and the aspect ratio and minimizing the values of the universal thermal comfort index (UTCI). The foregoing, through the use of evolutionary computation integrated into a graphical algorithm-aided computational design interface and a 3D viewer, the experiment uses the NSGA-II multi-objective algorithm as the main evolutionary algorithm. In the initial stages of the study, interpolated climate information was used with the Meteonorm® software, which allowed for modeling a typical meteorological year and establishing the extremely hot day for simulating the scenarios. The results obtained show a significant potential for obstruction to solar access due to a higher aspect ratio $HW > 2$ as a result of vertical densification, which promoted a decrease in the UTCI index of up to 2 °C from 35 °C to 33 °C. to the center of the urban canyon due to the increase in the projection of shadows by taller buildings, likewise, the total amount of solar radiation that reaches the geometric center of the canyon surface is reduced from 6.39 to 4 kWh/m², which represents a decrease of 2.3 kWh/m², and the hours of available sunlight decreased from 11:00 a.m. to 7:00 a.m., which represents up to 4 hours less direct sunlight to the center of the canyon, providing thermally cooler urban environments. However, if the redensification policy or territorial planning and ordering instruments for urban centers opt to contain dispersed models of urban growth through the vertical development of cities, it will have to specify the measures that allow the occupation and use of land with fronts and backs of housing lots consistent with the typology and regime of condominium property.

Keywords: Evolutionary algorithms, Urban overheating, Urban heat island, Urban canyon, Mitigation strategies, Urban densification

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS	VII
INDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE ECUACIONES	XIV
ÍNDICE DE APÉNDICE	XV
LISTADO DE ABREVIATURAS	XVI
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.1. Panorama General.....	5
1.2. Planteamiento del Problema	6
1.3. Justificación	10
1.4. Antecedentes	12
1.5. Contextualización del objeto de estudio.....	15
1.6. Pregunta de investigación e Hipótesis	16
1.7. Objetivos de investigación.	17
1.7.1. Objetivo general.....	17
1.7.2. Objetivos específicos.....	17
1.8. Alcances y Limitaciones.....	18
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	19
2.1.1. Bioclima urbano	20
2.1.1.1. <i>Índice Universal de confort térmico (UTCI)</i>	23
2.1.2. Isla de calor urbana	23
2.1.2.1. <i>Causas de ICU</i>	25
2.1.2.2. <i>Efectos generados por la ICU</i>	28
2.1.3. Estrategias de mitigación de la ICU	29
2.1.4. Cañones urbanos	32
2.1.4.1. <i>Relación de aspecto</i>	34
2.1.4.2. <i>Orientación de los cañones urbanos</i>	37

2.1.4.3.	<i>Factor de cielo visible (SVF)</i>	39
2.1.4.4.	<i>Efectos de los cañones urbanos</i>	41
2.1.5.	Algoritmos evolutivos y herramientas de cómputo.....	42
2.1.5.1.	<i>Funcionamiento de los algoritmos evolutivos</i>	43
2.1.5.2.	<i>Ventajas de los algoritmos evolutivos</i>	44
2.1.5.3.	<i>Estudios de algoritmos evolutivos y la isla de calor urbana</i>	45
2.1.5.4.	<i>Algoritmo NSGA-II</i>	48
2.1.5.5.	<i>Herramientas de cómputo</i>	51
2.1.5.6.	<i>Conclusiones del Marco Teórico</i>	52
2.2.	Marco Conceptual.....	54
2.3.	Marco Normativo.....	57
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA		59
3.1.	Diseño de la investigación	60
3.2.	Diseño del experimento	65
3.3.	Diseño del objeto de estudio.....	67
3.3.1.	Objeto de Estudio	67
3.3.2.	Sitio de estudio y caracterización climática	68
3.3.2.1.	<i>Temperatura</i>	70
3.3.2.2.	<i>Humedad Relativa</i>	71
3.3.2.3.	<i>Radiación Global Horizontal</i>	72
3.3.2.4.	<i>Régimen de Viento</i>	74
3.3.3.	Área de estudio.....	75
3.3.4.	Unidad de análisis	76
3.3.5.	Periodo de estudio.....	77
3.3.6.	Herramientas e instrumentos.....	79
3.3.7.	Desarrollo del modelo de simulación experimental.....	81
3.3.7.1.	<i>Selección de objetivos de aptitud</i>	81
3.3.7.2.	<i>Implementación del diseño algorítmico y modelado de estrategia evolutiva</i>	84
3.3.7.3.	<i>Plan para la selección del caso óptimo</i>	86

3.3.7.4.	<i>Configuración de la interfaz</i>	87
CAPÍTULO IV.	RESULTADOS	88
4.1.1.	Área de estudio y análisis climático	89
4.1.1.1.	<i>Variables sociodemográficas</i>	89
4.1.1.2.	<i>Temperatura de Bulbo Seco</i>	93
4.1.1.3.	<i>Humedad Relativa</i>	93
4.1.1.4.	<i>Radiación Global Horizontal</i>	94
4.1.1.5.	<i>Régimen de Viento</i>	95
4.1.2.	Unidad de análisis	96
4.1.3.	Recolección de datos en campo	100
4.1.3.1.	<i>Mediciones In Situ SVF</i>	100
4.1.3.2.	<i>Fotografías térmicas</i>	103
4.2.	Simulación	106
4.2.1.	Escenario caso base	108
4.2.2.	Optimización multiobjetivo	115
4.2.3.	Caso de optimización morfológica	130
DISCUSIÓN		141
CONCLUSIONES		143
FUTURAS INVESTIGACIONES		145
REFERENCIAS		146
APÉNDICE		165
ANEXO		170

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evaluación ambiental, diseño algorítmico y diseño evolutivo.....	2
Figura 2. Proyecciones de cambios de temperatura anual promedio (°C) hasta el 2100.	8
Figura 3. Grado de riesgo por olas de calor a escala municipal.....	9
Figura 4. Perspectiva deductiva del objeto de estudio en relación con el planteamiento del problema	18
Figura 5. Esquema de la isla de calor urbana	25
Figura 6. Parámetros que afecta el microclima urbano y contribuyen a la formación del fenómeno ICU	26
Figura 7. Efectos de la formación de la isla de calor urbana.....	29
Figura 8. Principales estrategias de mitigación del sobrecalentamiento urbano ..	31
Figura 9. Estrategias de mitigación del efecto de isla de calor urbana.....	32
Figura 10. Dimensiones y proporciones de cañones urbanos.....	34
Figura 11. Cálculo de la relación H/W para un cañón simétrico	36
Figura 12. Cálculo de la relación H/W para un cañón no uniformes o asimétricos	37
Figura 13. SVF de un cañón urbano	40
Figura 14. Esquema del algoritmo evolutivo empleado para la generación urbana	44
Figura 15. Radiación total que alcanza la superficie del suelo: a) caso base; b) densificación	46
Figura 16. Flujo de trabajo del algoritmo NSGA II	49
Figura 17. Vista aérea 3D de la generación 100 de soluciones candidatas	50
Figura 18. Combinación de estrategias de mitigación de la ICU	51
Figura 19. Mapa de la literatura.....	54

Figura 20. Diagrama general de la tesis.....	62
Figura 21. Esquema metodológico.....	63
Figura 22. Esquema del diseño del experimento	65
Figura 23. Mapa de Baja California (a) y mapa de la ciudad de Ensenada (b)	68
Figura 24. Ubicación de la EMA BCO2-Ensenada y el Observatorio Sinóptico de Ensenada, Baja California.....	69
Figura 25. Sistema de agrupación bioclimática local.....	70
Figura 26. Comportamiento mensual de las temperaturas máximas, media y mínimas	71
Figura 27. Comportamiento mensual de las HR mínima, media y máxima, frente a la ZC permisible que acepta un rango del 30 % al 70 %.....	72
Figura 28. Comportamiento mensual de la radiación solar máxima promedio respecto a los niveles aceptables de Radiación solar.....	73
Figura 29. Velocidades mensuales de viento (media y máxima).....	74
Figura 30. Mapa de LTS de la ciudad de Ensenada (a), (b) AGEB de la ciudad y (c)mapa de LTS con AGEB.....	76
Figura 31. Criterios para la selección del área de estudio.....	76
Figura 32. Criterios para la selección de cañón urbano	77
Figura 33. Objetivos de aptitud.....	82
Figura 34. Representación esquemática de Genes y Criterios	84
Figura 35. Pseudocódigo del experimento	85
Figura 36. Descripción del Frente de Pareto.....	86
Figura 37. Gráfico de coordenadas paralelas.....	91
Figura 38. AGEB críticas y Área de estudio (Fracc. Punta Banda I)	92
Figura 39. Comportamiento mensual y horaria de la temperatura de bulbo seco	93

Figura 40. Comportamiento mensual y horaria de la Humedad Relativa	94
Figura 41. Comportamiento mensual y horaria de la Radiación Global Horizontal	94
Figura 42. Rosa de Radiación Solar Total, Difusa y Directa	95
Figura 43. Gráfica de velocidad, dirección y temperatura del viento	95
Figura 44. Cañón urbano seleccionado con orientación W-E (Punta Banda I)	97
Figura 45. Geometría primitiva del cañón urbano	99
Figura 46. Montaje de la cámara en el tripie	101
Figura 47. Ubicación de la toma de fotografías hemisféricas	102
Figura 48. Análisis de radiación solar acumulada para el día cálido extremo (kWh/m ²), vista en planta y lateral.....	108
Figura 49. Análisis de iluminación solar directa acumulada para el día cálido extremo (horas de luz), vista en planta y lateral.....	109
Figura 50. Análisis de proyección de sombras de la morfología para la hora cálida crítica del día cálido extremo (horas de sombra), vista en planta y lateral.....	110
Figura 51. Análisis de factor de cielo visible (% de visibilidad), vista en planta y lateral	111
Figura 52. Análisis del microclima urbano a través del Índice Universal de Confort Térmico para la hora cálida del día cálido extremo (°C), vista en planta y lateral	113
Figura 53. Análisis por categoría de estrés térmico para la hora cálida del día cálido extremo a través del UTCI (adimensional).....	114
Figura 54. Análisis por categoría del estado térmico de un sujeto dentro del cañón urbano para la hora cálida del día cálido extremo a través del UTCI (adimensional)	114
Figura 55. Análisis por categoría de las condiciones de UTCI para la hora cálida del día cálido extremo (adimensional)	114

Figura 56. Configuración del interfaz (Wallacei Settings).....	116
Figura 57. Render de la última generación (25 individuos) vista en planta	117
Figura 58. Gráfico de desviación estándar de cada generación por objetivo de aptitud.	118
Figura 59. Gráfico de valores de aptitud para cada objetivo múltiple en toda la población.....	120
Figura 60. Gráfico de la línea de tendencia de la desviación estándar	121
Figura 61. Gráfico de la línea de tendencia de aptitud media para cada generación y para objetivo de aptitud.	123
Figura 62. Gráfico de coordenadas paralelas.....	124
Figura 63. Comportamiento de la generación 1, individuo 1 (primera generación)	125
Figura 64. Comportamiento de la generación 20, individuo 25 (última generación)	125
Figura 65. Gráfico de diamante del objetivo de aptitud 1	126
Figura 66. Gráfico de diamante del objetivo de aptitud 2	127
Figura 67. Gráfico de diamante del objetivo de aptitud 3	127
Figura 68. Gráfico de valores de aptitud de las soluciones óptimas por objetivo	128
Figura 69. Gráfico de Frente de Pareto.....	129
Figura 70. Gráfico de coordenadas Paralelas para la solución óptima	129
Figura 71. Análisis de radiación solar acumulada para el día cálido extremo (kWh/m ²), caso optimización morfológica vista en planta y lateral (a) vs caso base vista en planta y lateral (b)	131
Figura 72. Análisis de iluminación solar directa acumulada para el día cálido extremo (horas de luz), caso optimización morfológica vista en planta y lateral (a) vs caso base vista en planta y lateral (b).....	132

Figura 73. Análisis de proyección de sombras de la morfología para la hora cálida crítica del día cálido extremo (horas de sombra), caso optimización morfológica vista en planta y lateral (a) vs caso base vista en planta y lateral (b).....	134
Figura 74. Análisis de factor de cielo visible (% de visibilidad), caso optimización morfológica vista en planta y lateral (a) vs caso base vista en planta y lateral (b)	135
Figura 75. Análisis del microclima urbano a través del índice Universal de Confort Térmico para la hora cálida del día cálido extremo (°C), caso optimización morfológica vista en planta y lateral (a) vs caso base vista en planta y lateral (b)	136
Figura 76. Análisis del microclima urbano a través del índice Universal de Confort Térmico a las 23 h 00 del día cálido extremo (°C), a) caso base y b) caso de optimización morfológica.....	138
Figura 77. Análisis por categoría de las condiciones de UTCI para la hora cálida del día cálido extremo (adimensional) a) caso base y b) caso de optimización morfológica.....	139

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recomendaciones y hallazgos de los autores.....	14
Tabla 2. Rangos de densidad de ocupación para el uso habitacional	16
Tabla 3. Valores de referencia de radiación total horizontal en una localidad de referencia para distintos periodos de tiempo	21
Tabla 4. Agrupación de zonas climáticas de Köppen	22
Tabla 5. Modificaciones del Sistema de Clasificaciones, climas húmedos.....	22
Tabla 6. Modificaciones del Sistema de Clasificaciones, climas secos	22
Tabla 7. Relación de aspecto (H/W).....	35
Tabla 8. Orientación de cañones urbanos	38
Tabla 9. Estudios e investigaciones.....	52
Tabla 10. Definición de terminología dentro del diseño evolutivo	56
Tabla 11. Jerarquía vial, alturas máximas y relación de aspecto.....	58
Tabla 12. Proceso metodológico de la investigación	64
Tabla 13. Operacionalización de variables	67
Tabla 14. Gradientes térmicos de temperaturas máximas, mínimas y medias de los días típicos de Ensenada.....	78
Tabla 15. Isotermas de temperaturas horarias de los días típicos mensuales de Ensenada	78
Tabla 16. Herramientas e instrumentos	80
Tabla 17. Configuración de la interfaz para las simulaciones	87
Tabla 18. Descriptivos generales de SVF del cañón urbano de análisis	102
Tabla 19. Fotografías hemisféricas y cálculo de SVF; Error! Marcador no definido.	
Tabla 20. Fotografías térmicas del cañón analizado	104

Tabla 21. Fotografías térmicas del cañón urbano analizado	105
Tabla 22. Descriptivos generales de fotografías térmicas del cañón urbano de análisis	105
Tabla 23. Descripción de los componentes de Ladybug® empleados	106
Tabla 24. Comparación de los valores de aptitud por objetivo calculados del caso de optimización morfológica respecto al caso base	130
Tabla 25. Comparación de los valores obtenidos de los distintos análisis realizados en el caso de optimización morfológica respecto al caso base.....	140

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo de la Relación de Aspecto (a) y altura media (b), para cañones uniformes	36
Ecuación 2. Cálculo de la Relación de Aspecto (a) y altura media (b), para cañones no uniformes	36
Ecuación 3. Día Típico Mensual (Método de oscilación y Media)	78
Ecuación 4. Desviación respecto a la media.....	90
Ecuación 5. Desviación estándar	119

ÍNDICE DE APÉNDICE

Apéndice 1. Pseudocódigo del algoritmo NSGA-II.....	165
Apéndice 2. Análisis de AGEB y desviación respecto a la media	166
Apéndice 3. Mapa de temperatura de la superficie terrestre con AGEB de Ensenada, B.C.	167
Apéndice 4. Mapa de temperatura de la superficie terrestre de Ensenada, B.C.	168
Apéndice 5. Render de la última generación (25 individuos) vista en isométrico	169

LISTADO DE ABREVIATURAS

Concepto

Isla de calor urbana
Gases de efecto invernadero
Factor de cielo visible
Dióxido de carbono
Computación evolutiva
Relación de aspecto
Algoritmo genético de clasificación no dominado II
Algoritmo evolutivo multiobjetivo de frente de Pareto
Algoritmo evolutivo multiobjetivo
Algoritmo genético evaluado por vectores
Algoritmo evolutivo de objetivo único
Algoritmo evolutivo
Cañón urbano
Índice universal de confort térmico
Temperatura de bulbo seco
Temperatura del aire
Temperatura media radiante
Temperatura máxima
Temperatura media
Temperatura mínima
Temperatura máxima extrema
Temperatura mínima extrema
Zona de confort
Humedad relativa
Humedad relativa mínima
Humedad relativa media
Humedad relativa máxima
Radiación solar total
Radiación solar directa
Radiación solar difusa
EnergyPlus Weather Data File
Objetivo de aptitud

Abreviatura

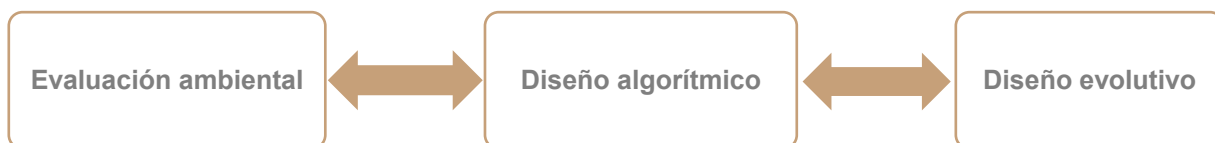
ICU
GEI
SVF
CO₂
EC
H/W
NSGA II
SPEA-2
MOEA
VEGA
SOEA
AG
UC
UTCI
TBS
Tair
MRT
Tmax
Tm
Tmin
Tmax ext.
Tmin ext.
ZC
H.R.
HRmin
HRmed
HRmax
RSg
RSb
RSd
EPW
FO

INTRODUCCIÓN

Antes de iniciar se definen tres conceptos fundamentales que dan sustento a la presente investigación: la evaluación ambiental; el diseño algorítmico y el diseño evolutivo, es decir, el estudio se resume en estos tres conceptos (Figura 1).

Figura 1.

Evaluación ambiental, diseño algorítmico y diseño evolutivo



¿Qué es la evaluación ambiental?

Es un procedimiento que analiza el estado del entorno, permitiendo así la toma de decisiones estratégicas, cuyo objetivo es mejorar las condiciones del medio ambiente y prevenir o mitigar los efectos adversos causados por políticas, planes, programas y proyectos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018).

¿Qué es el diseño algorítmico?

Proyección de objetos o elementos a partir de proceso dinámico basado en acciones y controlado por variables y parámetros que definen la secuencia de operaciones a realizar para resolver un problema en específico. Empleando herramientas algorítmicas, los diseñadores pueden diseñar reglas conforme a los requerimientos de desempeño de un diseño (Woodbury et al., 2017).

¿Qué es el diseño evolutivo?

Método de optimización y búsqueda de soluciones, fundamentada en la teoría de selección natural y reproducción genética de Darwin, se estructura bajo una lógica simplificada de la evolución de las especies. Emplea un modelo evolutivo de elitismo, es decir, un principio básico de evolución, en donde interfieren mecanismos de selección, cruce y mutación de parámetros (numéricos, geométricos y/o ambientales) de una población de soluciones candidatas a un problema en específico. Estas soluciones se someten a ciertas variaciones y posteriormente a un proceso de selección, que favorece a los mejores (Camporeale, 2017. págs. 37-38).

De acuerdo con informes de las Naciones Unidas, se espera que en el año 2050 el 70 % de la población habite en las ciudades, lo que demandará más del 70 % de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) que repercuten en el cambio climático. La rápida urbanización aunado a las características morfológicas cambiantes de las ciudades, han dado lugar a diversos efectos negativos entorno al calentamiento global, la isla de calor urbana (ICU) ocupa el primer lugar entre estos efectos, definida como el aumento de la temperatura del aire al centro de la ciudad en comparación con las áreas circundantes, amplificando el fenómeno del calentamiento global (Battista et al., 2019; Lutyens, 2019; Santamouris & Yun, 2020; Santamouris, 2020).

Las ICU ocasionan diferencias de temperatura de hasta 8 °C entre las ciudades y sus áreas suburbanas y rurales circundantes, asimismo, implican un impacto significativo en las condiciones de confort térmico al aire libre en la zonas urbanas; eleva la concentración de CO_2 y aumento en la demanda energética para efectos de climatización (Perini et al., 2017; Santamouris, 2016; Schinasi et al., 2018). Por otro lado, algunos estudios recientes demostraron que la geometría urbana es uno de los factores de mayor influencia en el incremento de intensidad de la ICU. La variación de sus principales parámetros como la forma, orientación, la altura de las edificaciones y ancho de las vialidades influyen en la temperatura del aire, la cantidad de radiación absorbida y emitida y la velocidad y dirección del viento.

A lo largo de los años, los investigadores han estudiado la correlación entre las características morfológicas de las ciudades y la temperatura del aire en el ambiente, con el objetivo de mitigar la ICU (Santamouris, 2015; Santamouris & Yun, 2020). Esta correlación se basa principalmente en la relación de aspecto (H/W), definida como la relación entre la altura de los edificios y el ancho de la vialidad del cañón; y el factor de cielo visible (SVF), que consiste en la relación de visibilidad del cielo desde el nivel del suelo, estos dos indicadores morfológicos se utilizan para simular cañones urbanos y estimar la intensidad de ICU (Chen et al., 2012a; Sakar, 2018).

La mayoría de los estudios se llevan a cabo a través de herramientas de medición in situ. Si bien los procedimientos experimentales han sido ampliamente aplicados

durante las décadas anteriores y son considerados la base para la creación de modelos numéricos, aún presentan importantes desventajas según Niachou y Santamouris (2008), involucrando: a) limitaciones de tiempo y costo; b) mayor riesgo de error en procesos de medición y c) resolución espacial limitada. Sin embargo, hoy en día es posible emplear técnicas computacionales inteligentes como, el uso de herramientas para la simulación de microclimas urbanos o el empleo de herramientas de optimización por medio de algoritmos evolutivos, capaces de parametrizar soluciones óptimas en la estructura del tejido urbano y edificaciones (Davis, 2013; Fink et al., 2018; Karssenberget al., 2018). Suyoto et al., (2015) describe el objetivo del pensamiento paramétrico “no como un método para encontrar una única solución, sino para mostrar las diferentes posibilidades mediante el uso de algoritmos y técnicas de cálculo modernas” (p.661).

Además, según investigadores de la India, la importancia fundamental de los modelos algorítmicos reside en su potencial para utilizar la gran cantidad de datos ambientales que el progreso en herramientas informáticas pone a disposición para su consideración, incorporando aspectos tales como la inclinación de las superficies e incluso la evaluación de la emisión de gases de efecto invernadero. Los algoritmos han demostrado ser una técnica eficaz para la resolución de problemas multiobjetivos, como el comportamiento del medio ambiente y energético (Shukla et al., 2017).

En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo optimizar bajo un principio evolutivo de elitismo, la morfología de un cañón urbano para que sea capaz de alcanzar proporciones geométricas de compacidad solar orientadas a mitigar el efecto de sobrecalentamiento derivado de la isla de calor a microescala. El experimento emplea el algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominado NSGA-II como algoritmo evolutivo principal, con el fin de generar un conjunto de escenarios que difieren en la forma geométrica del cañón urbano, a través de mecanismos de selección, cruce y mutación de parámetros (numéricos, geométricos y ambientales), y en función de tres objetivos de aptitud orientados a mitigar el sobrecalentamiento del cañón urbano de estudio, finalmente se selecciona la solución óptima y es evaluada climáticamente. Los objetivos de aptitud definidos son: maximizar la densificación

urbana del cañón, maximizar la relación de aspecto y minimizar los valores de UTCI. Los resultados obtenidos del presente estudio brindan una perspectiva ambiental a los profesionales de la construcción y la planeación urbana.

En el marco de este estudio se pretende analizar: **¿Cómo la optimización morfológica de un cañón urbano a través de técnicas algorítmicas de diseño evolutivo podría ser útil en la mitigación de la isla de calor urbana a microescala?**

Para responder a esta pregunta se establecieron cinco capítulos que definen la estructura de esta tesis. En el capítulo uno se abordan temáticas relacionadas al planteamiento del problema, justificación, contextualización del objeto de estudio, antecedentes, pregunta de investigación e hipótesis, se establecen los objetivos de la investigación y por último se presentan los alcances y limitaciones del estudio.

El capítulo dos corresponde a los marcos teórico, referencia, conceptual, normativo y al estado del arte. Por otro lado, en el capítulo tres se define la metodología, se integra a partir de dos apartados: a) diseño de la investigación: se describe el tipo de investigación y enfoque; b) diseño del experimento: en este se muestran las etapas para llevar a cabo el experimento. Por otra parte, en el capítulo cuatro se llevó a cabo el análisis y diseño del objeto de estudio, se definieron los objetivos de aptitud y los genes que permitieron desarrollar el algoritmo evolutivo de optimización morfológica del cañón urbano; asimismo, se presenta el pseudocódigo del experimento, el plan para la selección del caso óptimo y por último la configuración de la interfaz para la simulación de los escenarios.

El capítulo cinco presenta los resultados obtenidos a partir de la simulación de escenarios, se divide en tres apartados: a) caso base, en esta sección se llevaron a cabo las simulaciones climáticas para el caso base; b) consiste en la optimización multiobjetivo, en dicho apartado se muestran los resultados de la simulación evolutiva y la selección del caso óptimo, y por último en el apartado c) se presentan las simulaciones climáticas del para el escenario de optimización morfológica seleccionado en comparación con el escenario base.

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se aborda de manera breve el panorama general de la investigación, se presenta el problema central del estudio, la justificación e importancia del tema se describen los hallazgos y la contextualización del objeto de estudio. Posteriormente se plantea la pregunta de investigación, la hipótesis y los objetivos, por último, se establece el alcance y limitaciones de la investigación.

1.1. Panorama General

El sobrecalentamiento urbano se ha documentado en más de 450 ciudades del mundo, numerosos datos experimentales muestran que la magnitud de aumento de la temperatura promedio puede exceder hasta 5 °C, mientras que el pico puede exceder los 10 °C. Las ICU se han convertido en un problema frecuente en muchas ciudades del planeta y es considerado el fenómeno más registrado del cambio climático (Santamouris & Yun, 2020). Según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (2013), se prevé un aumento en la temperatura promedio a nivel mundial de 1.4 a 5.8 °C entre 1990 y 2100.

Los principales factores que exacerban el impacto de la ICU son la disminución de superficies permeables por superficies impermeables, la falta de vegetación, el empleo de materiales con alta capacidad térmica en las edificaciones y bajo albedo y la composición geométrica de los cañones urbanos que componen a las ciudades (Perini et al., 2017). Sin embargo, diversos investigadores, han concluido que la relación de aspecto, el SVF, la orientación de la calle y los materiales de las superficies, son los factores con mayor influencia en el aumento de la temperatura del aire que se encuentran dentro del cañón (Chen et al., 2012a; Sakar, 2018).

Hoy en día, gracias a los avances en recursos computacionales, junto con la necesidad de una alta precisión de modelado espacial en los estudios de ICU, se desarrollaron nuevos modelos numéricos y computaciones que consisten en el empleo de herramientas de simulación y modelado 3D. La generación de estos modelos se centra en la relación entre la composición geométrica de las ciudades y los parámetros climáticos; como la radiación solar, el movimiento del aire y la transferencia de calor de los materiales del tejido urbano al medio ambiente (Guattari et al., 2018; Mirzaei, 2015; Mirzaei & Haghighat, 2010).

Por ejemplo, el empleo de modelos evolutivos a través de algoritmos genéticos, estos modelos algorítmicos fueron probados y adoptados por diferentes autores en las últimas décadas y en diversas ramas como la ingeniería, la arquitectura, las matemáticas, la biología, entre otras. Como es el caso de los algoritmos NSGA II y

SPEA-2 por sus siglas en inglés. Ambos algoritmos son empleados para resolver problemas de optimización multiobjetivo, produciendo soluciones óptimas de Pareto (Navarro-Mateu et al., 2018).

En este sentido, con el fin de emprender acciones para mitigar el efecto del sobrecalentamiento urbano derivado de la isla de calor por efecto del cambio climático, este estudio realiza un análisis prospectivo para analizar la estrategia de crecimiento vertical (densificación urbana vertical) a través de la utilización del Índice Universal de Confort Térmico (UTCI) y el PDUCP 2030 como limitantes de crecimiento vertical de las edificaciones. El experimento emplea un modelo evolutivo de elitismo que tiene como objetivo replicar y aplicar los principios evolutivos básicos de la genética a través de procesos de variación, evaluación y selección con el objetivo de optimizar la morfología de un cañón urbano para que sea capaz de alcanzar proporciones geométricas de compacidad solar orientadas a mitigar el efecto de sobrecalentamiento derivado de la ICU a microescala.

1.2. Planteamiento del Problema

Con la urbanización continua y el calentamiento global, los ambientes térmicos en las ciudades se han convertido en un problema grave en las últimas décadas. El incremento de temperatura es el factor climático que más destaca por que afecta la mayor parte del área terrestre. Así pues, el clima urbano se ve influenciado por la morfología urbana, es decir, edificios, calles, densidad, las propiedades térmicas de las superficies y la disponibilidad de vegetación. La suma de estos parámetros ha dado como resultado diferencias de temperatura entre las áreas urbanas y áreas rurales, fenómeno que se conoce como isla de calor urbana (Sakar, 2018).

En los últimos años, se han observado incrementos en la magnitud, frecuencia y duración de temperaturas extremas, la temperatura del aire en verano aumenta de manera constante y cada vez son más las ciudades que se ven amenazadas por los efectos de las ICU. Lo anterior, provoca estrés por calor, aumento en los niveles de mortalidad y morbilidad relacionada por golpes de calor y aumento en la demanda y consumo de energía destinada a la climatización. Los aumentos en la demanda de

enfriamiento causados por los ICU causarán un aumento de hasta 500 % en las emisiones de CO₂ para el 2050 para los edificios en los centros de las ciudades, en relación con los valores del 2000 (Emmanuel & Krüger, 2012; Moonen et al., 2012; Santamouris et al., 2017).

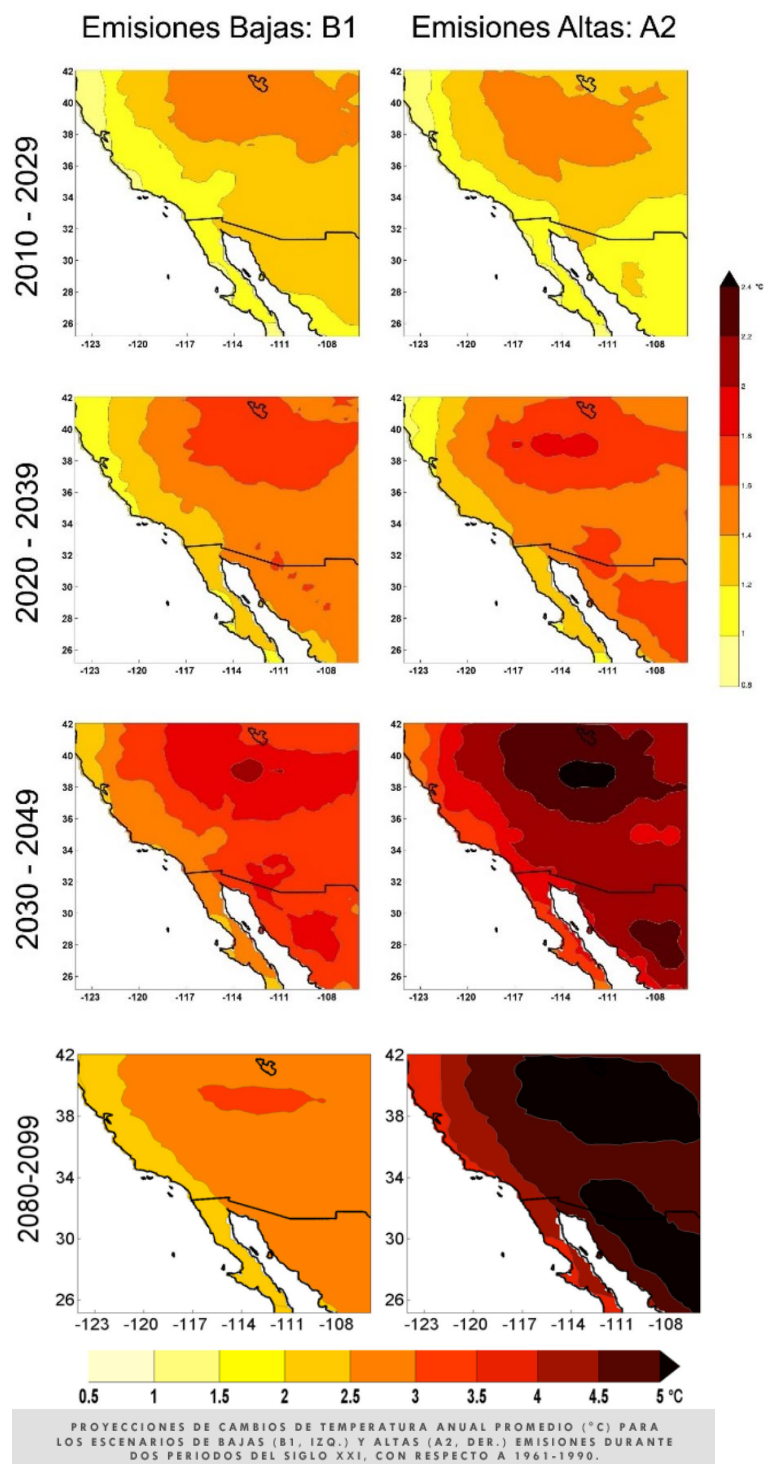
Al mismo tiempo, la carga máxima de electricidad de un edificio aumenta hasta un 4.6 % por cada grado de aumento de temperatura. En México, las edificaciones consumen el 83.8 % del total de energía y generan el 75 % de emisiones de CO₂, principalmente para efectos de climatización. Lo que resulta en un incremento constante en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en consecuencia se ha pronosticado un incremento en la temperatura a nivel mundial de 1.5 °C (Alchapar et al., 2013).

Dentro de este marco, investigadores del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), y el Colegio de la Frontera Norte (COLEF) (Centro de investigación público de CONACYT) generaron los escenarios del cambio climático para Baja California y los resultados fueron inquietantes. Se previó que las temperaturas medias anuales aumenten 1 °C en los próximos veinte años y hasta 5 °C para el año 2100. Lo que representa un punto crítico e irreversible para los científicos, pues si la temperatura media aumenta 1 °C, las temperaturas extremas pueden incrementar hasta 3 °C en la región (Villela, 2013).

Asimismo, el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California (PEACC-BC), muestra que el Estado es particularmente vulnerable al cambio climático. Se espera, que en los próximos cincuenta años, la temperatura media anual incremente hasta 2.5 °C (Arriaga & Cavazos, 2010). Por ejemplo, la Figura 2 presenta las proyecciones del aumento de temperatura hasta el año 2100. Se evaluaron los posibles cambios en la temperatura bajo dos escenarios de incremento de GEI: B1 (bajas emisiones) y A2 (altas emisiones), de acuerdo con el PEACC-BC.

Figura 2.

Proyecciones de cambios de temperatura anual promedio (°C) hasta el 2100.

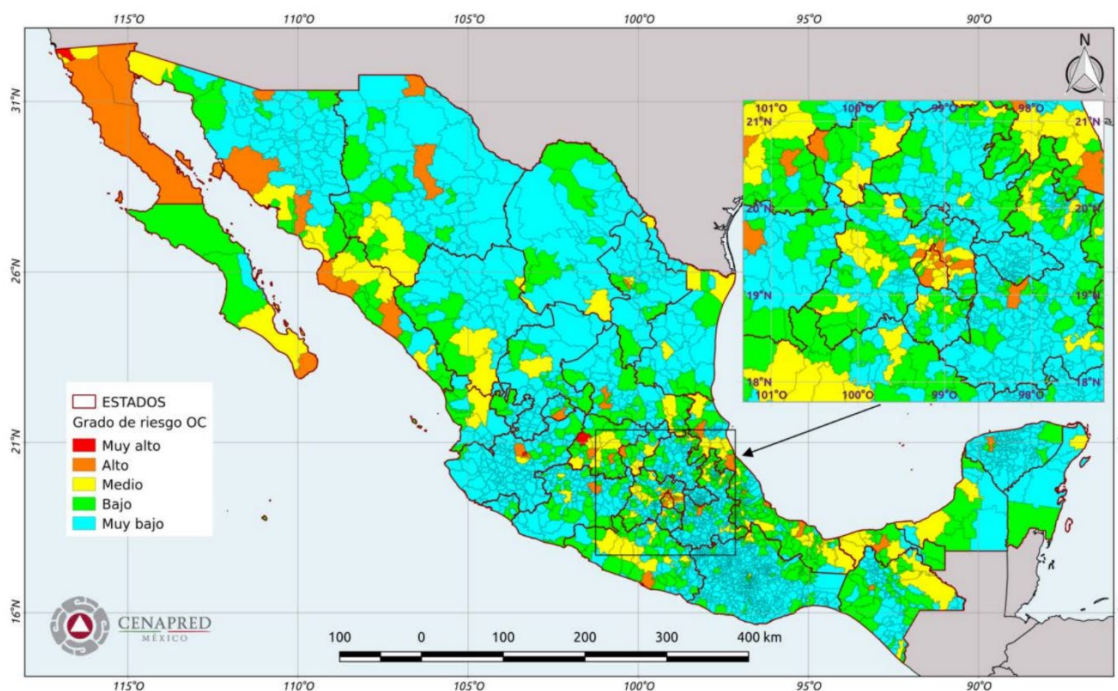


Nota. El gráfico representa las proyecciones de cambios de temperatura anual promedio del 2010 a 2100. Obtenido del “Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California (PEACC-BC)” por Villela, 2013.

El aumento de temperatura provoca aumento de las olas de calor que impactan de manera directa sobre la mortalidad por golpes de calor. De modo que, diversas ciudades del mundo se ven afectadas por las olas de calor que son responsables de la muerte de miles de personas. El caso de la ciudad de Ensenada no es la excepción, diversos investigadores afirmaron que la mortalidad relacionada con el calor aumenta considerablemente por encima de un umbral de temperatura en climas fríos, así mismo, estudios recientes demostraron que en climas mediterráneos las olas de calor implican más riesgos a la salud, provocando efectos nocivos especialmente en niños, adultos de la tercera edad y enfermos (Arlette et al., 2018; Fink et al., 2018; Khan et al., 2021; Lutyens, 2019; Santamouris & Yun, 2020; Semadet, 2006). Por ejemplo, México presentó en el año 2020 un total de 1200 casos por golpes de calor, el estado de Baja California ocupó el quinto lugar del país y la ciudad de Ensenada se ubica entre los municipios de alto riesgo por olas de calor (Figura 3) (Díaz Caravantes et al., 2014).

Figura 3.

Grado de riesgo por olas de calor a escala municipal



Nota. Obtenido de “Mapas de riesgo por temperaturas máximas” por Arlette et al., 2018. Sistema Nacional de Protección Civil Centro Nacional de Prevención de Desastres.

La ciudad de Ensenada ubicada en el estado de Baja California, cuenta con una superficie de 71 446 Km², concentrando en 2017 por cada kilómetro cuadrado 10.2 personas y se estima que el año 2030 la población aumente alrededor de 88 000 personas más que en 2017, lo que aumentará considerablemente la presión por el espacio urbano, por lo que la mancha urbana y el consumo de energía seguirán esa misma tendencia y esto da lugar a que con la presencia de cañones urbanos se agrave este fenómeno de ICU (COPLADE, 2017).

Puesto que, la composición geométrica de los cañones urbanos juega un papel clave en el incremento del fenómeno ICU. La variación del microclima urbano se encuentra estrechamente relacionada con la composición morfológica de las ciudades, de modo que, una mala relación de aspecto y disposición de los edificios altera el ambiente térmico dentro de los cañones urbanos, aumenta el consumo de energía y causa problemas de salud. Desde un punto de vista práctico, la planeación urbana sin considerar adecuadamente el cambio climático podría empeorar el ambiente térmico para los ciudadanos (He et al., 2020; Santamouris, 2015).

Para contrarrestar el impacto de las ICU se han propuesto, desarrollado e implementado numerosos sistemas y tecnologías de mitigación. Las tecnologías implican la simulación y combinación de diferentes estrategias, por ejemplo, el empleo de vegetación adicional, la utilización de materiales innovadores para edificios y espacios urbanos como materiales de cambio de fase, control solar, sistemas de disipación a base de agua, entre otros. Sin embargo, la evaluación de los actuales proyectos de mitigación urbana a gran escala que involucran varias tecnologías, han demostrado una capacidad de enfriamiento considerable y un potencial para bajar la temperatura urbana máxima hasta 3 °C (Nouri et al., 2018; Pisello et al., 2018).

1.3. Justificación

El aumento global de la población urbana en las últimas décadas ha provocado una creciente demanda de espacios habitables, dando como resultado una serie de impactos negativos, por ejemplo, la urbanización acelerada y el aumento de la huella de carbono. Así mismo estudios, demostraron que los niveles elevados de CO₂, junto

con una pérdida masiva de vegetación y/o superficies permeables, afectan la composición atmosférica del planeta, la calidad del aire local disminuye, aumento en las temperaturas del aire urbano y exacerban el fenómeno ICU, lo que tiene consecuencias inmediatas para la salud y la comodidad de sus habitantes (Vuckovic et al., 2019).

Para combatir el crecimiento urbano a futuro se han planteado nuevas técnicas y estrategias de planeación y diseño urbano de las ciudades, por ejemplo, en los últimos años se aplicaron políticas de densificación urbana vertical como un método alternativo para mitigar los efectos negativos asociados con la urbanización global y el fenómeno ICU. En el Boletín No. 102 de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) publicado el 19 de abril de 2016, la titular de la SEDATU afirmó: “Hoy, se tiene la necesidad de pensar en ciudades compactas que sean verticales y no horizontales, de esta forma los asentamientos humanos no se alejan de los servicios, la conectividad y las fuentes de trabajo” (Secretaría de Desarrollo Agrario, 2016).

Un ejemplo de ello es el estudio realizado por Vuckovic et al., (2019) sobre el potencial de la densificación urbana para mitigar los efectos ICU y mejorar las condiciones térmicas exteriores en Viena, Austria, empleando el diseño evolutivo, por medio del uso de nuevas tecnologías. Los resultados revelaron un notable efecto de protección solar de las extensiones verticales introducidas en los edificios existentes, lo que produjo una disminución de la temperatura y mejoró las condiciones térmicas dentro de los cañones y patios urbanos más sombreados.

Estas nuevas técnicas de diseño se centran en que las tecnologías futuras se entrelacen con los enfoques tradicionales para generar entornos confortables y sostenible al tiempo que se ahorra dinero y recursos. Las nuevas herramientas permiten la simulación de diferentes escenarios basados en procesos paramétricos para capturar la ciudad con todas sus capas (Fink et al., 2018; Karssenberg et al., 2018; Kwinter, 2011). En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo optimizar bajo un principio evolutivo de elitismo, la morfología de un cañón urbano para que sea capaz de alcanzar proporciones geométricas de compacidad solar orientadas a mitigar el efecto de sobrecalentamiento derivado de la ICU a microescala.

Las técnicas de modelado paramétrico permiten generar un amplio conjunto de escenarios de diseño urbano que cumplan con los criterios establecidos (Showkatbakhsh & Makki, 2020). Navarro-Mateu et al., (2018), afirma que “a partir de la computación evolutiva (EC) es posible desarrollar un diseño bajo un solo modelo que aborde múltiples objetivos en conflicto” (pag.01). Los resultados obtenidos del presente trabajo, brindarán una perspectiva ambiental a los profesionales de la construcción y la planeación urbana.

Durante las próximas décadas, los planificadores urbanos y las partes interesadas enfrentarán desafíos en términos de generación y flujo de energía y recursos. Su principal preocupación será, sin duda, elegir formas adecuadas de planificación, distribución y generación de energía sostenible, así como aumentar la eficiencia energética, para disminuir la demanda energética de edificios en áreas urbanas y potenciar el ahorro de energía (Carrasco et al., 2016; Santamouris et al., 2011).

1.4. Antecedentes

Entre las décadas de 1950 y 1960 varios científicos estudiaron de manera independiente la evolución de las especies, con el fin de implementarla como herramienta de optimización y búsqueda de soluciones en problemas de ingeniería. El objetivo se enfocaba en evolucionar una población de posibles soluciones a un problema en específico aplicando técnicas orientadas en la selección natural y la variación genética de las especies. Posteriormente, en 1960 investigadores como W. Bledsoe y G. Friedman, G. Box y H. Bremermann, desarrollaron algoritmos de optimización y aprendizaje automatizado. Para finales de los años sesenta, se empezaron a emplear algoritmos evolutivos para la resolución de problemas de optimización multiobjetivos (Acosta et al., 2006; Barrera, 2010).

Sin embargo, la creación de algoritmos evolutivos como tal, se le atribuye a John Holland en los años sesenta. Holland estudió las adaptaciones que ocurren en la naturaleza con el fin de establecer las bases sobre la cual estos mecanismos de adaptación natural pudiesen trasladarse a los sistemas informáticos. Estos algoritmos emplean la selección, el cruzamiento y la mutación de parámetros. Los algoritmos

representan un método eficaz de búsqueda y optimización, inspirados en la teoría de selección y reproducción de Charles Darwin. En esta teoría de selección, los individuos más aptos tienen mayor probabilidad de sobrevivir y sus descendientes de transmitir sus genes a las próximas generaciones (Mateos, 2015).

De ahí que, los algoritmos evolutivos se han aplicado en una extensa variedad de campos desde los años ochenta, como las matemáticas, las finanzas, la ingeniería aeroespacial, la bioquímica y biología molecular. Más tarde, en 1995, en su libro “Una Arquitectura Evolutiva” John Frazer, afirma que existe un estilo arquitectónico enfocado en las estrategias evolutivas: Arquitectura Evolutiva. Su idea se basaba en que las fuerzas de la naturaleza modifiquen las formas arquitectónicas de la ciudad a lo largo de las generaciones y que estas respondan a su entorno (Booker et al., 1989).

Posteriormente en el 2001, Caldas y Norford emplearon algoritmos evolutivos para el diseño de fachadas como estrategia para el consumo de energía anual. Usaron como caso de estudio la Escuela de Arquitectura de Oporto en Portugal, diseñada por el arquitecto Álvaro Siza. Los resultados demostraron que los algoritmos evolutivos funcionan como herramienta para arquitectos y diseñadores durante las etapas de diseño permitiendo identificar áreas con posibles problemas y la propuesta de soluciones alternativas. El estudio fue replicado en otras regiones geográficas. Los algoritmos mostraron una capacidad de adaptación a las diferentes zonas climáticas (Barrera, 2010).

En las últimas décadas se han empleado como una parte habitual de la práctica arquitectónica. Arquitectos como Gaudí, Otto, Sutherland, Frederick J., Heinzd, Patrik Schumacher y Zaha Hadid, han concebido y modelado estructuras y formas complejas con diferentes grados de capacidad técnica. Hoy en día, estos algoritmos son empleados para la generación de soluciones de diseño que optimicen múltiples objetivos en conflicto por medio de la variación morfológica controlada y dirigida dentro del tejido urbano.

En la actualidad, diversos investigadores han incorporado el uso de algoritmos evolutivos en estudios de islas urbanas de calor, como herramienta de diseño y

evaluación de estrategias que mitiguen los efectos generados por las ICU. Enfocándose en la morfología urbana, como la relación de aspecto y orientación. Con base en los estudios que se han realizado, a continuación, en la Tabla 1 se muestran los hallazgos y recomendaciones de los autores. Según Landsberg, (1981), la “ICU es un reflejo de los cambios microclimáticos totales provocados por las alteraciones de las superficies urbanas” (p. 275). Este fenómeno ha sido documentado desde principios del siglo pasado y se han llevado a cabo investigaciones detalladas durante 60 años (Chandler, 1961; Landsberg, 1981; Lee, 1975; Oke, 1987).

Tabla 1.

Recomendaciones y hallazgos de los autores

Autor-Año	Ciudad	Hallazgos y recomendaciones del autor
Navarro-Mateu et al., (2018)	Barcelona	Realizar estudios a partir de la computación evolutiva es posible desarrollar un diseño bajo un solo modelo que aborde múltiples objetivos en conflicto
Showkatbakhsh & Makki, (2020)	Barcelona	La aplicabilidad de principios biológicos de la homeostasis en los procesos de diseño generativo permite que las ciudades se adaptan a los cambios ambientales
Vuckovic et al., (2019)	Viena, Australia	Las técnicas de densificación urbana son efectivas para la mitigación de los efectos de la ICU y mejorar las condiciones térmicas en exteriores.
Abdollahzadeh & Bilor, (2021)	NSW, Australia	Recomiendan que el eje de la calle deberá estar orientado a una dirección noreste-suroeste y con una relación de aspecto <1
Ng & Cheng, (2012)	N/A	Recomiendan que el valor óptimo para la relación de aspecto de los cañones puede variar en función a la orientación de la calle, en este sentido, para calles orientadas al norte-sur y este-oeste se considera una relación de 0.8 y 2, y >3 respectivamente.
Santamouris et al., (2017)	N/A	Encontró que la estrategia de mitigación de la ICU más eficaz es la que involucra una combinación de: materiales reflectantes, vegetación, agua y sombreado.
Chokhachian et al., (2017)	Génova, Italia	Estimación de una relación entre parámetros geométricos (altura del edificio, ancho de la calle) y la intensidad de ICU.
Hamdi & Schayes, (2009)	Brasilea, Suiza	Estimación de una disminución en la intensidad de ICU con una alta relación H/W y una disminución de 0,4 °C en ICU debido a cada aumento de 0,1 en SVF.
Lau et al., (2014)	Gotemburgo, Frankfurt y Oporto, Europa	Determinaron la temperatura del aire más alta (58.1 °C) en el cañón con la relación H/W más baja (0.5) y girado a 45° Ejemplificación de la importancia de la geometría urbana ante la exposición a la radiación solar

Nakata-Osaki et al., (2015)	N/A	Sugerencia de una herramienta desarrollada para simular la intensidad de ICU en diferentes escenarios urbanos
Hu et al., (2016)	China	Probaron la posibilidad de mitigar el ICU mediante la optimización del SVF de las formas urbanas, a través de un modelo paramétrico.

1.5. Contextualización del objeto de estudio

- I. El crecimiento urbano de la ciudad de Ensenada es regulado por el Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Ensenada (PDUCP 2030). Para efectos del presente estudio, destacó que:
 - a) “Al momento de su publicación, el PDUCP reconoce la existencia de un déficit de 780 unidades de vivienda” (pág. 23).
 - b) “Uno de los objetivos al 2030 es definir los coeficientes de ocupación y utilización del suelo (COS y CUS) y densidades considerando las características ambientales del territorio, así como otros factores como la infraestructura y valores de suelo” (pág. 54).
 - c) “El crecimiento por redensificación está definido por un desarrollo intraurbano regido por la propuesta de densificación, se aplicarán los COS y CUS correspondientes de cada zona y uso de suelo. Se densificará de acuerdo con las condiciones marcadas en el nivel normativo del PDUCP 2030 previniendo infraestructura innecesaria. Sin embargo, el programa prevé la necesidad de desarrollar estudios técnicos más puntuales de impacto urbano que permitan establecer la densidad más adecuada” (pág. 62).
 - d) El 80 % de la traza urbana corresponde a uso de suelo habitacional en sus distintas modalidades (IMIPENS 2010, pág. 13).
- II. La actual política de crecimiento urbano y sus respectivas estrategias de redensificación no consideran aspectos de calidad ambiental del microclima de las ciudades, que conllevan a la intensificación del fenómeno de ICU y contraviene la densificación del desarrollo intraurbano puesto que:
 - a) Las relaciones de propiedad y forma de edificación de los usos de suelo habitacionales centran su atención en modalidades predominantemente

unifamiliares entre las que se distinguen la vivienda unifamiliar (HU) y campestre (HC).

- b) La densidad de ocupación de uso de suelo establece tres rangos (baja, media y alta) y una clasificación que tiende a la densificación horizontal, propiciando así un crecimiento de baja compacidad y como resultante, ciudades dispersas con propensión al sobrecalentamiento urbano (Tabla 2).

Tabla 2.

Rangos de densidad de ocupación para el uso habitacional

Habitacional Unifamiliar (HU)	Habitacional Multifamiliar (HM)
HBU – Habitacional baja unifamiliar	HBM1 – Habitacional baja multifamiliar
HMU – Habitacional media unifamiliar	HBM2 – Habitacional baja multifamiliar
	HMM1 – Habitacional media multifamiliar
HAU – Habitacional alta unifamiliar	HMM2 – Habitacional media multifamiliar
	HAMh1 – Habitacional alta multifamiliar horizontal

Nota. Elaborado a partir del “Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Ensenada 2030 (PDUCP 2030)”. Tablas 29 y 30.

- c) Solo la modalidad HAMv2 (Habitacional alta multifamiliar vertical) de uso de suelo habitacional alienta la densificación edificable en forma vertical.

1.6. Pregunta de investigación e Hipótesis

Dado lo anterior, se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo la optimización morfológica de un cañón urbano a través de técnicas algorítmicas de diseño evolutivo podría ser útil en la mitigación de la isla de calor urbana a microescala?

Como hipótesis se plantea la siguiente: la optimización geométrica del tejido urbano por medio de la implementación del algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II permite analizar y evaluar multifactorialmente bajo un principio evolutivo de elitismo, un conjunto de escenarios morfológicos y sus implicaciones en el ambiente térmico a fin

de mitigar el sobrecalentamiento del microclima derivado de la isla de calor en un cañón urbano.

1.7. Objetivos de investigación.

1.7.1. Objetivo general

Optimizar bajo un principio evolutivo de elitismo, la morfología de un cañón urbano para que sea capaz de alcanzar proporciones geométricas de compacidad solar orientadas a mitigar el efecto de sobrecalentamiento derivado de la isla de calor a microescala.

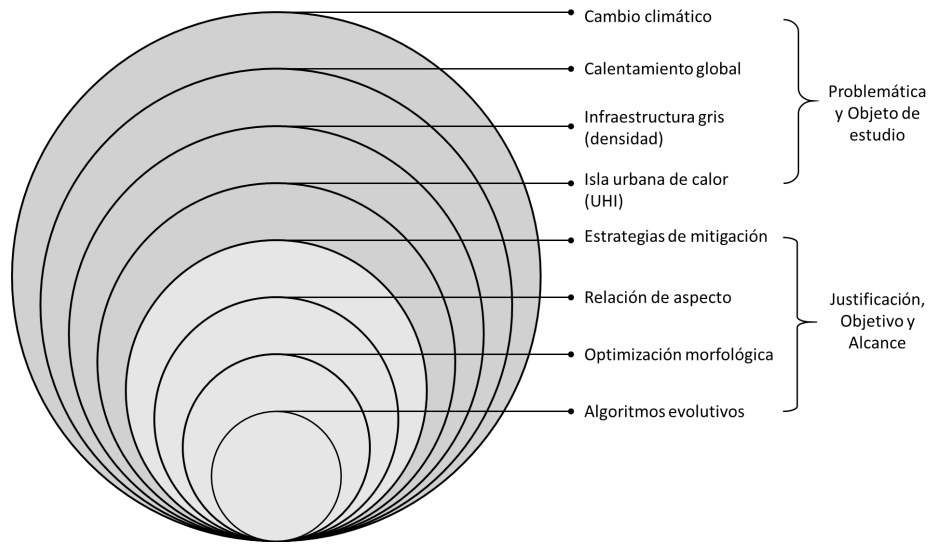
1.7.2. Objetivos específicos

- Identificar los factores ambientales preponderantes del efecto de isla de calor que afectan el desempeño contextual de los cañones urbanos de la ciudad de Ensenada, B.C.
- Identificar la compacidad solar óptima de un cañón urbano (H/W), a razón de su relación geométrica de aspecto y factor de cielo visible a través de un caso base de estudio que mejor favorezca al ambiente térmico.
- Definir los objetivos de aptitud y parámetros dinámicos (genes) del diseño evolutivo para la selección y evaluación de la solución óptima orientados a la mitigación del sobrecalentamiento del cañón urbano de estudio.

En la Figura 4 se describe a través de un diagrama de cebolla la perspectiva deductiva del objeto de estudio en relación con el planteamiento del problema. Se parte de un planteamiento del problema global o general y a partir de este fenómeno el tema se va delimitando acorde al objeto de estudio que es la isla de calor urbana. En este sentido y siguiendo esta perspectiva deductiva, la presente investigación se centra en el estudio de estrategias de mitigación, específicamente hablando de la relación de aspecto como variable para la optimización morfológica de cañones urbanos mediante herramientas de diseño evolutivos (algoritmos evolutivos).

Figura 4.

Perspectiva deductiva del objeto de estudio en relación con el planteamiento del problema



1.8. Alcances y Limitaciones

a) Alcance

El alcance de esta investigación se centra en la optimización de un cañón urbano bajo un principio de elitismo como estrategia de mitigación de la isla de calor a nivel microescala.

b) Limitaciones

Las limitaciones presentadas en este estudio se relacionan con el modelado paramétrico y el proceso de investigación. El proceso de modelado paramétrico y evolutivo demanda tiempo, debido a que se requiere de establecer diversas operaciones de manera simultánea para el diseño del algoritmo evolutivo, es decir los objetivos de aptitud y genes deben de programarse de manera simultánea respecto a la geometría primitiva del cañón urbano de manera que el motor evolutivo pueda realizar las variaciones morfológicas en función a los objetivos definidos. De modo que, a medida en que el algoritmo se vuelve complejo se convierte en un proceso que requiere de más tiempo y capacidad de cómputo para la simulación de los escenarios, por tanto, los procesos de simulación suelen ser largos a medida en que aumenta el nivel de complejidad.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

Dentro de este apartado se presentan los marcos teórico, referencial, normativo, conceptual y el estado del arte. El presente capítulo tiene como objetivo de definir los conceptos y teorías relacionadas con el tema, con el fin de contextualizar temporal y espacialmente al lector mediante una breve reseña del pasado y el presente del tema.

2.1. Marco Teórico

El presente apartado tiene como objetivo definir los conceptos y teorías relacionadas con el tema de estrategias de mitigación por medio de la optimización morfológicas de cañones urbanos a través de diseño evolutivo, para ello se establecieron cinco ejes temáticos, el primero se definen los conceptos fundamentales del bioclima urbana, el segundo eje aborda el fenómeno de isla de calor urbana, el tercero aborda la geometría urbana, en el cuatro se presentan las principales estrategias de mitigación del sobrecalentamiento urbano y por último los algoritmos evolutivos y herramientas de cómputo.

2.1.1. Bioclima urbano

La Real Academia Española (2020) define el concepto de clima como el “conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan a una región”. Mientras que, la Organización Meteorológica Mundial durante la Conferencia de Varsovia, lo define como *“las condiciones meteorológicas medidas para el mes y año calculadas sobre un periodo (...)”* (Andrades & Múñez, 2012).

Su importancia con la Arquitectura se debe a que representa un factor fundamental en el diseño de espacios arquitectónicos ya que busca satisfacer las necesidades de los usuarios. El clima se compone mediante cuatro principales factores:

- Temperatura: es un estado relativo de calor o frío, dentro de esta variable climática intervienen otros parámetros y factores como son la radiación solar, la composición y naturaleza de las superficies, el viento, entre otros. La temperatura influye en el confort de las personas y por lo general se mide en °C.
- Radiación solar: “es la energía que emite el sol a la atmósfera, mediante ondas electromagnéticas en forma de radiación de onda corta. Una vez que entra a la Tierra, la cantidad de radiación absorbida por las superficies es regresada al espacio exterior en forma de radiación de onda larga” (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, n.d.).

A la cantidad de energía solar (W/m^2) recibida en forma de radiación solar, medida desde la superficie terrestre en un plano perpendicular a los rayos solares, se le conoce como constante solar, su valor es de $1\,367\text{ W/m}^2$. Existen tres tipos de radiación: radiación total horizontal, radiación difusa y radiación directa. Por otro lado, las unidades de medición varían en función al periodo de tiempo. En la Tabla 3 se presentan valores de referencia de radiación total en una localidad de referencia para distinto periodos de tiempo.

Tabla 3.
Valores de referencia de radiación total horizontal en una localidad de referencia para distintos periodos de tiempo

Valores de referencia de radiación total horizontal				
Constante solar	Instante*	Día**	Mes**	Año**
1 367 W/m^2	124 – 947 W/m^2	4 – 7.5 $\text{kWh/m}^2/\text{día}$	175 – 225 $\text{kWh/m}^2/\text{mes}$	500 – 2 200 $\text{kWh/m}^2/\text{año}$
*Ensenada, Baja California				
**Mexicali, Baja California				

Nota. Elaborado a partir de “Life cycle cost of photovoltaic technologies in commercial buildings in Baja California, México” por Armendariz et al., 2016. Renewable Energy.

- Vientos: son flujos de corrientes de aire como consecuencia de los cambios de presión de la superficie. El aire caliente tiende a elevarse, mientras que el frío a descender y se mide en m/s (J. Hernández, 2022).
- Humedad relativa: “cantidad de vapor de agua que puede contener el aire dependiendo de su temperatura” (Scoin, 2019). En este sentido, el aire caliente contiene más vapor de agua que el aire frío. La humedad relativa se mide en porcentaje y representa la cantidad máxima de vapor de agua que se puede contener a cierta temperatura.

El bioclima urbano o microclima hace referencia a las condiciones del clima que presentan las ciudades en comparación a las condiciones que pudieran darse en zonas rurales. Sin embargo, la urbanización es uno de los factores principales que modifica de manera irreversible el microclima de las urbes (Franco, 2016).

Köppen García establece una clasificación de bioclimas denominada como Sistema de Clasificación Climática de Köppen, en la Tabla 4 se muestran las clasificaciones

que dan como resultado en México. Más adelante, se realizaron modificaciones de García lo que dio como resultado una clasificación de climas húmedos (Tabla 5) y climas secos (Tabla 6) (García, 2004).

Tabla 4.

Agrupación de zonas climáticas de Köppen

Símbolo	Temperatura Media Mensual		Zonas de clima
	Mes más caliente	Mes más frío	
A	> 18 °C	> 18 °C	Tropical lluvioso
B			Seco
C	> 18 °C	> 0 °C	Templado lluvioso
D	> 10 °C	< 0 °C	Frío lluvioso
E	< 10 °C	< 0 °C	Polar

Nota. Elaborado a partir de “Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen” por García, 2004. Universidad Autónoma de México 5ta edición.

Tabla 5.

Modificaciones del Sistema de Clasificaciones, climas húmedos

Climas húmedos	Símbolo	Temperatura media anual
Cálidos	A	Sobre 22 °C
Semicálidos	A(C)	Entre 18 °C y 22 °C
	(A)C	Sobre 18 °C
Templados	Ca; Cb	Entre 12 °C y 18 °C
Semifríos	C(b'); Cc	Entre 5 °C y 12 °C
Fríos	E (T) C	Entre -2 °C y 5 °C
Muy fríos	EF	Bajo -2 °C

Nota. Elaborado a partir de “Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen” por García, 2004. Universidad Autónoma de México 5ta edición.

Tabla 6.

Modificaciones del Sistema de Clasificaciones, climas secos

Climas secos	Símbolo	Temperatura media anual
Cálidos	B (h')	Sobre 22 °C
Semicálidos	Bh' (h); Bh	Entre 18 °C y 22 °C
Templados	Bk; Bk'	Entre 12 °C y 18 °C
Semifríos	B (k'')	Entre 5 °C y 12 °C

Nota. Elaborado a partir de “Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen” por García, 2004. Universidad Autónoma de México 5ta edición.

2.1.1.1. Índice Universal de confort térmico (UTCI)

El Índice Universal de Confort Térmico (por sus siglas en inglés UTCI) es un estándar internacional de sensación de temperatura exterior. Intervienen variables climáticas (como la temperatura, radiación, vientos y humedad), para su cálculo toma en cuenta la adaptación de la vestimenta de la población en respuesta a la temperatura ambiental real y la temperatura media radiante, esta última se define 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” (Diccionario de Arquitectura y Construcción, 2021).

Para Lai et al., (2014), lo definen como la “temperatura ambiente equivalente de un entorno, que provoca la misma respuesta fisiológica de una persona en el entorno real” (p. 2); además hace mención que el UTCI es apropiado para realizar evaluaciones térmicas en todos los climas en exteriores. Golasi et al., (2018) coincide con esta descripción y agrega que este índice evalúa la respuesta fisiológica determinada por condiciones micrometeorológicas a través de un modelo multimodos de termorregulación. Para (Chen, 2020) el UTCI, en comparación con el resto de los índices térmicos, es el índice que cubre el rango más amplio de condiciones climáticas.

El UTCI es empleado en estudios de isla de calor urbano para el análisis de microclimas urbanos. Pues indica la sensación térmica que percibe el cuerpo humano al aire libre (estrés por calor o por frío).

2.1.2. Isla de calor urbana

En la actualidad, más de la mitad de la población mundial habita en zonas urbanas y se espera que durante las próximas dos décadas la tasa de crecimiento de la población urbana se duplique en comparación a la tasa de crecimiento de la población mundial. Las actividades humanas y la urbanización han aumentado la demanda de energía y el consumo de combustibles fósiles, en consecuencia, se registran aumentos en la contaminación del aire y la temperatura global (ONU, 2001).

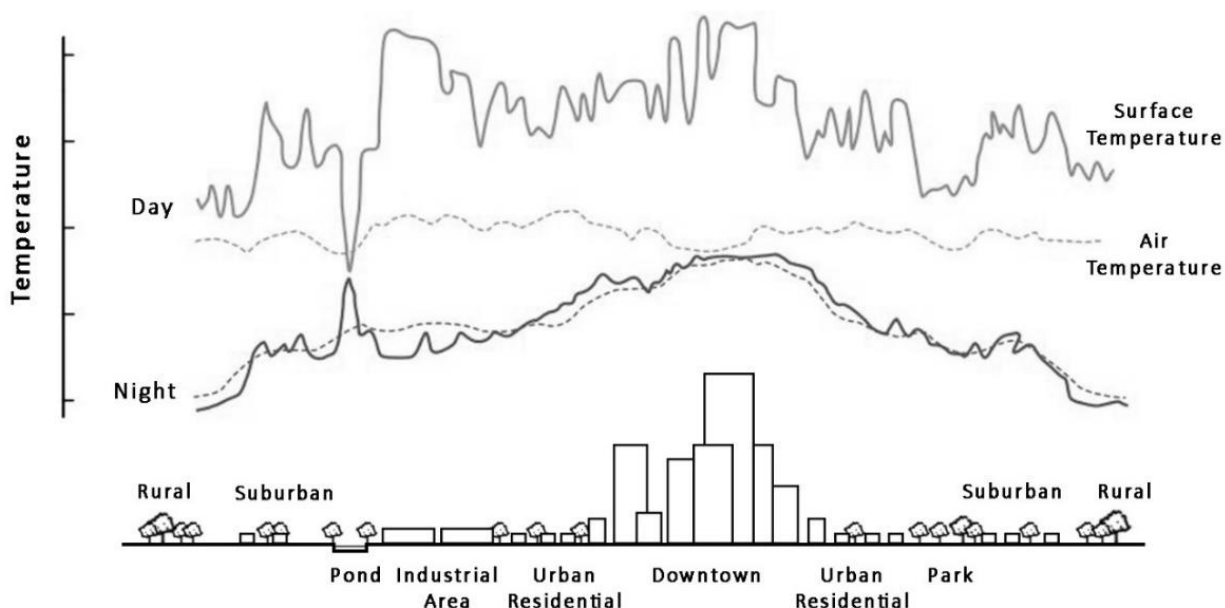
Las áreas urbanas afectan tanto el clima global como el local lo que conlleva al desarrollo de microclimas urbanos y a diferencias climáticas entre las áreas urbanas y

su entorno, fenómeno conocido como isla de calor urbana. Las ICU son objeto de estudio en los últimos años, debido a que es el fenómeno más registrado del cambio climático. Según Landsberg, (1981), la “ICU es un reflejo de los cambios microclimáticos totales provocados por las alteraciones de las superficies urbanas” (p. 275). Por otra parte, Oke en su libro titulado *Boundary Layer Climates* de 1987, define el concepto de ICU como la diferencia de las condiciones climáticas registradas en el centro de la ciudad y su entorno rural. Oke realizó diversos estudios sobre las causas físicas de la formación de ICU y lo ha correlacionado con la población urbana, las condiciones climáticas, la geometría de los cañones urbanos y las propiedades térmicas de los materiales de las superficies. Después de sus estudios, numerosos investigadores han contribuido al campo proporcionando modelos, métodos y/o técnicas para la estimación de la intensidad de la ICU y estrategias de mitigación.

Por otro lado, Moonen (2012), menciona que la exacerbación de la ICU es un problema inminente que actualmente agrava el consumo de energía de las edificaciones, los aumentos en la demanda de enfriamiento causados por los ICU causarán un aumento de hasta 500 % en las emisiones de CO₂ para 2050 para los edificios en los centros de las ciudades, en relación con los valores del 2000.

Así mismo, Aleksandrowicz (2017), afirma que las ICU empeoran el ambiente térmico de las ciudades, aumentan las cargas de enfriamiento de los edificios y reducen la comodidad térmica de los espacios abiertos. Además, durante el verano, es probable que la combinación de calentamiento global y ICU provoquen un aumento de la mortalidad relacionada por golpes de calor. En la Figura 5 se muestra el efecto de la ICU, la temperatura aumenta en el área urbana en comparación con los espacios suburbanos y las zonas rurales. La escala de temperatura muestra la diferencia entre esos espacios, una media de 4 °C que puede variar según las condiciones particulares de cada ciudad y puede llegar a alcanzar los 12 °C (Oke, 1988a).

Figura 5.
Esquema de la isla de calor urbana



Nota. Obtenido de “*Respuestas Urbanas Al Cambio Climático En América Latina*”. Por NU. CEPAL, 2013.

2.1.2.1. Causas de ICU

La magnitud de la intensidad de ICU puede variar en función al clima, la ubicación geográfica y la morfología de las ciudades. Blender (2015), explica que los resultados de la urbanización, la falta de infraestructura verde y azul, el uso de pavimentos impermeables y el empleo de automóviles incrementan la magnitud de este fenómeno. Rajagopalan et al., (2014) dividen los factores que afectan la ocurrencia e intensidad de la ICU en dos categorías. La primera categoría son los factores meteorológicos, incluida la velocidad y dirección del viento, la radiación y la temperatura del aire.

La segunda categoría es básicamente el tejido urbano de la ciudad, como la densidad de las áreas urbanizadas, la relación de aspecto H/W, el SVF, los materiales de las superficies urbanas, la disminución de la vegetación y el fuerte aumento de la población durante el último siglo, esto se resume en la Figura 6. De igual manera, Deng y Wong (2020) mencionan tres elementos principales que afectan la temperatura urbana a escala local: a) edificaciones; b) infraestructura verde y c) pavimentos.

Figura 6.

Parámetros que afecta el microclima urbano y contribuyen a la formación del fenómeno ICU



Nota. Elaborado a partir de “Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort”. Por Jamei et al., 2016. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 1002–1017.

a) Población urbana

De acuerdo con investigadores, el crecimiento de la población urbana conduce a un aumento de la temperatura del aire, debido principalmente a la densidad de las áreas urbanas y las propiedades térmicas de las superficies urbanas. Diversos estudios examinaron el efecto de la población sobre la magnitud del ICU y concluyeron que el tamaño de la población puede determinar el efecto de isla de calor. Igualmente, Oke (1973) demostró una relación directa entre el tamaño de la población y las diferencias de temperatura para ciudades de Europa y América del Norte. Observó un aumento mínimo de temperatura de 1 °C, que puede llegar a alcanzar los 12 °C dependiendo del crecimiento y tamaño de la población. Gracias a estas observaciones se han formulado nuevas ecuaciones para determinar la intensidad de ICU para diferentes regiones del mundo (Hudson, 2010; Johnson et al., 1991).

b) Geometría urbana

La geometría urbana es considerada como la principal causa para el desarrollo de ICU. Los principales parámetros que intervienen son la forma urbana, la ubicación y orientación, la altura de los edificios y los espacios entre ellos y la presencia de cañones urbanos. Estos parámetros son responsables en el desarrollo de microclimas urbanos y el balance energético del medio ambiente. En cuanto a los cañones urbanos, estos se conforman de las superficies de los edificios, la calle y el volumen de aire entre ellos. La geometría del cañón (longitud del cañón y altura de las edificaciones) y su orientación afectan directamente a la temperatura del aire dentro del cañón, por lo que la intensidad de la ICU es cada vez mayor con la presencia de estos cañones en toda la ciudad (Kim et al., 2018; Niachou et al., 2008).

En conclusión, el efecto de la geometría urbana sobre magnitud del efecto de ICU se puede resumir en dos razones principales: a) las estructuras urbanas absorben una gran cantidad de radiación provocando un incremento en la temperatura del aire y b) la geometría urbana reduce la ventilación en todos los cañones, la cuál es considerada un extractor de calor. Diferentes estudios han demostrado que la velocidad del viento disminuye significativamente en cañones profundos e incluso en cañones poco profundos (Niachou et al., 2008).

c) Propiedades térmicas de las superficies urbanas

El albedo representa la reflectividad de la radiación solar entre las superficies y es uno de los parámetros importantes en los estudios de ICU. Puesto que las propiedades térmicas de los materiales de las superficies urbanas son determinantes en el consumo de energía, en el aumento de la temperatura del ambiente térmico y por ende en las condiciones de confort de los espacios arquitectónicos. Por ejemplo, los materiales con alta conductividad térmica y alta admitancia térmica presentan cambios en la temperatura de su superficie debido a que absorben la radiación solar de onda corta y disipan parte del calor almacenado por medio de procesos convectivos y radiativos a la superficie incrementando la temperatura ambiente (Hudson, 2010). Taha (1997), en su investigación demostró que el aumento del albedo y vegetación reducen la temperatura

del aire cerca de la superficie. Encontró que al aumentar el albedo de 0.25 a 0.40, la temperatura del aire puede reducirse hasta 4 °C.

d) Falta de vegetación

La vegetación representa un papel clave en los entornos urbanos debido a los diversos beneficios que aporta al medio ambiente, regula la temperatura, mantiene la humedad en los espacios y reduce el efecto de sobrecalentamiento urbano. Sin embargo, en las zonas urbanas, las áreas de vegetación se han reducido debido al reemplazo de superficies naturales por superficies artificiales. Como consecuencia, la disminución de la liberación de calor latente por falta de superficies húmedas, induce el desarrollo de isla de calor (Wang & Akbari, 2016; Xu et al., 2021).

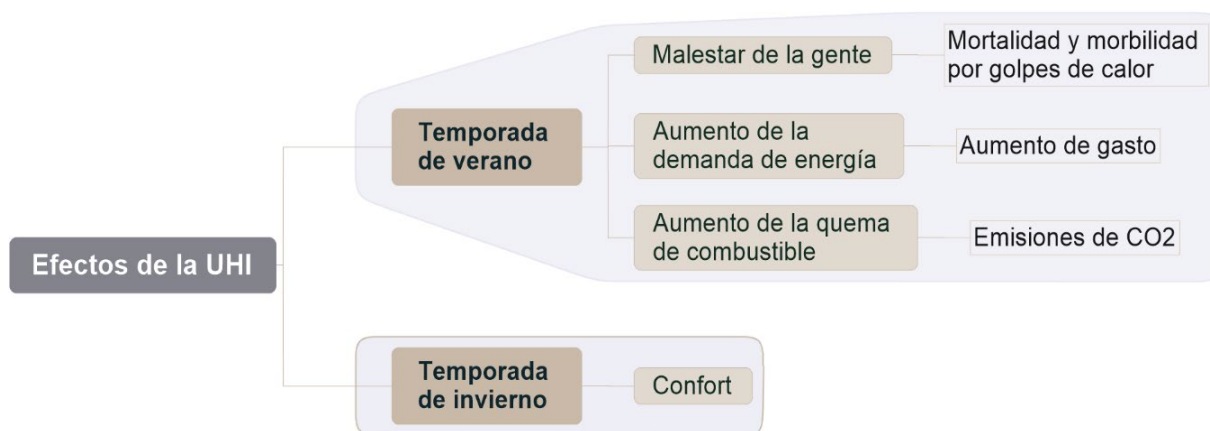
2.1.2.2. Efectos generados por la ICU

En consecuencia, la isla de calor urbana se ha documentado en más de 400 ciudades del mundo. Investigaciones recientes han concluido que el sobrecalentamiento urbano puede duplicar la huella ecológica urbana, reducir considerablemente las condiciones de confort térmico en espacios exteriores, aumentar la concentración de CO₂ y causar una sanción económica grave (Santamouris, 2016; Schinasi et al., 2018). Así mismo, el calor urbano se incrementa debido al cambio climático local y global, en respuesta, se observan aumentos en la magnitud, frecuencia y duración de temperaturas extremas, aumento en la demanda de energía, malestar térmico prolongado, estrés por calor, y aumento de la mortalidad y morbilidad relacionada con el calor en zonas urbanas habitantes (Emmanuel & Krüger, 2012; Khan et al., 2021; Santamouris et al., 2017).

Investigaciones demostraron que la mortalidad relacionada con el calor aumenta considerablemente por encima de un umbral de temperatura en climas fríos. En el esquema de la Figura 7 se presentan los efectos de la formación de la ICU de acuerdo con Nuruzzaman, (2015).

Figura 7.

Efectos de la formación de la isla de calor urbana



Nota. Elaborado a partir de “*Urban Heat Island: Causes, Effects, and Mitigation Measures – A Review*”. Por Nuruzzaman, 2015. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 3 (67).

2.1.3. Estrategias de mitigación de la ICU

Se han propuesto y evaluado numerosas estrategias para mitigar los efectos de la ICU. Las estrategias que a continuación se presentan, constituyen las bases teóricas y los antecedentes a este tema de investigación, puesto a que el propósito del presente estudio es emplear la optimización morfología como estrategia de mitigación de la ICU.

Para mitigar el sobrecalentamiento urbano, mejorar la calidad de vida y los niveles de confort en espacios interiores y exteriores, se ha desarrollado y evaluado la implementación de estrategias y tecnologías de mitigación del calor urbano, demostrando que pueden reducir las temperaturas máximas medias del aire hasta 3 °C (Santamouris et al., 2017). Estas estrategias de mitigación incluyen principalmente la elección y combinación de diferentes tecnologías como, materiales avanzados (superficies fluorescentes altamente reflectantes, materiales termocrómicos, etc.); infraestructura verde; cambios en la geometría urbana; sistemas de control solar y sistemas avanzados de agua y evaporación (Berdahl et al., 2016; Fiorito et al., 2020; Garshasbi & Santamouris, 2019).

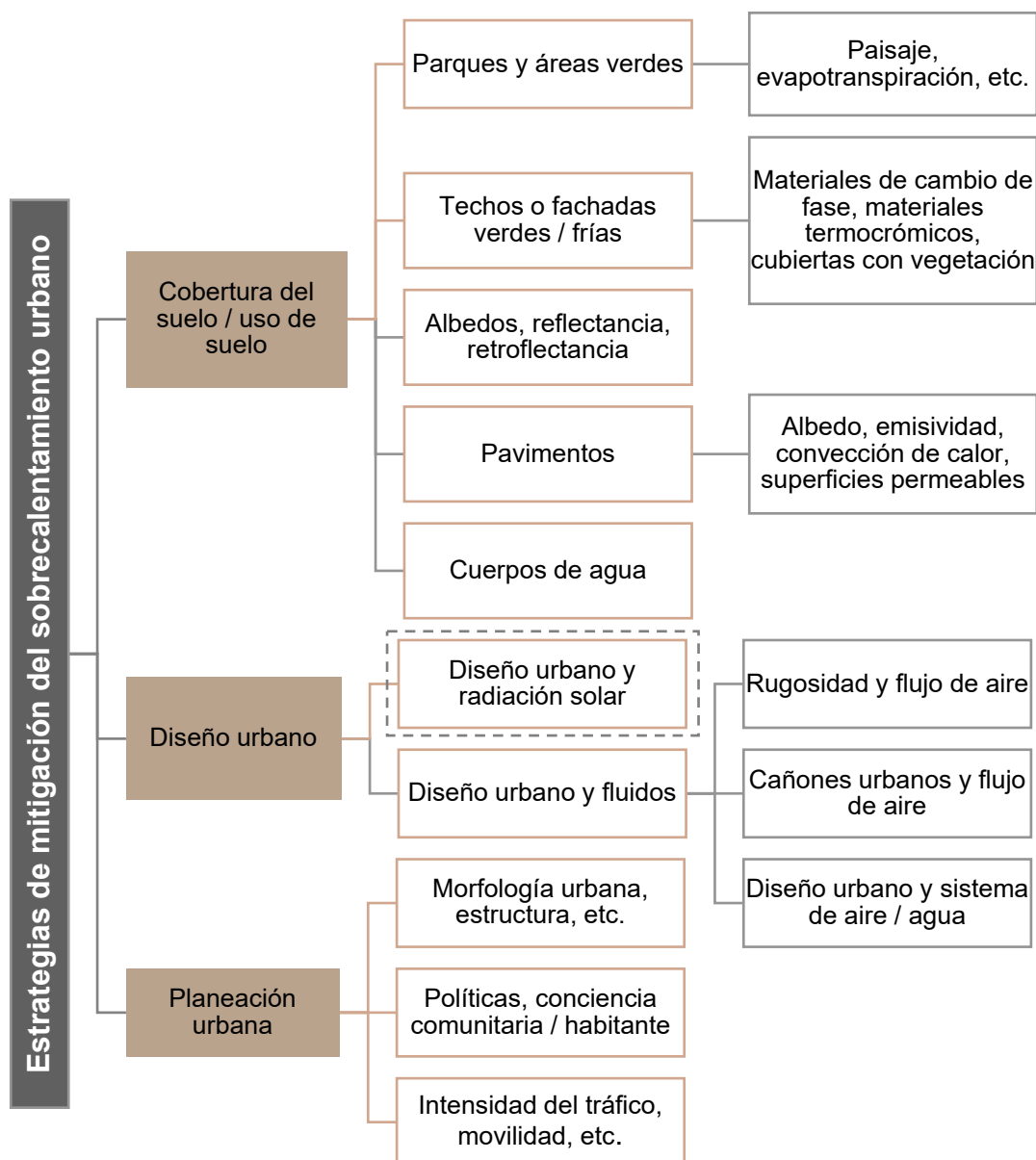
Dentro de este marco Tsoka (2020) menciona que, por lo general, los materiales reflectantes, la vegetación urbana y las soluciones de formas urbanas pueden reducir mejor la temperatura que los sistemas de agua y evaporación. Santamouris y Fiorito (2021) afirman que los valores de albedo más altos reducen la temperatura ambiente y el impacto del exceso de calor urbano en la salud, encontrando que disminuyen la mortalidad relacionada con el calor entre 0.1 y 4 muertes por día, lo que corresponde a un promedio de disminución de muertes cercana al 19.8 % por grado de caída de temperatura. Mientras que Deng y Wong (2020) aseguran que los techos verdes, los pavimentos fríos y los espacios verdes en las zonas urbanas son medidas que favorecen el enfriamiento de las superficies y contribuyen a la reducción del consumo de energía.

Los materiales fríos se caracterizan por una alta reflectancia solar, que es capaz de reducir la temperatura superficial, y una alta emisividad capaz de disipar el calor absorbido durante el día. Carnielo en 2014, demostró que el aumento de la reflectancia solar de los pavimentos conduce a efectos urbanos positivos en términos de reducción de la temperatura del aire y a una consecuente disminución del consumo eléctrico para la demanda de refrigeración del edificio.

Varios autores proponen la “*ecologización*” urbana como una estrategia para mitigar las consecuencias del sobrecalentamiento urbano. El reverdecimiento urbano modela las temperaturas y favorece procesos como la evapotranspiración y el sombreado de las superficies (Bartesaghi Koc et al., 2018). A nivel mundial se han detectado diversas estrategias de mitigación de la ICU como consecuencia del cambio climático, pero se han identificado tres grupos: a) cobertura de suelo; b) diseño urbano y c) planeación urbana, en la Figura 8 se describen cada uno de estos grupos, mientras que en el esquema de la Figura 9 se presentan las principales medidas para enfriar el entorno urbano según Nuruzzaman, estas son: techos verdes; materiales de alto albedo en techos y en pavimentos; vegetación y árboles de sombra; cuerpos de agua; planificación urbana y pavimentos y superficies permeables (Nuruzzaman, 2015).

Figura 8.

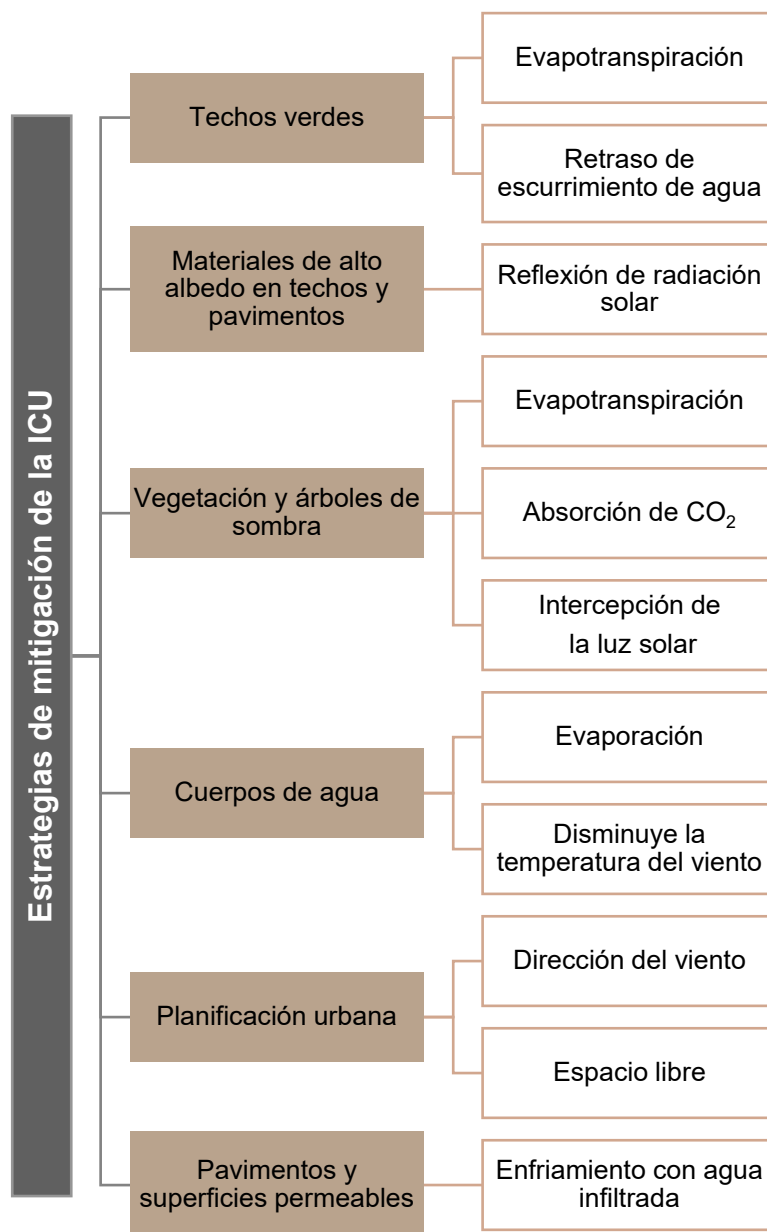
Principales estrategias de mitigación del sobrecalentamiento urbano



Nota. Elaborado a partir de “Urban Heat Island: Causes, Effects, and Mitigation Measures – A Review”. Por Nuruzzaman, 2015. International Journal of Environmental Monitoring and Analysis, 3 (67).

El avance de herramientas digitales en las últimas décadas, ha permitido el desarrollo de nuevos métodos y técnicas para el diseño y evaluación de estrategias que mitiguen los efectos de la ICU a nivel macro y microescala, por ejemplo, el empleo del diseño evolutivo como modelo para el diseño de estrategias de mitigación.

Figura 9.
Estrategias de mitigación del efecto de isla de calor urbana



Nota. Elaborado a partir de “Urban Heat Island: Causes, Effects, and Mitigation Measures – A Review”. Por Nuruzzaman, 2015. International Journal of Environmental Monitoring and Analysis, 3 (67).

2.1.4. Cañones urbanos

Diversos investigadores han centrado sus estudios en los efectos de la geometría de los cañones urbanos, como la orientación y la relación de aspecto, sobre el microclima urbano. Hoy en día, se ha demostrado que los cañones urbanos juegan un papel clave para determinar los efectos de la ICU. Naranjo (2014), define al cañón

urbano como una “unidad urbana básica formada por las paredes de los edificios, el suelo, la calle entre edificios y el volumen de aire contenido dentro” (p.22), así mismo señala que “su importancia está en el potencial que tienen para explicar el fenómeno de islas de calor urbano” (Naranjo, 2014. p.22). Rotach y Calanca (2003) lo definen como un espacio en forma de U entre las estructuras de los edificios contiguos que atrapa la radiación de onda larga atribuida al factor de cielo visible (SVF) y aumenta la temperatura alrededor.

Los cañones urbanos afectan varios parámetros locales, incluida la temperatura, el viento, la luz y la calidad del aire. La composición geométrica del cañón atrapa la radiación solar y aumenta la temperatura en el centro de la ciudad a diferencia de las zonas rurales. Chen (2012), por su parte, garantiza que comprender esta geometría y sus efectos ayudará en el diseño de calles y en la conservación de energía. Los cañones urbanos se conforman por tres parámetros principales: altura, ancho y longitud; y estos a su vez, se simplifican en tres relaciones principales: relación de aspecto (H/W); orientación del cañón y el factor de cielo visible o *Sky view factor* (SVF).

- Relación H/W: también denominada relación de aspecto, consiste en la relación entre la altura (H) de las edificaciones y ancho de vialidad (W).
- Orientación del cañón (θ): es un parámetro importante ya que determina el acceso solar y la velocidad del viento en cañones urbanos. La orientación nos indica el ángulo en grados de la calle del cañón con respecto al eje norte-sur, existen cuatro tipos de orientaciones: norte-sur, este-oeste; noreste-suroeste y noroeste-sureste.
- Factor de cielo visible (SVF): representa la visibilidad del cielo desde el nivel del suelo en un punto específico o dentro de un área urbana. Proporcionando una indicación de la geometría de la calle y la densidad del edificio (Dirksen et al., 2019a; Gál et al., 2007; Middel et al., 2018b).

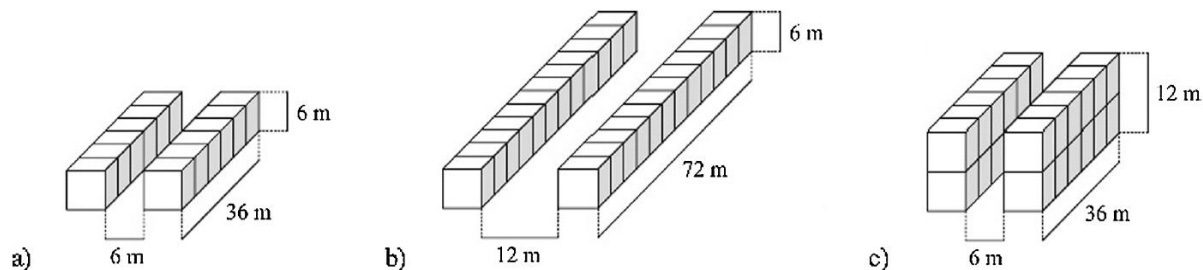
Estos tres parámetros, representan un papel clave en el incremento y reducción de la temperatura de la superficie y la absorción de la radiación solar, en la alteración de patrones de flujo del aire y entre otros aspectos. Diversos estudios mostraron que la

temperatura de la superficie del cañón es 10 a 13 °C más alta que la temperatura del aire (Abdollahzadeh & Biloría, 2021; Oke, 1988b).

Por ejemplo, en estudio realizado por Manni et al., (2020) para identificar las configuraciones geométricas mejores y peores casos para cañones urbanos, esto a través del empleo de diseño paramétrico, combinaron diferentes orientaciones del eje principal (norte-sur, este-oeste y noroeste sureste), así como la relación de aspecto altura-anchura para explorar diferentes patrones de densidad urbana (Figura 10). El algoritmo que desarrollaron para definir paramétricamente las posibles configuraciones geométricas de los UC se implementó en una interfaz gráfica de diseño computacional asistida por algoritmos y un visualizador 3D. Llevaron a cabo un análisis de radiación solar con el objetivo de estimar la radiación solar que sale del cañón. Encontraron que las orientaciones este-oeste y norestes-suroeste son las más críticas.

Figura 10.

Dimensiones y proporciones de cañones urbanos



Nota. Obtenido de “Development and validation of a Monte Carlo-based numerical model for solar analyses in urban canyon configurations”. Manni et al., 2020. Building and Environment, 170(November 2019), 106638. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106638>

2.1.4.1. Relación de aspecto

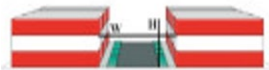
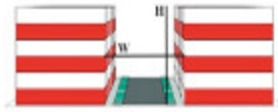
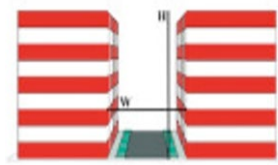
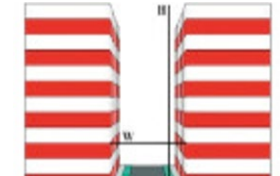
El detalle geométrico más importante sobre un cañón de la calle es la relación entre la altura media del cañón (H) y su ancho (W), definida como la relación de aspecto (H/W). Oke (1988b), demostró una relación fuerte lineal entre la relación H/W y la intensidad de la ICU. Según el autor, el aumento de la relación H/W corresponde a la disminución en la tasa de enfriamiento del ambiente urbano en relación con el área

rural. El valor de la relación H/W se emplea para clasificar los cañones urbanos de la siguiente manera (Tabla 7) (Vardoulakis et al., 2014):

- Cañón uniforme: relación de aspecto =1
- Cañón profundo: $HW > 2$
- Cañón medio profundo: $1 < HW < 2$
- Cañón poco profundo: $HW < 1$

Tabla 7.

Relación de aspecto (H/W)

Relación de aspecto (H/W)			
0.5	1	1.5	2
			

Nota. Elaborado a partir 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 & Biloría, 2021. Frontiers of Architectural Research.

Los cañones profundos con una relación de aspecto más alta reducen el acceso a la luz solar y la temperatura del aire, proporcionando espacios públicos de 3.5 a 6 °C más fríos. El valor óptimo para la relación de aspecto de los cañones puede variar en función a la orientación de la calle, en este sentido, para calles orientadas al norte-sur y este-oeste se considera una relación de 0.8 y 2, y >3 respectivamente (Andreou, 2013; Ng & Cheng, 2012).

Otra clasificación se basa en la simetría del cañón:

- Cañón simétrico: los edificios que forman el cañón tienen aproximadamente la misma altura.
- Cañón asimétrico: los edificios que forman el cañón tienen diferentes alturas significativas.

Para calcular la relación HW de un cañón simétrico basta con dividir la altura entre el ancho de la calle como se muestra en la Ecuación 1 esto se apoya en la Figura 11, mientras que para cañones no uniformes o asimétricos se calcula la altura media y esta se divide entre el ancho de la calle ver Ecuación 2 y Figura 12 (Takkanon, 2016).

Ecuación 1.

Cálculo de la Relación de Aspecto (a) y altura media (b), para cañones uniformes

$$\begin{array}{ll} \text{a)} & HW = \frac{\bar{H}}{w} \\ \text{b)} & H_1 = H_2 = \bar{H} \end{array}$$

Donde:

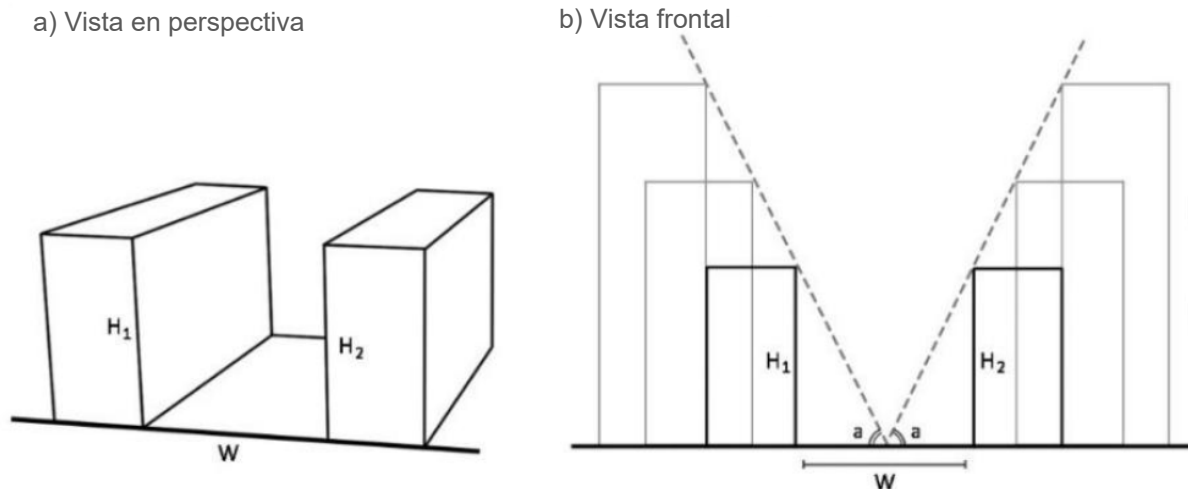
HW: Relación de aspecto

H: Altura media

W: Ancho de la calle

Figura 11.

Cálculo de la relación H/W para un cañón simétrico



Nota. Obtenido de “A study of height to width ratios and Urban Heat Island Intensity of Bangkok”. Por Takkanon, 2016. 4th International Conference on Countermeasure to Urban Heat Island.

Ecuación 2.

Cálculo de la Relación de Aspecto (a) y altura media (b), para cañones no uniformes

$$\begin{array}{ll} \text{a)} & HW = \frac{\bar{H}}{w} \\ \text{b)} & (H_1 + H_2)/2 = \bar{H} \end{array}$$

Donde:

HW: Relación de aspecto

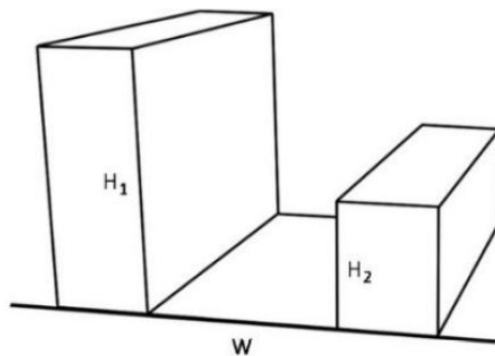
H: Altura media

W: Ancho de la calle

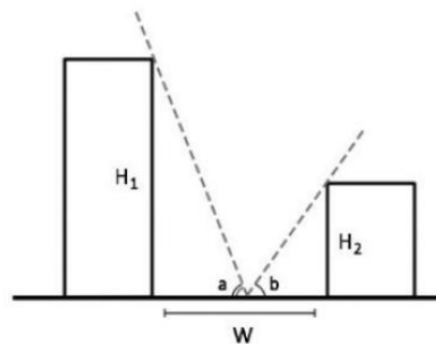
Figura 12.

Cálculo de la relación H/W para un cañón no uniformes o asimétricos

a) Vista en perspectiva



b) Vista frontal



Nota. Obtenido de “A study of height to width ratios and Urban Heat Island Intensity of Bangkok”. Por Takkanon, 2016. 4th International Conference on Countermeasure to Urban Heat Island.

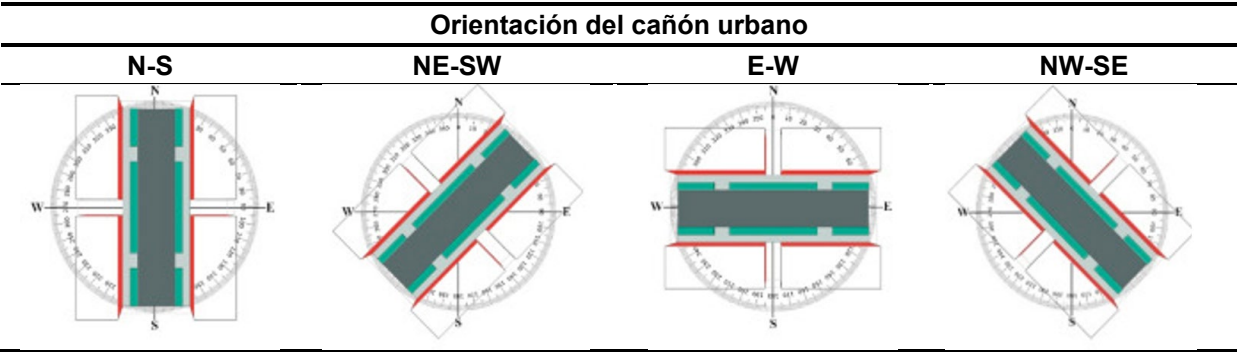
El efecto de un cañón en la calle sobre el viento local y la calidad del aire puede diferir mucho en las diferentes geometrías del cañón. Nakata-Osaki et al., (2018), afirma que el aumento en la relación de H/W corresponde a la disminución en la tasa de enfriamiento del ambiente urbano en relación con el área rural.

2.1.4.2. Orientación de los cañones urbanos

Diversos investigadores, han encontrado que tanto la relación de aspecto como la orientación representan los factores de diseño más cruciales para el confort térmico al aire libre. La orientación de la calle influye de manera significativa en el factor de flujo del aire a nivel peatonal. Jamei & Rajagopalan, (2019) mencionan que los cañones urbanos son un factor importante para determinar el acceso de luz solar y velocidad del viento, debido a que la orientación de la calle restringe el viento y el acceso solar al cañón (Deng & Wong, 2020). Las calles que se encuentran orientadas en la misma dirección del flujo del viento predominante experimentan una mayor velocidad del viento, el cuál puede

llegar a disminuir si se reduce la relación de aspecto del cañón. Además, el nivel de acceso solar al cañón se encuentra determinado por la orientación, por lo que esta induce cambios tanto en los flujos de radiación como en la temperatura del aire. Como se observa en la Tabla 8, existen cuatro tipos de orientaciones: N-S; NE-SW; E-W y NW-SE (Huang & Li, 2017).

Tabla 8.
Orientación de cañones urbanos



Nota. Obtenido 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 & Biloría, 2021.

a) Orientación norte – sur

La literatura indica que los cañones urbanos con una orientación norte – sur brindan el mayor nivel de comodidad al aire libre para los peatones debido a que proporciona el mayor grado de confort térmico para los usuarios en los espacios abiertos, sin embargo, esta orientación provoca un aumento elevado en el consumo de energía por parte de los edificios por refrigeración, debido a que la envolvente es más susceptible a la pérdida de calor y están menos expuestas a la luz solar (Tsoka et al., 2020).

b) Orientación este – oeste

La orientación este–oeste es considerada en algunos estudios la peor orientación, mientras que en otro la segunda peor, debido a que experimenta radiación solar extrema y presentan el valor más alto de temperatura radiante media, por lo que sufren de condiciones térmicas más cálidas y mayor tiempo de prolongación de la temperatura media radiante (Manni et al., 2020).

Así mismo Srivani & Jaremit, (2020), explican que en este tipo de orientación se perciben las peores condiciones térmicas durante el día y recomiendan que en cañones urbanos profundos se apoyen del uso de la sombra mutua de los edificios y vegetación para mejorar el rendimiento térmico y evitar la radiación solar directa. Por otra parte Limona et al., (2019) señala que en comparación con los cañones urbanos orientados norte- sur, la orientación este – oeste, requiere de sombra en las horas más críticas de calor donde las temperaturas son elevadas.

c) Orientación noreste – suroeste

Algunas investigaciones han encontrado que los cañones orientados al noreste–suroeste representa el diseño óptimo en la planificación urbana, debido a que se presenta una mayor velocidad del viento y los parámetros climáticos de humedad y temperatura del aire no registran cambios drásticos en comparación con otras orientaciones (Chatzidimitriou & Yannas, 2017).

d) Orientación noroeste - sureste

Abdollahzadeh y Bioria (2021), en su investigación demostraron que la orientación noroeste – sureste del eje de la calle representa la peor opción en cuanto al confort térmico, debido que a medida que aumenta el tiempo de exposición solar y la temperatura media radiante, la velocidad del viento disminuye. Por lo que los usuarios suelen experimentar estrés térmico durante el 33.14 % del día.

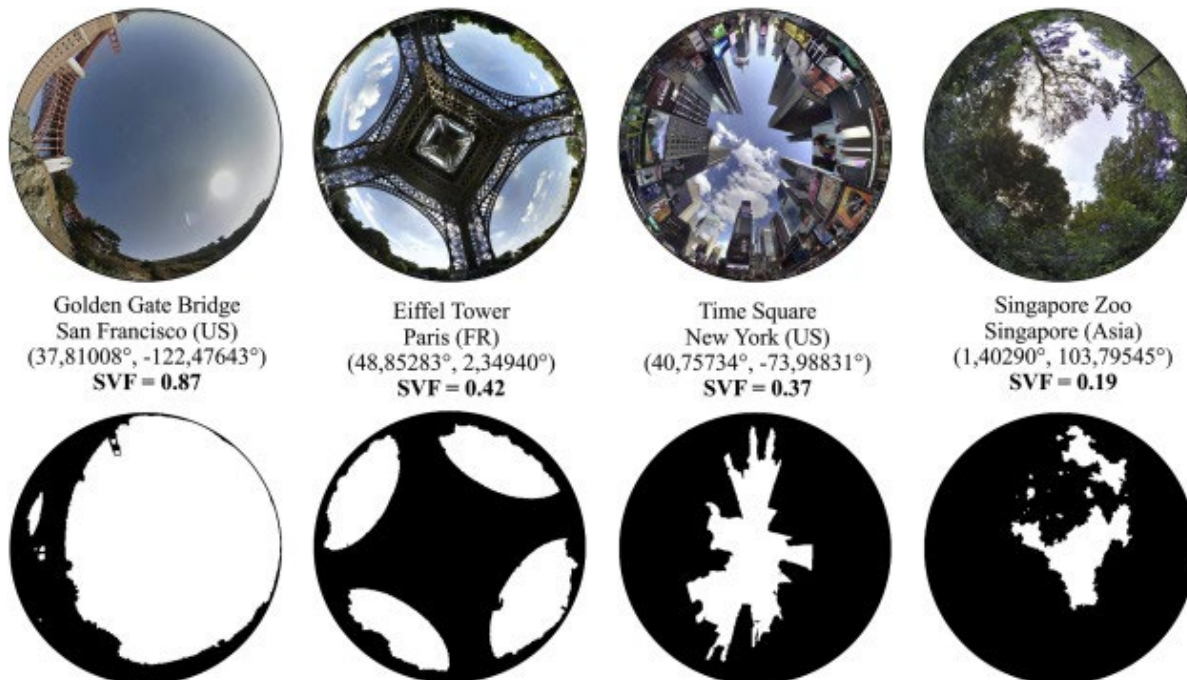
2.1.4.3. Factor de cielo visible (SVF)

El factor de cielo visible o *Sky View Factor* (SVF) se emplea comúnmente para indicar el impacto de la geometría urbana en las diferencias de temperatura del aire en zonas urbanas, pues juega un papel clave en la climatología urbana y sus variaciones espaciales, al determinar la proporción de radiación de onda larga emitida desde las superficies urbanas a la atmósfera. El SVF representa la fracción de cielo visible desde el nivel del suelo, esta fracción de cielo visible proporciona una indicación de la geometría de la calle y la densidad del edificio. Cuando la porción de cielo es limitada se presenta un mayor almacenamiento neto del calor dentro de los edificios y un

aumento del fenómeno de isla de calor. La vegetación también juega un papel en la visibilidad del cielo, pero a diferencia de la geometría estos no almacenan calor, pero si limitan la radiación de onda larga saliente (Chen et al., 2012b).

El SVF se puede calcular a partir de diferentes métodos, por ejemplo, el empleo de fotografías de ojo de pez o hemisféricas, pero este método no resulta factible cuando se requieren cubrir grandes áreas. Por otro lado, algunos estudios utilizan bases de datos de edificios 3D de alta resolución o el empleo de cuadrículas de elevación digital (DEM). El SVF se mide dentro de un rango de 0 a 1, un valor de 1 significa que el cielo no está obstruido y es completamente visible, mientras que un valor 0 significa que el cielo se encuentra completamente bloqueado. A medida que el SVF disminuye debido a edificios de gran altura y calles estrechas, la pérdida de radiación de onda larga se restringe, el calor queda atrapado y por lo tanto el efecto de ICU aumenta en los cañones urbanos (Figura 13) (Dirksen et al., 2019b, 2019a).

Figura 13.
SVF de un cañón urbano



Nota. Obtenido de “Sky View Factor footprints for urban climate modeling”. Por Middel et al., 2018a. Urban Climate, 25(February), 120–134. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.05.004>

2.1.4.4. *Efectos de los cañones urbanos*

Como las unidades geométricas básicas de la forma urbana, los cañones urbanos representan un elemento clave en la formación de microclimas urbanos. Incorporados por varios parámetros geométricos, como la relación de aspecto (H/W) y la orientación, los cañones determinan el acceso solar, la sombra y las condiciones del viento, afectando la temperatura del aire y de la superficie. En consecuencia, estas condiciones de microclima influyen considerablemente en el confort térmico exterior (Deng & Wong, 2020).

Durante las últimas décadas, investigadores han estudiado los efectos de la geometría de los cañones urbanos (es decir, relación de aspecto y orientación) sobre los patrones de distribución de los parámetros del microclima, como el flujo de calor, la temperatura del aire, el acceso solar y el flujo del viento. A continuación, se describen los efectos de los cañones sobre la temperatura y el viento. Esta última puede diferir mucho en las diferentes geometrías del cañón.

a) Temperatura

Los cañones urbanos contribuyen al efecto de ICU. La temperatura dentro del cañón puede elevarse entre 2 y 4 °C. Los estudios de los fenómenos de temperatura consideran la irradiancia, el ángulo de incidencia, el albedo de la superficie, la emisividad, la temperatura y el SVF. Para un SVF alto, los cañones urbanos se enfrían rápidamente, porque hay más cielo disponible para absorber el calor retenido por los edificios. Con un SVF bajo, el cañón puede retener más calor durante el día, creando una mayor liberación de calor durante la noche. En un estudio realizado por Nunez y Oke (1977) sobre los intercambios de energía en un cañón urbano en latitudes medias en verano. Se encontró que el piso de cañones orientados al norte-sur almacenan más energía. Debido a que, el 30 % del excedente radiante del mediodía se almacena en los edificios. Por la noche, la falta de radiación solar se contrarresta con la liberación de energía que se estaba almacenando en los materiales del cañón. Este fenómeno contribuye en gran medida al efecto isla de calor urbano (Johnson et al., 1991).

b) Viento

Los cañones de las calles pueden modificar tanto la velocidad como la dirección de los vientos. Los patrones de flujos resultantes dentro del cañón dependen de la dirección de la calle y la dirección relativa del viento. Cuando el viento es paralelo al cañón, se observa un efecto de canalización en el que los vientos tienden a canalizarse y acelerarse a través del cañón. En cambio si el viento es perpendicular al cañón, se crea un flujo de viento que gira verticalmente con un vórtice primario centrado dentro de los cañones de la calle. Según la relación de aspecto, se definen diferentes regímenes de flujo en los cañones de las calles (Lien et al., 2004).

2.1.5. Algoritmos evolutivos y herramientas de cómputo

Aunque tradicionalmente las investigaciones del sobrecalentamiento y el microclima urbano se han realizado por medio de observaciones, durante las últimas décadas los avances en recursos computacionales mejoraron de manera significativa la aplicación de técnicas de simulación numérica, por ejemplo, el uso de algoritmos como herramienta de diseño y evaluación. Los algoritmos permiten la identificación de áreas con posibles problemas y sugieren soluciones alternativas durante el proceso de diseño.

Existen diferentes definiciones de algoritmos evolutivos, Barrera (2010) los define como “métodos de programación adaptativo que puede usarse para resolver problemas de búsqueda y de optimización, produciendo una gran cantidad de modelos o posibles soluciones a un problema” (p. 20). Por otro lado, Makki (2019) hace mención que los “algoritmos evolutivos son procesos iterativos que se estructuran en lógicas simplificadas extraídas de la evolución y se utilizan comúnmente en muchos campos para resolver problemas no lineales e intratables. Ofrecen una herramienta de diseño iterativo para la exploración de formas arquitectónicas y urbanas tanto estables como dinámicas” (pág. 8).

Para Camporeale (2017) representan “un proceso de simulación simplificada de la evolución, comportamiento y adaptación de una población a través del tiempo, donde las generaciones son creadas, probadas y seleccionadas mediante la reproducción y

mutación” (p. 37-38). Los algoritmos evolutivos representan un método eficaz de búsqueda y optimización, inspirados en la teoría de selección y reproducción de Charles Darwin. En esta teoría de selección, “los individuos más aptos tienen mayor probabilidad de sobrevivir y sus descendientes de transmitir sus genes a las próximas generaciones” (p. 37-38) (Mateos, 2015).

2.1.5.1. Funcionamiento de los algoritmos evolutivos

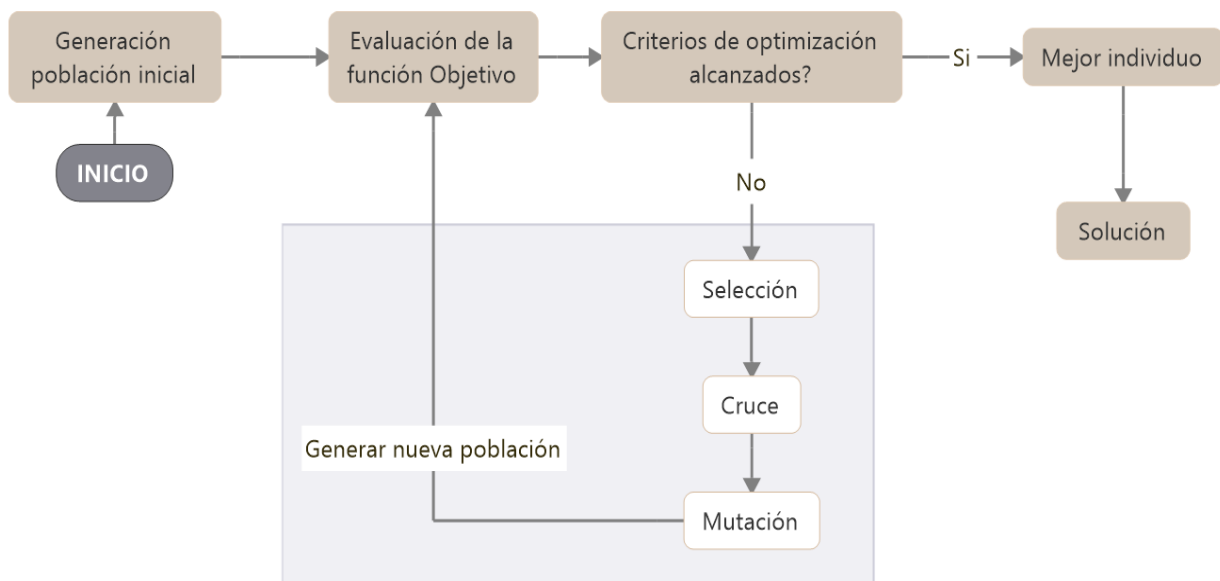
Los algoritmos funcionan generando un conjunto aleatorio de posibles soluciones a un problema. Estas soluciones se codifican imitando los cromosomas de las células. Posteriormente la codificación es evaluada en función a su capacidad de resolución del problema. De acuerdo con Barrera (2010), los algoritmos visuales son empleados como motor de optimización debido a su capacidad de reproducción, obteniendo una gran cantidad de soluciones candidatas a un problema. Cada una de las soluciones es evaluada según su capacidad de adaptabilidad y cada ciclo de interacción y selección representa una generación, de tal manera que después de un cierto número de interacciones, se espera que el mejor individuo de alguna de las generaciones esté cerca de la solución óptima.

Esto se resume a continuación en cuatro pasos acorde con Barrera: I) el algoritmo evolutivo funciona a partir de una población inicial de soluciones aleatorias a un problema. Estas soluciones se codifican y posteriormente se cruzan y mutan entre ellas; II) las soluciones candidatas se ordenan respecto a su valor de aptitud (capacidad de resolución al problema), este valor es medido por lo que, las soluciones con una mejor aptitud obtendrán un mejor resultado; III) las soluciones seleccionadas anteriormente se cruzan entre ellas y su descendencia es mutada. En este sentido, los nuevos parámetros de las soluciones sustituyen a los parámetros anteriores, y se espera que estas nuevas soluciones tengan una mejor aptitud. El objetivo de reemplazar los antiguos parámetros consiste en que las soluciones mejoren en cada ciclo del algoritmo; IV) la nueva población es evaluada bajo un mecanismo de selección, lo que garantiza que las nuevas soluciones generadas respondan de mejor manera a los objetivos de aptitud que impulsan al algoritmo. Si la mejor solución no resuelve el problema entonces se regresa a la fase dos del algoritmo y el proceso se

vuelve a replicar (Barrera, 2010. P. 35) La Figura 14 representa en manera de esquemática el funcionamiento de los algoritmos empleados en la generación urbana.

Figura 14.

Esquema del algoritmo evolutivo empleado para la generación urbana



Nota. Elaborado a partir de “Algoritmos Genéticos como Estrategia de Diseño en Arquitectura”. Por Barrera, 2010. <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>

2.1.5.2. Ventajas de los algoritmos evolutivos

A continuación se enlistan las ventajas del empleo de algoritmos evolutivos elaborados a partir de “Algoritmos Genéticos como Estrategia de Diseño en Arquitectura” por Barrera, (2010) y “El uso de Algoritmos Genéticos aplicados al Diseño Bioambiental Paramétrico” de Camporeale, (2017).

- i. La composición de algoritmos visuales permite analizar fenómenos observados a partir de componentes y funciones paramétricas, lo que es aplicable a objetos de estudio climático y bioclimático;

- ii. La sintaxis de programación y el pseudocódigo del diseño permiten evaluar distintos escenarios sobre un objeto de estudio a partir de modificaciones de las variables participantes;
- iii. El análisis divergente nos permite acceder de manera instantánea a un conjunto de escenarios con resultados distintos implementando así, fenómenos de optimización topológica;
- iv. El uso de funciones matemáticas y vectoriales condicionales permite acotar variables de causa-efecto para determinar correlaciones experimentales en simulaciones (experimentación matemática).

2.1.5.3. Estudios de algoritmos evolutivos y la isla de calor urbana

En los últimos años, se ha experimentado un notable avance tecnológico lo que ha permitido la evolución de técnicas de resolución de problemas por medio de algoritmos de gran complejidad encontrando soluciones óptimas de forma rápida y precisa. De acuerdo con Ene (2016), los algoritmos de optimización topológica permiten sintetizar topologías óptimas encontrando la mejor solución a un problema.

Por ejemplo, un estudio realizado por Hamdan y Oliveira en 2019 en la ciudad de Al Ain, Emiratos Árabes Unidos (EAU) sobre el impacto de las estrategias de diseño urbano en el microclima en condiciones cálidas y áridas, específicamente la relación del cañón, la orientación, el sombreado de la vegetación y la velocidad del viento. El estudio se realizó por medio de simulaciones, utilizando editores visuales de algoritmos con plugin de OpenStudio, EnergyPlus y Radiance y emplearon el índice de Clima Térmico Universal (UTCI). Encontraron que las proporciones de cañones más grandes (1-2) y la orientación de las calles Norte-Sur producen lugares urbanos más cómodos. También se encontró que las superficies de sombreado tienen el potencial de reducir el UTCI en 5 °C.

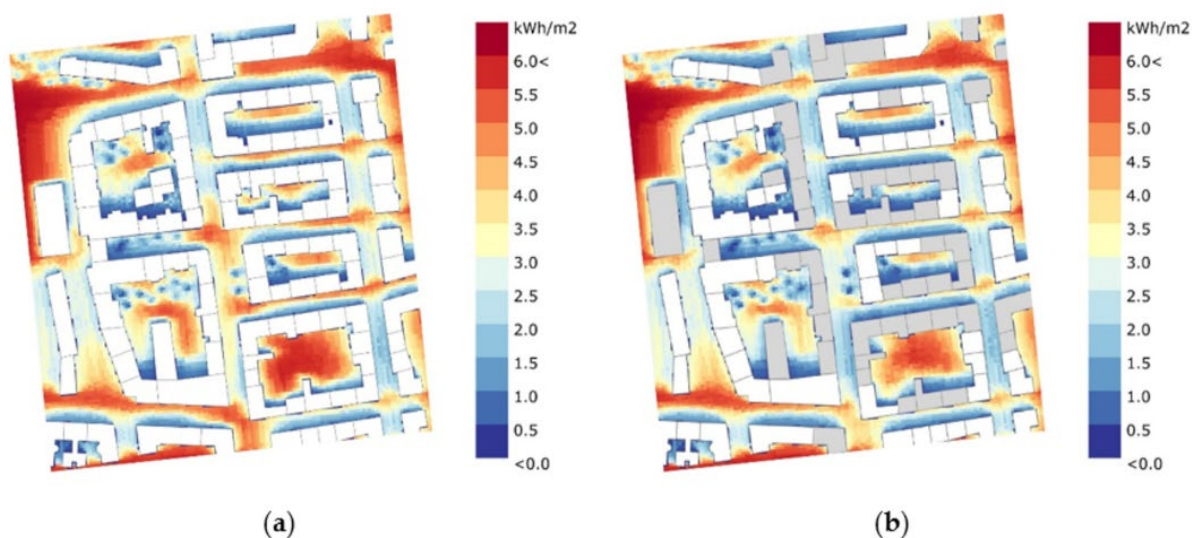
Ese mismo año, Vuckovic et al. realizó un estudio en donde analizó el potencial de la densificación urbana para mitigar los efectos de ICU y mejorar las condiciones térmicas exteriores, en un distrito densamente urbanizado en Viena, Australia. Llevó a cabo un conjunto de simulaciones de microclima urbano para escenarios de pre y post densificación utilizando un entorno paramétrico. El estudio se realizó durante un

período de verano caluroso. Los resultados revelaron un efecto de protección solar notable de las extensiones verticales recientemente introducidas de los edificios existentes, lo que promueve la disminución de la temperatura y las condiciones térmicas mejoradas dentro de los cañones y patios urbanos más sombreados (Figura 15).

Otro estudio en la misma área realizado por Manni et al., en 2019 consistió en analizar diferentes composiciones de cañones urbanos (UC) con el objetivo de encontrar la mejor configuración geométrica. Combinó diferentes orientaciones del eje principal (norte-sur, este-oeste y noroeste sureste), así como la relación de aspecto altura-anchura para explorar diferentes patrones de densidad urbana. Desarrolló un algoritmo en un editor de algoritmos visuales, para definir paramétricamente las posibles configuraciones geométricas de los UC y los modelos generados se visualizaron en modeladores 3D y emplearon el complemento Diva-for-Rhino para el análisis solar con el objetivo de estimar la radiación que sale del cañón.

Figura 15.

Radiación total que alcanza la superficie del suelo: a) caso base; b) densificación



Nota. Obtenido de “Potential of urban densification to mitigate the effects of heat island in Vienna”. Por Vuckovic et al., 2019. Austria. Environments - MDPI, 6(7).

Mientras tanto Evola et al. llevó a cabo un flujo de trabajo en 2020 sobre simulación desarrollado en un entorno paramétrico, donde empleó las herramientas de Ladybug

para modelar las relaciones mutuas entre el microclima urbano, el rendimiento energético del edificio y el confort térmico exterior, con referencia a un cañón urbano ubicado en Catania al sur de Italia. Al acoplar el campo térmico interior y exterior, proporciona tanto la carga térmica dinámica de los edificios con vistas al cañón como los parámetros necesarios para medir el confort exterior percibido por los peatones. En comparación con otros enfoques existentes, este flujo de trabajo ofrece una flexibilidad significativa y hace posible realizar una investigación paramétrica de los efectos de diferentes soluciones de diseño tanto en el entorno interno como en el exterior.

La optimización evolutiva multiobjetivo se ha aplicado ampliamente como estrategia de resolución de problemas desde finales del siglo XX; Aunque las primeras aplicaciones de los principios evolutivos como un proceso de optimización se remontan a la década de 1930, a través del trabajo de Sewell Wright, y luego con más fuerza a través del trabajo del algoritmo genético de Holland y las estrategias evolutivas de Rechenberg. Pero no fue hasta la década de 1980 que surgieron los primeros intentos de diseñar un algoritmo evolutivo multiobjetivo (MOEA), principalmente a través del trabajo de David Schaffer 'Algoritmo genético evaluado por vectores' (VEGA), en el que se seleccionó una población de individuos entre generaciones en oposición al enfoque convencional de algoritmos evolutivos de objetivo único (SOEA) en el que se seleccionaba un solo individuo para crear las generaciones posteriores (Makki et al., 2019).

Sin embargo, David Goldberg, propuso el concepto de integrar la optimización y el dominio de Pareto como una estrategia de selección dentro de un algoritmo evolutivo, lo que permite que el algoritmo aumente gradualmente la adecuación de las soluciones para cada uno de los criterios de aptitud de forma independiente, pero evitando la convergencia temprana hacia una solución local óptima. Inspirados por la investigación de Goldberg, muchos de los principales MOEA de la década de 1990 incorporaron sus estrategias de selección, las más famosas fueron el algoritmo genético multiobjetivo (MOGA), el algoritmo genético Niched-Pareto y el algoritmo genético de clasificación no dominado (NSGA) (Sheikh & Gerber, 2011).

2.1.5.4. Algoritmo NSGA-II

El NSGA-II (Algoritmo de Clasificación no Dominado) es un algoritmo evolutivo multi-objetivo basado en el concepto de dominancia y óptimo de Pareto. Desarrollado por Deb, Agrawal, Pratap y Meyarivan en el año 2000, con el objetivo de integrar el principio de elitismo y disminuir la complejidad del procedimiento de ordenamiento rápido por la no dominancia del antecesor. Las soluciones que conforman al primer Frente de Pareto son los no dominados, mientras que, las que constituyen el segundo frente son los no dominados en ausencia del frente anterior, y así consecutivamente (Alvarado et al., 2005; Correa et al., 2008).

En cuanto al Frente de Pareto, se hace referencia a las soluciones óptimas (individuos élite), es decir las soluciones no dominadas. En general, los algoritmos evolutivos elitistas seleccionan a los mejores individuos (soluciones) con mejores valores en respuesta a los objetivos de aptitud, en el caso del NSGA-II es una posición o rango obtenida en base a los objetivos definidos en el problema de diseño. En el Apéndice 1 se muestra el pseudocódigo del NSGA-II, el cual tiene como objetivo determinar el mejor conjunto de Pareto, a partir de un conjunto inicial de soluciones y aplicando interactivamente la creación de nuevo individuos a partir de operadores evolutivos (Novoa-Hernández, 2015).

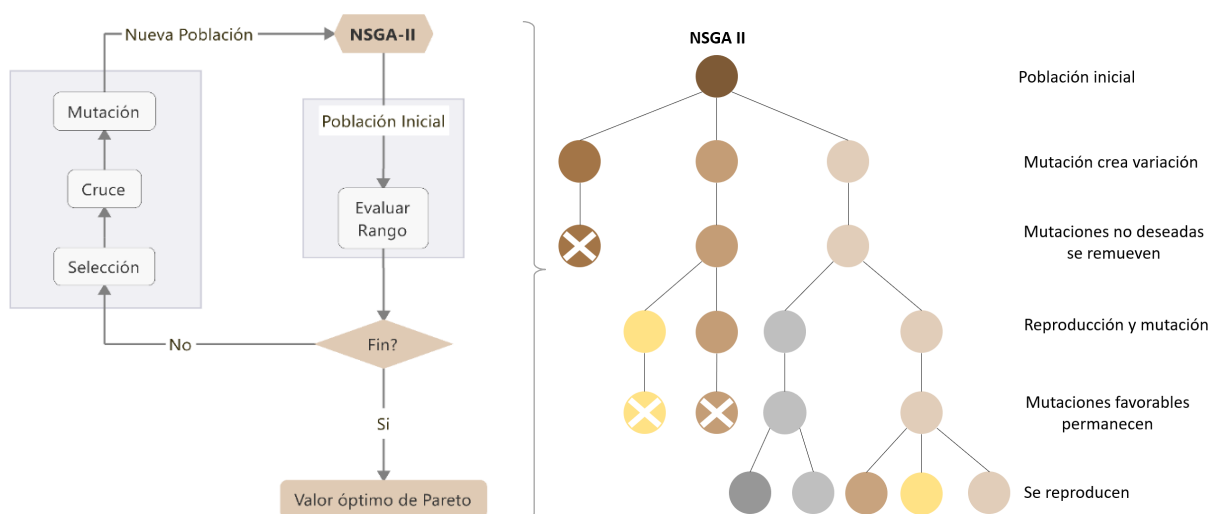
El procedimiento para este algoritmo se resume a partir de los siguientes pasos: (I) Se crea una población inicial de soluciones aleatorias, las cuales serán evaluadas y clasificadas en función de la no dominación. (II) Se aplican mecanismos de selección, cruce y mutación de parámetros para generar la próxima generación de descendientes. (III) A partir de la primera generación en adelante, las nuevas generaciones se crean combinando la población progenitora y la descendiente para mantener el elitismo, identificando los frentes no dominados y generando la siguiente población progenitora. (IV) Se repite el paso anterior hasta alcanzar el número máximo de iteraciones (Deb et al., 2002; Park et al., 2020).

En la Figura 16 (imagen izquierda) muestra a través de un diagrama de flujo el funcionamiento del Algoritmo NSGA-II, mientras que en la imagen de la derecha se

presenta un ejemplo por medio de círculos con diferentes colores la evolución de las generaciones y poblaciones a un problema dado.

Figura 16.

Flujo de trabajo del algoritmo NSGA II



Nota. Elaborado a partir de “A multi-stage optimization of pedestrian level wind environment and thermal comfort with lift-up design in ideal urban canyons”. Por Du et al., 2019. Sustainable Cities and Society, 101424. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101424>

En el 2018, Navarro-Mateu et al., realizaron un estudio de optimización de tejidos urbanos a través del uso de la computación evolutiva. Analizaron una supermanzana urbana de Barcelona, el objetivo fue alcanzar la alta densidad existente de la ciudad recuperando las relaciones de bloque propuesto por el plan original de Cerdà. Los resultados finales en el frente de Pareto muestran un conjunto de soluciones exitosas y diversas que se aproximan a las de Cerdà y al Eixample barcelonés existente (Figura 17).

Por otro lado, Showkatbakhsh y Makki (2020), emplearon los algoritmos evolutivos NSGA-II y SPEA-2 para la generación de morfología urbana. Su estudio se basó en el desarrollo de un diseño bajo un solo modelo que aborde múltiples objetivos en conflicto. Los resultados finales de frente de Pareto muestran un conjunto de soluciones exitosas y diversas en función de los requisitos de diseño. Los mismos autores describen el uso de principios homeostáticos como concepto biológico libre de

escala que asegura la subsistencia de los tejidos urbanos y se basa en su adaptabilidad a los estímulos intrínsecos y extrínsecos, en sus recientes investigaciones han hecho cálculos para evaluar la regulación endotérmica y la exposición solar de salientes en fachadas de geometrías primitivas de edificios.

Figura 17.

Vista aérea 3D de la generación 100 de soluciones candidatas

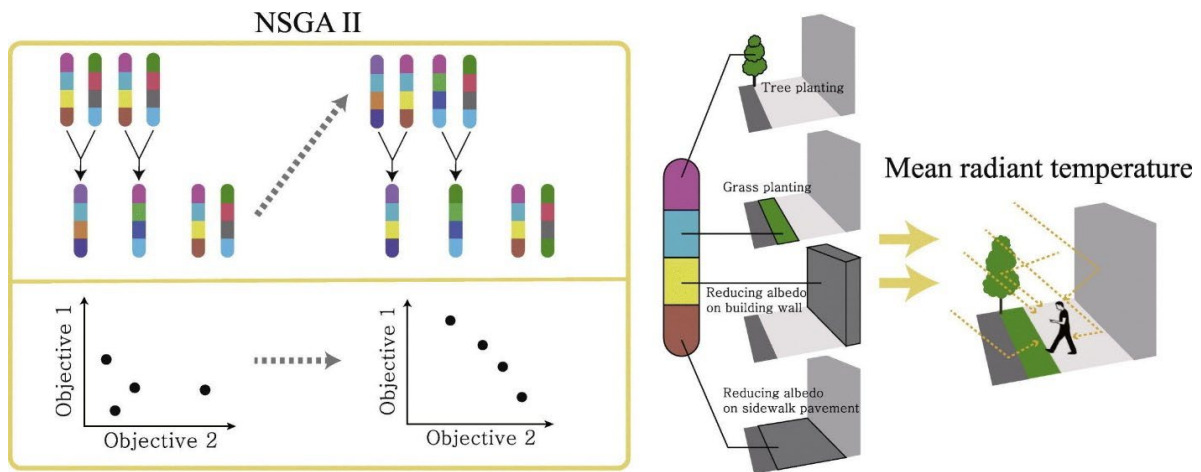


Nota. Obtenido de “Urban-tissue optimization through evolutionary Computation”. Por Navarro-Mateu et al., 2018. Mathematics, 6(10). <https://doi.org/10.3390/math6100189>.

Al mismo tiempo, Park et al., (2020), llevaron a cabo una investigación a través del empleo de un modelo de estrategias múltiples para determinar combinaciones de diseño óptimas para reducir la temperatura radiante media (MRT) en cañones urbanos a través de una variedad de costos y beneficios. Las soluciones se llevaron a cabo mediante un algoritmo NSGA-II con un simulador de MRT. Se seleccionaron cuatro estrategias que involucran: a) plantación de árboles; b) siembra de césped; c) reducción del albedo de los muros de los edificios y d) reducción del albedo de las aceras. Los resultados mostraron una amplia gama de planes alternativos óptimos considerando los efectos de las cuatro estrategias (Figura 18).

Figura 18.

Combinación de estrategias de mitigación de la ICU



Nota. Obtenido de “Integrating four radiant heat load mitigation strategies is an efficient intervention to improve human health in urban environments”. Por Park et al., 2020. Science of the Total Environment.

2.1.5.5. Herramientas de cómputo

Durante las últimas décadas, las herramientas digitales se han vuelto indispensables en el campo de la arquitectura. Las complejas tareas de diseño que componen los métodos de diseño arquitectónico se benefician del uso de herramientas de simulación avanzado y, en consecuencia, las soluciones de diseño se han vuelto más adaptadas a la naturaleza y específicas del sitio. Las simulaciones por computadora y el diseño orientado al desempeño permite abordar desafíos globales, como el cambio climático, en la fase preliminar de diseño conceptual (Naboni et al., 2019).

Por ejemplo, *Grasshopper*®, un simulador que funciona por medio de una interfaz gráfica de diseño computacional asistido por algoritmos que permite manipular y administrar datos climáticos y geométricos con el objetivo de mapearlos visualmente a través de *Rhino* un visualizador 3D. Dentro de su interfaz existen plugins que permiten llevar a cabo simulaciones de microclimas urbano y el rendimiento energético de cañones urbanos como *Ladybug*®, *Honeybee*® y *Energy Plus*®. Unas de las ventajas de esta herramienta es que permite analizar diversos factores climáticos de manera simultánea y la manipulación de una cantidad de información inimaginable para un

diseñador, generando una serie de alternativas que son prácticamente imposibles de plantear manualmente (Terzidis, 2009).

Dentro del estudio de cañones urbanos e islas de calor, se han empleado herramientas como ENVI-met y RayMan para llevar a cabo simulaciones de microclima urbano, estudios de confort térmico, estimaciones de Sky View Factor y PET. ENVI-met es una herramienta que permite llevar a cabo estudios ambientales relacionados con el confort térmico y el diseño de estrategias empleando vegetación para la mitigación de la ICU (Abaas, 2020; Morakinyo & Lam, 2016; Teshnehdel et al., 2020).

Por otro lado, Rayman es una herramienta que permite simular flujos de radiación de onda larga y corta en un entorno tridimensional y en diferentes ambientes. Se emplea principalmente para estimar el índice PET y para calcular el factor de cielo visible (Ahmadi Venhari et al., 2019; Coutts et al., 2016; Shashua-Bar et al., 2012).

2.1.5.6. Conclusiones del Marco Teórico

En la siguiente tabla (Tabla 9) se abrevian algunos de los estudios más significativos consultados en este documento, en relación con las diferentes escalas de objetos de estudio abordados, así como las herramientas y materiales utilizados.

Mientras que el esquema que se observa en la Figura 19 representa el mapa de literatura del marco teórico de manera sintetizada. Se abordaron tres ejes temáticos, el primero aborda la isla de calor urbana, el segundo las estrategias de mitigación de la ICU y el último los algoritmos evolutivos.

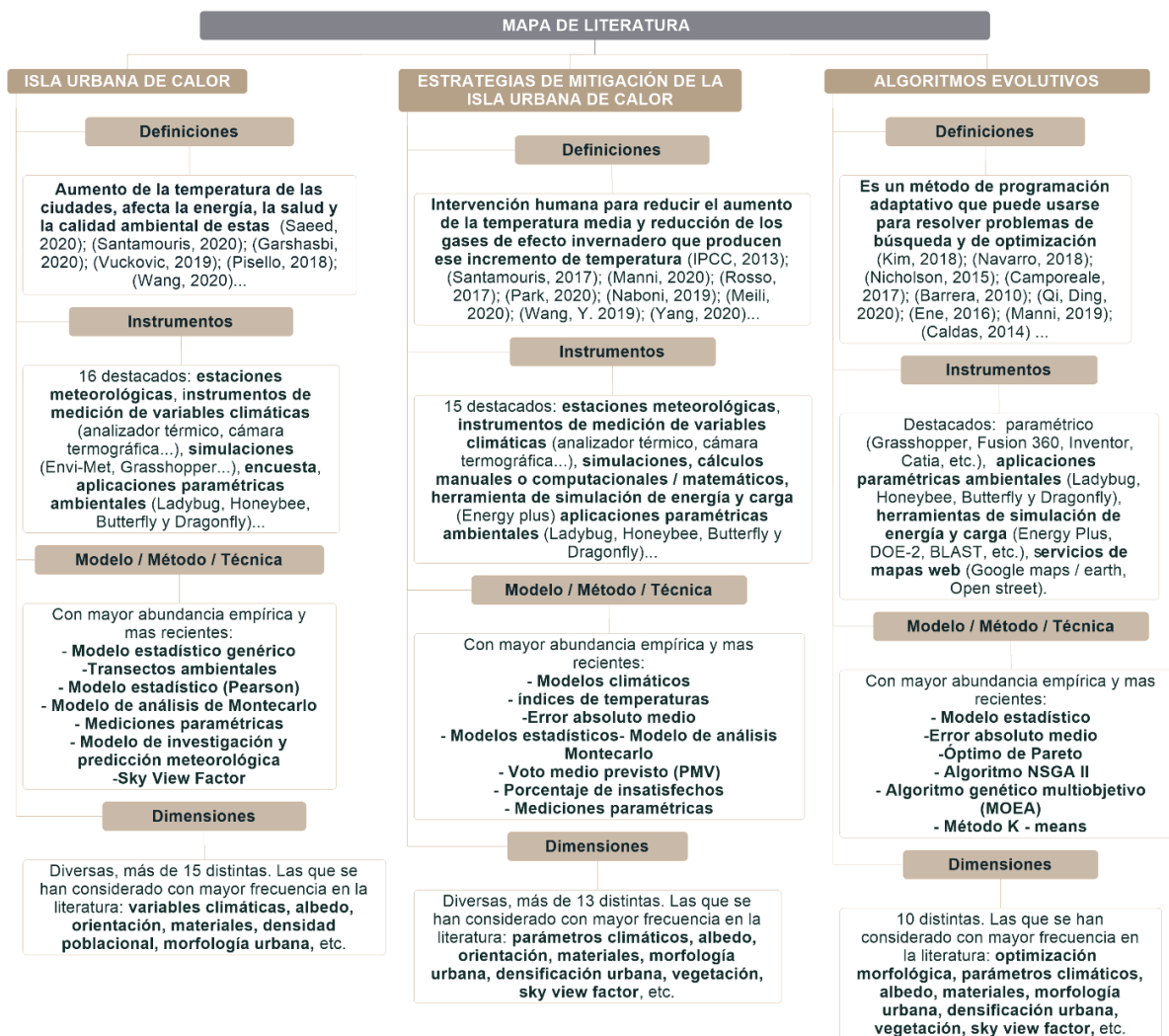
Tabla 9.
Estudios e investigaciones

Autor/País	Palabra clave	Escala	Diseño: Herramientas y materiales
Navarro-Mateu et al., (2018)	Computación evolutiva Diseño urbano SPEA 2	Traza urbana (sector de la ciudad)	Modelador paramétrico 3D Algoritmos SPEA 2 y NSGA-II
Ruit et al., (2019)	Cañón urbano Factor de cielo visible Ambiente térmico	Cañón urbano	Simulador en ENVI-met y el índice PET

Makki et al., (2019)	Morfología urbana Computación evolutiva Adaptabilidad	Tejido urbano	Modelador paramétrico 3D Algoritmos SPEA 2 y NSGA-II
Manni et al., (2019)	Paramétrico Algoritmo Cañón urbano.	Cañón urbano	Simulación en editores de algoritmos visuales y modeladores 3D basado en el análisis solar.
Cardinali et al., (2020)	Mitigación microclimas Isla de calor urbana	Edificio y Ciudad	Modelado y simulación a través del sistema de interacción microclimáticos.
Showkatbakhsh & Makki, (2020)	Homeostasis Computación evolutiva Adaptación	Tejido urbano	Motor evolutivo y de análisis multifactorial. Modelador 3D.
Park et al., (2020)	NSGA II Temperatura radiante media Mitigación del calor	Cañón urbano	Simulación en editores de algoritmos visuales y modeladores 3D
Abdollahzadeh & Biloría, (2021)	Configuración urbana Cañones urbanos Confort térmico	Cañón urbano	Simulador en ENVI-met y el índice PET
W. Wang et al., (2021)	Morfología urbana Modelo energético de edificación urbana	Tejido urbano	Simulación en editores de algoritmos visuales y modeladores 3D basado en el análisis solar y simulación energética.
Yang et al., (2021)	Morfología urbana Relación de aspecto Ambiente térmico SVF	Tejido urbano	Simulación numérica en ENVI-met y análisis de correlación

Se realizó una definición general de cada uno de estos ejes de acuerdo con diversos autores, posterior a ello se identificaron los instrumentos, modelos, métodos y técnicas y como último apartado las dimensiones de cada uno de los ejes. Los instrumentos, modelos, métodos y técnicas sirvieron de apoyo para el desarrollo del diagrama de la estrategia metodológica, mientras que las dimensiones e instrumentos para la operacionalización de variables.

Figura 19.
Mapa de la literatura



2.2. Marco Conceptual

A partir de la revisión del marco teórico se identificaron una serie de conceptos generales que orientan la investigación, los cuales se pueden agrupar en tres categorías: I) urbanismo; II) la computación evolutiva y III) métodos de análisis.

La isla de calor urbana se ve intensificada principalmente por la morfología de los tejidos urbanos. Los tejidos urbanos son sectores de la ciudad que hacen referencia a la estructura u organización de los componentes perceptibles que conforman una ciudad, la manera en que se agrupa por ejemplo (Ferretti & Arreola, 2012).

En este sentido, a lo largo de la historia se han propuesto diferentes tipos de estrategias de planeación urbana para reducir los efectos causados por la geometría urbana, como el plan maestro de Lldefons Cerdà “L Eixample” una solución urbana diseñada para atender a la creciente población de Barcelona mediante la ampliación del tejido urbano de la ciudad. El objetivo consistía en acomodar una proporción de alta densidad, pero manteniendo una amplia cantidad de espacios verdes accesibles desde la calle, o la implementación de superbloques, también denominados supermanzanas son espacios públicos conformados por un conjunto de manzanas, ideados para lograr la liberación de la mayor parte de las áreas que se encuentran motorizadas. Este tipo de planeación urbana disminuye de forma notable la contaminación acústica y las emisiones de CO₂ (Navarro-Mateu et al., 2018).

Hoy en día, gracias a los avances en recursos computacionales, han permitido el empleo de nuevos métodos y técnicas de diseño enfocados en principios evolutivos. Por ejemplo, el diseño generativo, un tipo de diseño basado en un enfoque evolutivo que tiene como objetivo identificar la solución que mejor satisfaga el problema de diseño, esto a través de la inteligencia artificial, procesos automatizados y la computación evolutiva. Esta última se enfoca en el estudio de las propiedades de los algoritmos evolutivos inspirados en la teoría de la evolución de Darwin, que menciona que los individuos más aptos tienen mayor probabilidad de sobrevivir (Academia Mexicana de Computación, 2017; Barrera, 2010).

Los algoritmos evolutivos tienen como objetivo replicar y aplicar los principios evolutivos básicos de selección, cruce y mutación de parámetros para crear una población de soluciones de diseño candidatas en función a su capacidad para resolver el problema. Durante los procesos de selección, se seleccionan los individuos (soluciones candidatas) más aptos de cada generación en función a su valor de aptitud. Una generación representa cada ciclo de transformación y selección a la que se somete el problema de diseño. Una vez seleccionadas las soluciones candidatas ocurre el cruzamiento y mutación, las soluciones son sometidas a acciones aleatorias con el objetivo de mejorar su adaptabilidad para las siguientes generaciones (Barrera, 2010; Mateos, 2015).

Debido a que la teoría evolutiva puede resultar extraña para algunos diseñadores, una breve descripción de la terminología es crucial para una comprensión integral del experimento (Tabla 10) (Makki et al., 2015).

Tabla 10.

Definición de terminología dentro del diseño evolutivo

Término	Descripción
Generación	Número de interacciones por ejecución de la simulación
Población	Número de individuos por generación (escenarios)
Fenotipo	Geometría primitiva sobre la que se ejecutará la simulación (caso actual del cañón urbano)
Gen	Parámetro único que controla la intensidad con la que se modifica el fenotipo
Objetivos de aptitud	Los criterios por los cuales se evaluará y seleccionará el fenotipo
Mutación	Modificaciones aleatorias en acervo genético
Tasa de mutación	Intensidad de la mutación
Probabilidad de cruce (0.0 a 1.0) (<i>crossover probability</i>)	Porcentaje de soluciones en la generación que se reproducirá para la siguiente generación; es decir, el número de veces que se produce un cruce de cromosomas en una generación, o bien, la posibilidad de que dos cromosomas intercambien algunas de sus partes. Una tasa del cruce del 100 % (1) significa que todos los descendientes se generan por cruce.
Probabilidad de mutación (0.0 a 1.0) (<i>mutation probability</i>)	El porcentaje de mutaciones que toma lugar en la generación (Deb et. al. recomienda que la probabilidad de mutación sea $1/n$, donde n es el número de variables en el diseño del problema. De tal manera que el valor predeterminado es $1/n$).
Índice de distribución de cruce e índice de distribución de mutación (0 al 100) (<i>crossover and mutation distribution index</i>)	Un valor de índice de distribución grande da una mayor probabilidad de generar descendientes cercanos a las soluciones principales, mientras que un valor de índice de distribución pequeño permite seleccionar soluciones distantes como soluciones secundarias (<i>children Solutions</i>).
Semilla aleatoria (random seed)	Descendencia aleatoria a partir de la cual se efectúan las operaciones de selección, recombinación y mutación.
Elitismo (<i>selection of the fittest</i>)	Número de soluciones dominantes seleccionadas para generar la siguiente población, o bien, el uso de soluciones con alta aptitud para pasar a las siguientes generaciones. Comúnmente, esto se lleva a cabo seleccionando las mejores soluciones.
Frente de Pareto	Las soluciones óptimas de la población

Showkatbakhsh y Makki (2020), llevaron a cabo un estudio que tenía como propósito examinar la aplicabilidad de los principios biológicos de la homeostasis en los procesos de diseño generativo. Los principios homeostáticos son todos los

mecanismos de regulación que permiten que los organismos se adapten a su entorno en función a los cambios causados por estímulos internos y externos. Aplicaron este principio para el desarrollo de supermanzanas urbanas con un grado de adaptabilidad morfológica y conducta a los cambios ambientales. Su objetivo consistía en desarrollar ciudades con atributos de adaptación dinámica incorporados a razón de las condiciones ambientales “tejidos urbanos adaptativos”.

2.3. Marco Normativo

El marco normativo abordado para esta investigación se centra en la composición geometría de la ciudad. Los datos obtenidos se emplearon para el establecimiento de límites en cuanto a las alturas de las edificaciones en función al uso del suelo de la ciudad de Ensenada, B.C., diversas investigaciones que involucran cañones urbanos, demostraron que el detalle geométrico más importante sobre el cañón es la relación de aspecto (H/W), definida como la relación entre la altura media del cañón urbano (H) y el ancho de la calle (W). Se ha demostrado que existe una correlación fuerte lineal entre la relación H/W y la intensidad de la ICU.

Así pues, La normatividad abordada involucra: a) Reglamento de la Ley de Edificaciones para el Municipio de Ensenada, Baja California; b) el Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Ensenada 2008-2030 y c) la Carta Urbana del Centro de la población de Ensenada. A continuación, se muestran los datos obtenidos del análisis de la normativa: conforme al Reglamento de la Ley de Edificaciones para el municipio de Ensenada, Baja California, en el Capítulo I “Requerimientos de habitabilidad, funcionamientos y acondicionamientos ambiental”, Artículo 76 se hace mención acerca de las dimensiones y características mínimas que deben de contar las edificaciones, en este sentido en el presente artículo se establece que la altura mínima de una edificación no debe de ser menor a 2.40 m (Ayuntamiento Ensenada, 2007, pág. 14-15).

La Tabla 11 muestra los datos analizados a partir de la revisión del Programa de Desarrollo Urbano, que involucran: a) el tipo de vialidad; b) el uso de suelo c) la dimensión de la calle; d) las alturas máximas y e) relación de aspecto. Los usos de

suelo se obtuvieron a partir de la Carta Urbana del Centro de la población de Ensenada y la relación de aspecto a partir de la división de la altura entre el ancho de la calle.

Tabla 11.

Jerarquía vial, alturas máximas y relación de aspecto

Jerarquía vial	Uso de suelo	Ancho	Altura máxima	Relación (H/W)
Regional	Habitacional unifamiliar	35	7.50	HW<1
	Hab. Condominios		35.00	HW=1
	Comercio/Habitacional		7.50	HW<1
	Comercio y servicio		11.00	HW<1
	Industria bajo riesgo		8.00	HW<1
	Industria alto riesgo		13.75	HW<1
Primaria	Habitacional unifamiliar	26	7.50	HW<1
	Hab. Condominios		35.00	1<HW<2
	Comercio/Habitacional		7.50	HW<1
	Comercio y servicio		11.00	HW<1
	Industria		8.00	HW<1
	Turístico hotel	39	52.50	1<HW<2
Secundaria	Habitacional unifamiliar	20	7.50	HW<1
	Hab. Condominios		35.00	1<HW<2
	Comercio/Habitacional		7.50	HW<1
	Comercio y servicio		11.00	HW<1
	Industria		8.00	HW<1
	Turístico hotel		52.50	1<HW<2
Local	Turísticos condominios	11	35.00	1<HW<2
	Habitacional unifamiliar		7.50	HW<1
	Hab. Condominios		35.00	HW>2
	Comercio/Habitacional		7.50	HW<1
	Comercio y servicio		11.00	HW=1
	Industria		8.00	HW<1
	Turístico hotel		52.50	HW>2
	Turísticos condominios		35.00	HW>2

Nota. Elaborado a partir del “Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Ensenada 2008-2030”.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

De acuerdo con (Hernández et al., 2014), la metodología representa un conjunto de pasos y técnicas que un investigador debe de seguir para lograr de manera exacta el objetivo de la investigación y determinar la importancia de los hechos hacia los cuales se encamina el interés de la investigación.

El presente capítulo se integra a partir de dos apartados, el primero representa el diseño de la investigación. En este se define el tipo de investigación, el enfoque y por último se presenta de manera esquemática el diseño metodológico del estudio. Por otro lado, el segundo apartado hace referencia al diseño del experimento en el cual se definen las etapas que conforman el diseño del experimento.

3.1. Diseño de la investigación

Hernandez & Mendoza, (2018), definen el diseño de la investigación como un conjunto de técnicas y métodos que selecciona un investigador para llevar a cabo una investigación. El diseño de la investigación hace referencia a la estrategia metodológica del estudio y engloba una serie de pasos concretos para cumplir con los objetivos de diseño.

En este sentido, la presente investigación es de tipo experimental, dentro de esta categoría se clasifica como un experimento cuasiexperimental con un enfoque cuantitativo, en base a dos aspectos: 1) la naturaleza de la investigación: caracterizada por la manipulación de variables independientes para observar sus efectos en las variables dependientes con el objetivo de describir y explicar fenómenos y 2) recolección de información: de acuerdo con investigaciones con un carácter similar a este caso de estudio, se observó que el diseño de la investigación y la estrategia metodológica empleadas corresponde a un enfoque cuantitativo experimental. De esta forma se concluye que este enfoque es el más adecuado para esta investigación.

El alcance y nivel de la investigación es de tipo correlacional, ya que este tipo de estudios buscan explicar el comportamiento de dos o más variables que interfieren en la investigación en un contexto en particular, en este sentido la presente investigación pretende explicar la correlación que existe entre: a) la configuración geométrica del cañón y b) el microclima resultante en dicho cañón.

En cuanto a la estructura de la tesis, esta se encuentra conformada a partir de cuatro capítulos: I) planteamiento de la investigación; II) marco teórico; III) metodología; IV) resultados. En la Figura 20 se observa el diagrama general de la tesis y se describen de manera breve los capítulos.

I. Planteamiento de la investigación

En este apartado se aborda de manera breve el panorama general de la investigación, se presenta el problema central del estudio, la justificación e importancia del tema y la contextualización del objeto de estudio. Una vez abordados estos

aspectos se plantea la pregunta de investigación, hipótesis y los objetivos y por último se establece el alcance del estudio y las limitaciones.

II. Marco teórico

Este capítulo hace referencia a los marcos referencial, conceptual, normativo y estado del arte, el presente apartado tiene como objetivo definir los conceptos y teorías relacionadas con el tema, con el fin de contextualizar temporal y espacialmente al lector mediante una breve reseña del pasado y el presente del tema.

III. Metodología

Se refiere a la parte metodológica del diseño, dentro de este apartado se define el tipo de investigación, el enfoque y se describe la metodología que se siguió para llevar a cabo el experimento.

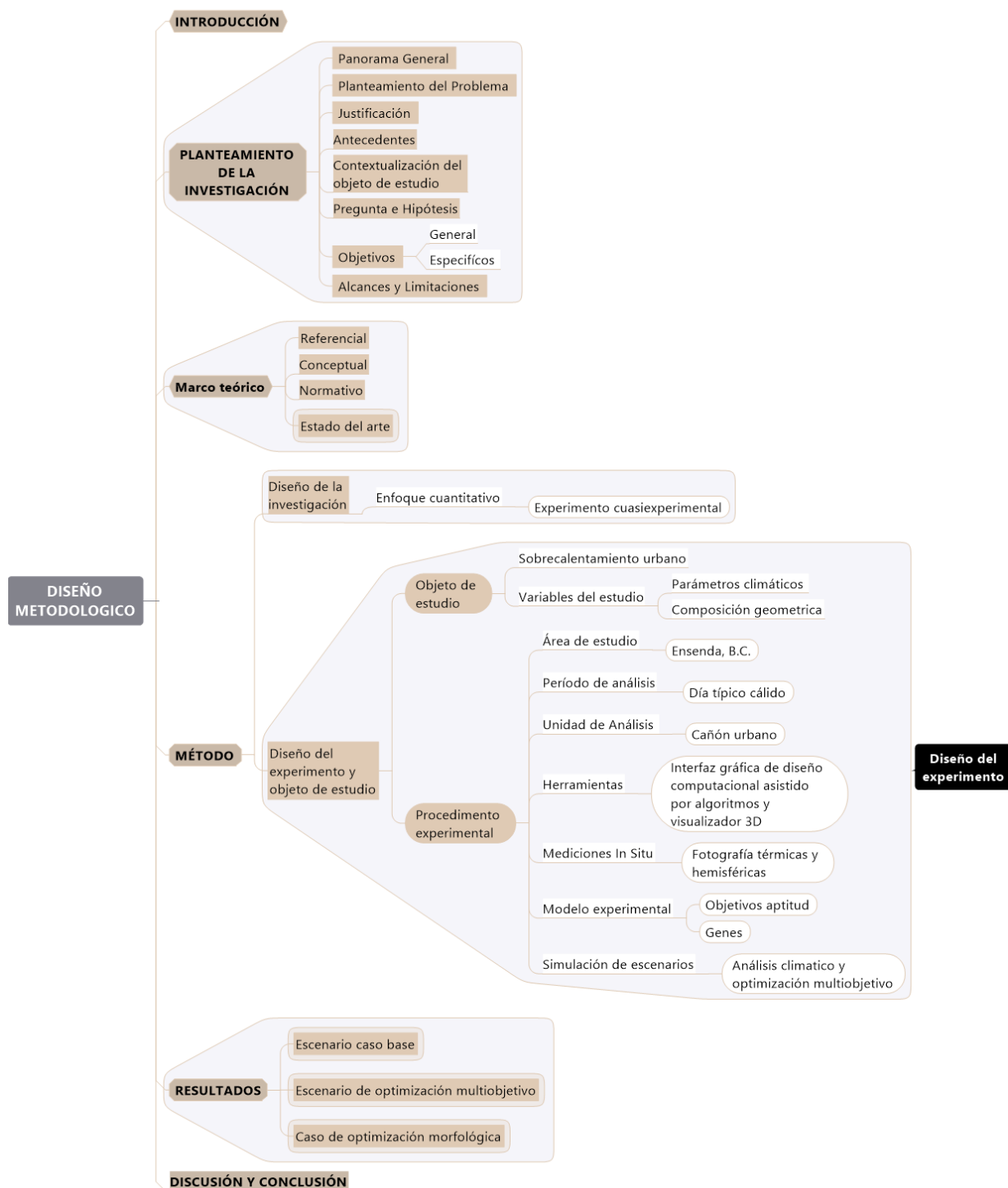
IV. Resultados

Las actividades que se desarrollaron en este apartado consisten principalmente en la evaluación de la función objetiva para la selección de escenarios a partir de los datos obtenidos de las simulaciones.

Discusión y conclusión

Durante la discusión se llevó a cabo la interpretación de los resultados y se presenta la perspectiva de diversos autores respecto al tema abordado, por último, en la conclusión se confronta la hipótesis planteada, se responde a la pregunta de investigación y se realizan algunas recomendaciones para trabajos futuros.

Figura 20.
Diagrama general de la tesis



El proceso metodológico de esta investigación consta de cinco etapas: 1) base de datos por medio de la cual fue posible justificar la toma de decisiones e identificar las variables ambientales y geométricas preponderantes de la isla de calor urbana; 2) se seleccionó el sitio y se realizó la caracterización climática de la zona lo que permitió conocer las condiciones climáticas del sitio; 3) diseño del experimento se establecen los métodos y técnicas necesarias para llevar a cabo el experimento, las actividades principales a desarrollar en esta etapa son: definición de objetivos de aptitud, el diseño de genes, la seleccionan los instrumentos y herramientas a emplear y el desarrollo del modelo de simulación experimental; 4) la simulación de los escenarios de radiación solar, microclima urbano, horas de luz solar, sombra y factor de cielo visible y 5) se llevan a cabo el análisis de los resultados generados (Figura 21). En la Tabla 12 se enlistan los pasos y herramientas que se siguieron en función a las etapas de la metodología para lograr el objetivo del estudio.

Figura 21.
Esquema metodológico

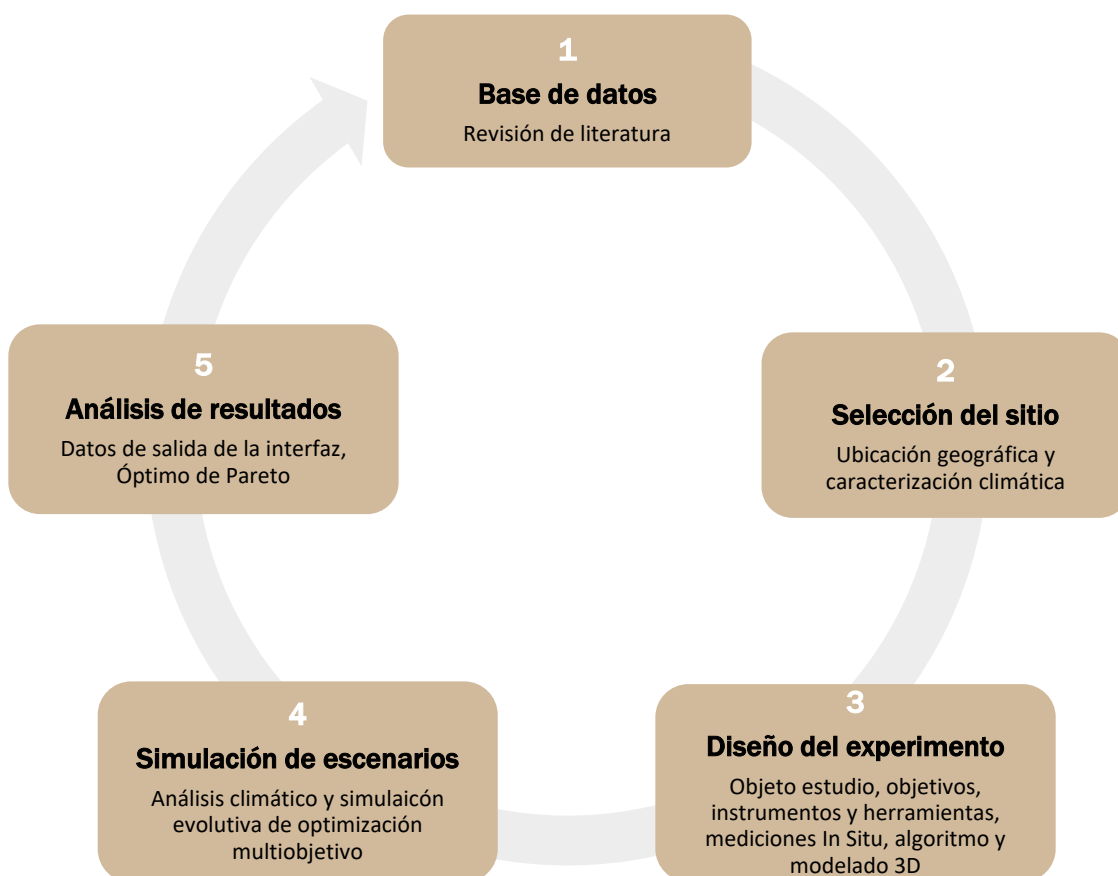


Tabla 12.

Proceso metodológico de la investigación

Etapas	Pasos	Herramientas
1. Base de datos	a) Identificación de palabras claves b) Revisión de literatura c) Selección de artículos d) Análisis de hallazgos e) Identificación de variables geométricas y ambientales	a) Bases de datos: recursos bibliográficos digitales de información científica y tecnológica
2. Selección del sitio	a) Ubicación geográfica de la ciudad de Ensenada, B.C. b) Obtención de datos meteorológicos: Temperatura del aire; Radiación solar y Vientos c) Caracterización climática del sitio	a) Google Earth b) Estación Meteorológica Automática c) Normales climatológicas Observatorio Sinóptico de Ensenada, B.C.
3. Diseño del experimento	a) Objeto de estudio b) Selección de las variables c) Definir objetivos del experimento d) Definir parámetros dinámicos e) Período de análisis f) Selección de los instrumentos y herramientas g) Mediciones In Situ h) Modelado del cañón urbano i) Diseño del algoritmo	a) Revisión de la literatura b) Cámara Canon 80D con lente ojo de pez c) Cámara térmica Flir C5 d) Herramienta para calcular el SVF (Rayman) e) Interfaz gráfica de diseño computacional asistido por algoritmos denominada <i>Grasshopper</i>® f) Visualizador 3D g) Reglamentos y PDUCEP-EN h) Archivo climático EPW
4. Simulación de escenarios	a) Simulación de escenarios previos y posteriores de: b) Radiación solar, c) Índice universal de confort térmico (UTCI) d) Horas de luz solar, e) Proyección de sombras f) Factor de cielo visible g) Optimización multiobjetivo	a) Interfaz gráfica de diseño computacional asistido por algoritmos denominada <i>Grasshopper</i>® b) Visualizador 3D c) Reglamentos y PDUCEP-EN d) Archivo climático EPW y STAT e) Motor evolutivo denominado Wallacei®
5. Análisis de resultados	a) Simulación de escenarios b) Comparación de escenarios c) Análisis del óptimo de Pareto	f) Interfaz gráfica de diseño computacional asistido por algoritmos denominada <i>Grasshopper</i>® a) Visualizador 3D

3.2. Diseño del experimento

El diseño del experimento se define como el conjunto de métodos y técnicas que un investigador realiza para llevar a cabo el experimento. En el presente apartado se describen los pasos que se siguieron para la realización del experimento con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados en la investigación. El diseño del experimento se divide en ocho etapas como se muestra en el siguiente esquema (Figura 22).

Figura 22.
Esquema del diseño del experimento



La primera etapa se seleccionó el objeto de estudio y se identificaron las variables de diseño; durante la etapa dos se llevó a cabo la selección del área de estudio, esto a través de un análisis multicriterio que involucra datos sociodemográficos; análisis con una imagen del satélite LANDSAT 8 que muestra la temperatura de la superficie terrestre y por último un análisis de composición geométrica para identificar el cañón urbano crítico y posterior a ello se realizó la caracteriza climática de la zona. En la etapa 3 se seleccionó el período para la simulación de escenarios, se identificó el día cálido extremo por medio de un archivo EPW de las variables climáticas del sitio.

Por otro lado, en la etapa 4 se seleccionaron los instrumentos y herramientas a emplear para la toma de fotografías térmicas, hemisféricas y la simulación de los escenarios. Una vez seleccionados los instrumentos se prosiguió con las mediciones y recolección de datos In Situ del factor de cielo visible (SVF) y fotografías térmicas (etapa 4). El diseño del algoritmo se realizó durante la fase 6 de la metodología, está consistió en la configuración del algoritmo de optimización morfológica, para ello se definieron los objetivos de aptitud, estos corresponden a los criterios que se desean alcanzar. Una vez desarrollados los objetivos se establecieron límites y/o condicionales con base a la normatividad. Para finalmente llevar a cabo la modelación de la geometría primitiva en base a la construcción de genes.

La etapa 7 hace referencia a la simulación de escenarios por medio de una interfaz gráfica de diseño computacional asistida por algoritmos y un visualizador 3D, se realizaron simulaciones para el análisis climático del caso base y el caso de optimización morfológica, los cuales consistieron en: análisis de radiación solar, índice universal de confort térmico (UTCI), horas de luz solar y porcentaje de visibilidad del cielo (SVF) y se realizó la simulación evolutiva de optimización multiobjetivo. Por último, en la etapa 8 se realizó el análisis de resultado a partir de los datos obtenidos de las simulaciones.

3.3. Diseño del objeto de estudio

3.3.1. Objeto de Estudio

El objeto de estudio de la presente investigación es la isla de calor urbana, la cual se caracteriza por un aumento de la temperatura de la superficie en el centro de las ciudades en comparación con las zonas circundantes. Según científicos que han analizado este fenómeno mencionan que los fenómenos climáticos cada vez son más extremos, los veranos suelen ser más calurosos y los patrones de lluvia cambian lo que da lugar a una variación en la frecuencia de sequías e inundaciones. La ICU se ve influenciada por una gran variedad de parámetros que van desde la composición geométrica de las ciudades, hasta las variables climáticas y ambientales (Semadet, 2006).

A partir de la revisión de la literatura y el cruce de autores se realizó la siguiente tabla de operacionalización de variables (Tabla 13). Las variables seleccionadas corresponden a parámetros climáticos como: temperatura; radiación solar, vientos y humedad relativa; y la composición geometría del cañón urbano (relación de aspecto, orientación y SVF). Autores como: Ene et al. (2016); (Navarro-Mateu et al., 2018); Naboni et al., (2019); Vuckovic et al., (2019); Park et al., (2020); Bartesaghi-Koc et al., (2021), entre otros abordan parámetros relacionados con la composición geométrica de cañones urbanos en sus estudios.

Tabla 13.

Operacionalización de variables

Operacionalización de variables			
Variable	Tipo de variable	Indicador	Instrumento
Temperatura	Independiente	Temperatura del aire	Archivo EPW
Radiación Solar	Independiente	Temperatura radiante	Archivo EPW
Vientos	Independiente	Velocidad	Archivo EPW
Humedad Relativa	Independiente	Vapor de agua	Archivo EPW
Relación de aspecto	Dependiente	Altura/ Ancho (H/W)	Google Earth
Orientación	Independiente	Orientación de la calle	Google Earth

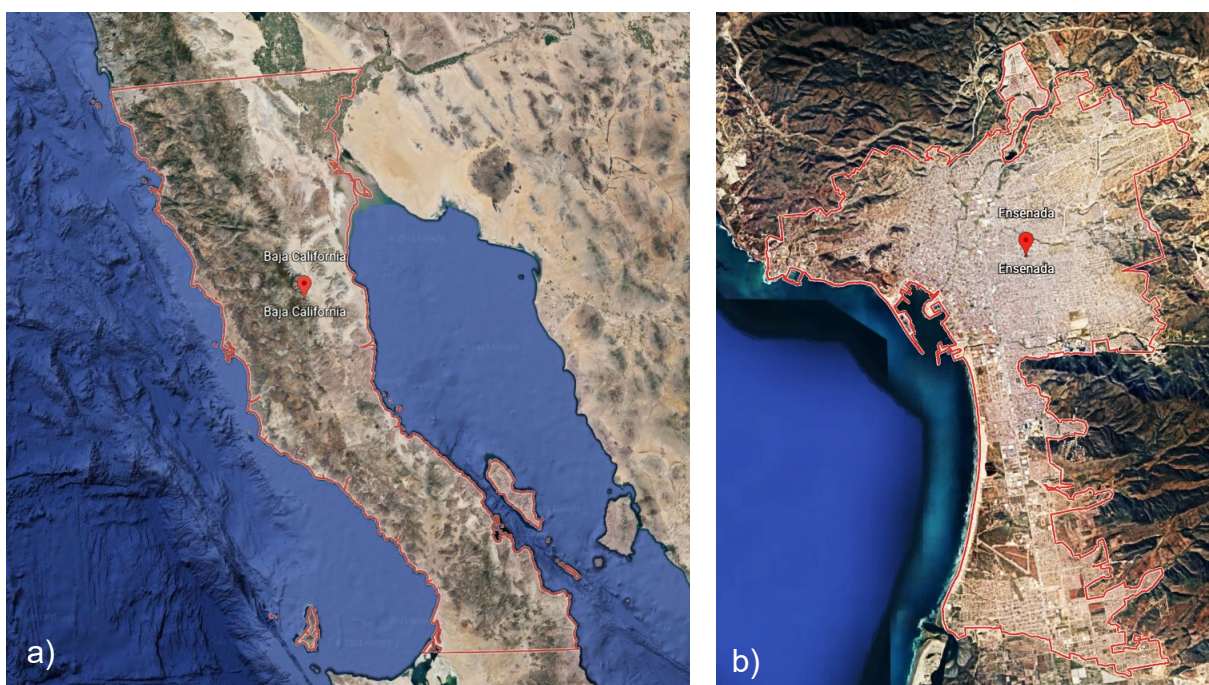
Factor de cielo visible (SVF)	Dependiente	Porcentaje del cielo visible	Cámara con lente ojo de pez y la herramienta Rayman
-------------------------------	-------------	------------------------------	---

3.3.2. Sitio de estudio y caracterización climática

La investigación se realizó en la ciudad de Ensenada ubicada en el estado de Baja California, en el municipio que lleva el mismo nombre, su ubicación dentro de la República Mexicana es al noroeste. Sus coordenadas geográficas son 28° 00' 00" - 32° 12' 10" de latitud norte y 116° 53' 03" de longitud oeste, a 13 m sobre el nivel del mar (POEBC, 2014) (Figura 23).

Figura 23.

Mapa de Baja California (a) y mapa de la ciudad de Ensenada (b)



Nota. Elaborado a partir de Google Earth. Fecha de acceso 2021-04-05

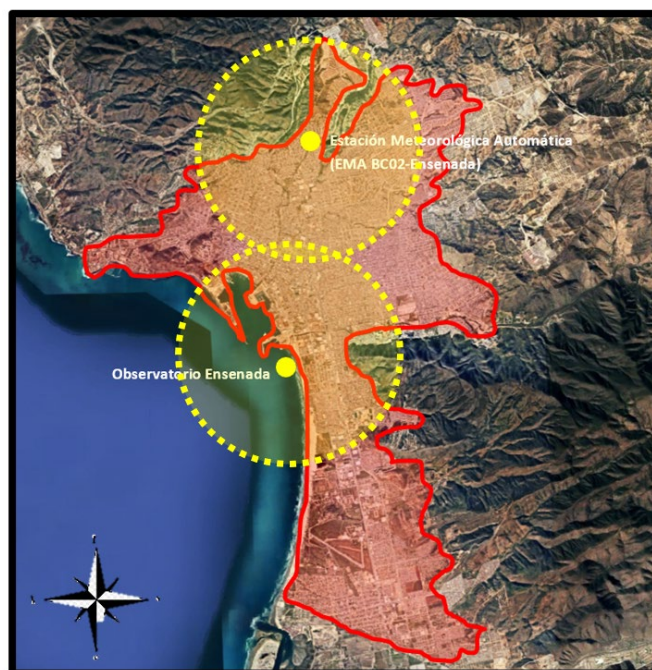
Los datos para el siguiente análisis climático se adquirieron a partir de la Estación Meteorológica Automática (EMA) BCO2-Presa Emilio López Zamora ubicada al norte de la ciudad, con coordenadas: latitud 31° 53' 29" N, longitud 116° 36' 11" W, altitud 32.0 msnm en un periodo que corresponde del 2000 al 2017 y datos a partir de las

normales climatológicas del Observatorio Sinóptico de Ensenada, B.C., con coordenadas: latitud N 31°49', longitud W 116° 37' y altitud 13 msnm en el periodo de 1981 al 2010, ambas dependientes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN-CONAGUA) (Figura 24). Tales datos fueron procesados a través de la Herramienta de Análisis Bioclimático “BAT” de Rincón y Fuentes, (2014). La cual corresponde a una hoja de cálculo automatizada que traza y analiza diferentes parámetros y criterios con base a ecuaciones y diagramas desarrollados por diferentes autores, como Auliciems, Szokolay, Givoni, Olgyay, Mahoney, entre otros.

De acuerdo, con la clasificación climática de Köppen-Geiger la ciudad pertenece a la categoría BSK de zonas climáticas, mientras que en el sistema de clasificación climática de Köppen-García el clima de la ciudad es BS0 ks (e) que corresponde a seco extremos o también conocido como mediterráneo con un clima seco templado con lluvias en invierno. Baja California es el único estado del país con este tipo de clima, el cual se caracteriza por presentar veranos cálidos y secos e inviernos húmedos, lluviosos y fríos (García, 2004; INEGI, 2001; POEBC, 2014).

Figura 24.

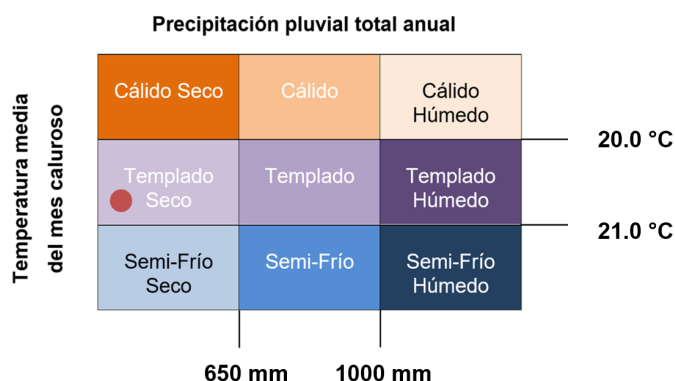
Ubicación de la EMA BCO2-Ensenada y el Observatorio Sinóptico de Ensenada, Baja California



Nota. Elaborado a partir de información de SMN-CONAGUA y Google Earth en el 2020

Se recomienda determinar la agrupación bioclimática de la ciudad simultáneamente con la clasificación climática de Köppen, que tiene como objetivo clasificar las localidades conforme a los requerimientos bioclimáticos y arquitectónicos. Para ello, se relacionó la precipitación pluvial total anual con la temperatura media del mes cálido, la primera condición precisa los requerimientos de humidificación o deshumidificación, mientras que la segunda variable determina el calentamiento para el periodo cálido (alto o bajo), es decir, las condiciones de confort (Figura 25) (García, 2004).

Figura 25.
Sistema de agrupación bioclimática local



Nota. Gráfica elaborada a partir de la clasificación climática de Fuentes y Figueroa, 1990.

Con base, a lo anterior se obtuvo que la agrupación bioclimática de la ciudad corresponde a un bioclima templado seco dado que la temperatura media del mes cálido (agosto) es de 21.9 °C y la precipitación pluvial anual corresponde a 246.7 mm lo que representa un nivel de lluvia bajo.

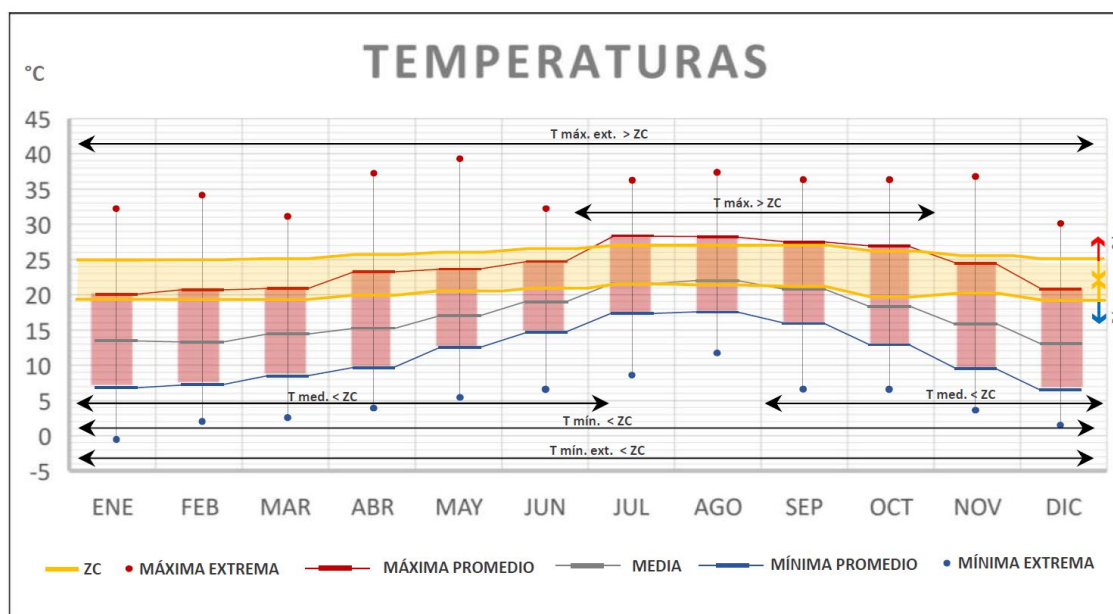
3.3.2.1. Temperatura

La temperatura neutra (T_n) o temperatura óptima de confort anual corresponde a 23 °C con un rango aceptable de 20.5 °C - 25.5 °C para la zona de confort. La temperatura media anual es de 17.4 °C, la media del mes más cálido corresponde a agosto con una temperatura de 21.9 °C mientras que la media del mes más frío es para diciembre con una temperatura de 13.3 °C.

En base a la Figura 26, se observa que las Temperaturas Máximas Extremas ($T_{\text{máx. Ext.}}$) durante todo el año sobrepasan los rangos de confort, mientras que las Mínimas Extremas ($T_{\text{mín. Ext.}}$) y las Mínimas Promedio ($T_{\text{mín}}$) se localizan debajo de la zona de confort durante todo el año. Las Temperaturas Máximas ($T_{\text{máx}}$) de julio a octubre se ubican por arriba de la zona de confort y de noviembre a junio se ubican dentro de la ZC, asimismo las Temperaturas medias (T_{med}) de septiembre a junio se encuentran por debajo de la zona de confort mientras que los meses de julio y agosto se ubican dentro de la ZC. El periodo de transición de cálido a frío se presenta del mes de junio a diciembre, y el de frío a cálido en el mes de diciembre a junio respectivamente.

Figura 26.

Comportamiento mensual de las temperaturas máximas, media y mínimas



Nota. Gráfica elaborada a partir de la BAT “*Bioclimatic analysis tool: An alternative to facilitate and streamline preliminary studies*”. Por Martínez, R. & Fuentes, V., 2014. Energy Procedia, 57(55).

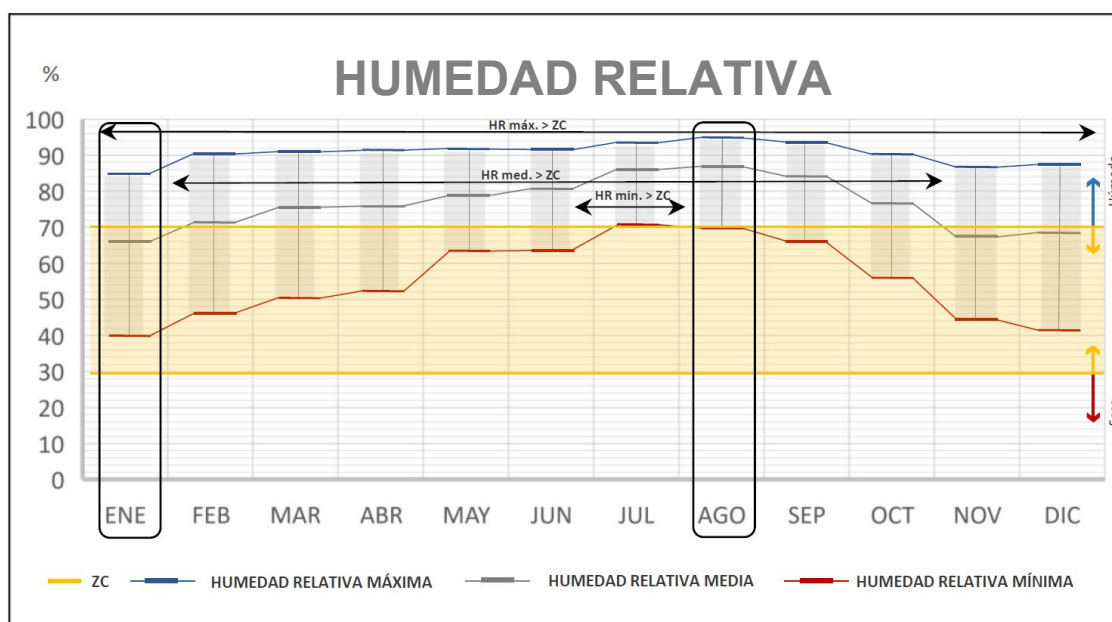
3.3.2.2. Humedad Relativa

Debido a las condiciones climáticas que presenta la ciudad de Ensenada, el rango de confort higróico aplicado en este análisis oscila entre el 30.0 y 70.0 %, debido a que el ser humano es poco sensible a los cambios de Humedad Relativa dentro de este margen (Marcó et al., 2003; Sosa y Siem, 2004).

La ciudad de Ensenada cuenta con una Humedad Relativa media (HRmed) anual de 75.8 %, en el mes más seco que corresponde a enero se presenta una HRmed de 65.4 %, mientras que en el mes húmedo que es agosto se registra una humedad de 86.1 %. En base a la Figura 27, se observa que la Humedad Relativa Máxima (HRmáx.) durante el año sobrepasan los rangos de confort, mientras que las Mínimas (HRmín.) se localizan dentro de la zona de confort a excepción del mes de julio que se encuentra por encima de la ZC. Asimismo, HRmed de febrero a octubre se ubican por arriba de la zona de confort mientras que los meses de noviembre y enero se localizan dentro de la ZC. Cabe mencionar que la HR (máxima, media y mínima) es más alta durante los meses cálidos (julio a septiembre) alcanzando una HRmed entre 80-86 %, mientras que los meses fríos presentan una HRmed menor a 70 %.

Figura 27.

Comportamiento mensual de las HR mínima, media y máxima, frente a la ZC permisible que acepta un rango del 30 % al 70 %



Nota. Gráfica elaborada a partir de la BAT “*Bioclimatic analysis tool: An alternative to facilitate and streamline preliminary studies*”. Por Martínez, R. & Fuentes, V., 2014. Energy Procedia, 57(55).

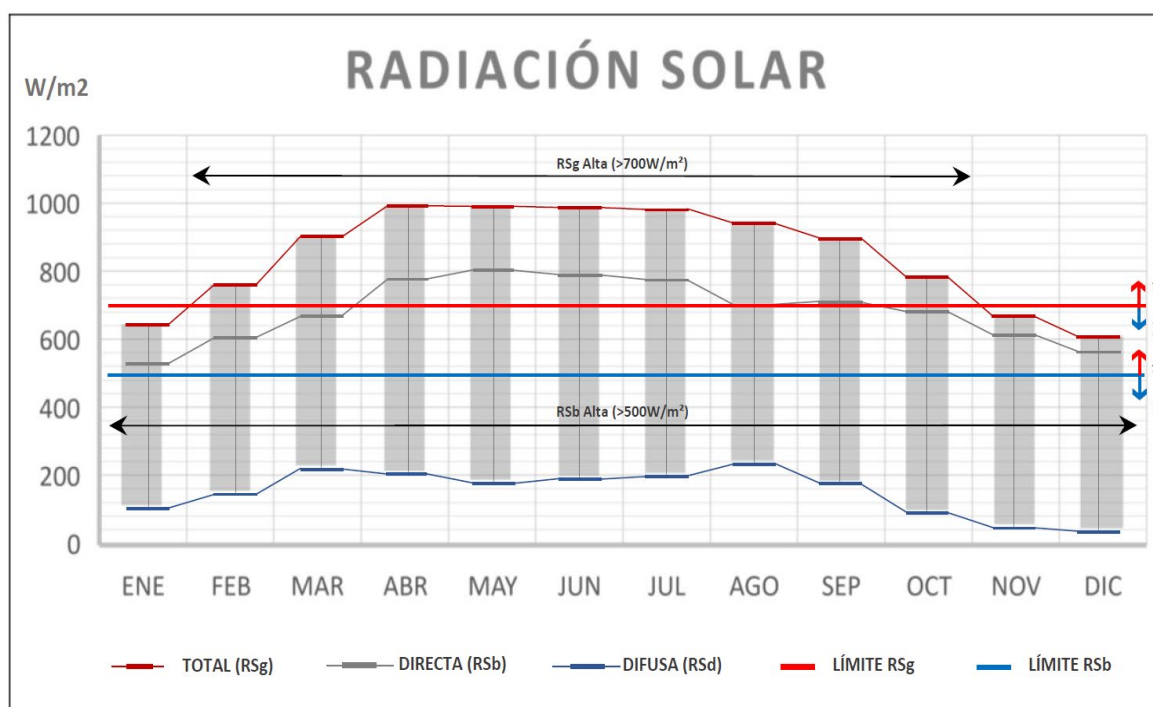
3.3.2.3. Radiación Global Horizontal

La intensidad de la Radiación Solar Global (RSg) es alta en la ciudad de Ensenada durante prácticamente todo el año al presentar registros superiores a los 700.0 W/m²

a excepción por el periodo de noviembre a febrero que presentan registros inferiores. Conforme a la Figura 28, la Radiación Solar Global Horizontal (RSg) anual corresponde a 847.3 W/m², los meses de abril y mayo destacan con una RSg máxima promedio de 991.8 W/m², mientras que los meses con menor RSg máxima promedio son para diciembre y enero con 609.9 W/m² y 644.8 W/m² respectivamente. Por otro lado, la Radiación Solar Directa (RSb) anual corresponde a 687.6 W/m², los meses de abril y mayo destacan con RSb máxima promedio de 779.8 W/m² y 805.8 W/m² respectivamente, mientras que los meses con menor RSb máxima promedio son para enero y diciembre con 533.3 W/m² y 566.3 W/m² respectivamente. Mientras que la Radiación Solar Difusa (RSd) presenta niveles irregulares durante prácticamente todo el año que van desde 43.6 W/m² para el mes de diciembre hasta los 241.8 W/m² para el mes de agosto.

Figura 28.

Comportamiento mensual de la radiación solar máxima promedio respecto a los niveles aceptables de Radiación solar.



Nota. Gráfica elaborada a partir de la BAT “*Bioclimatic analysis tool: An alternative to facilitate and streamline preliminary studies*”. Por Martínez, R. & Fuentes, V., 2014.

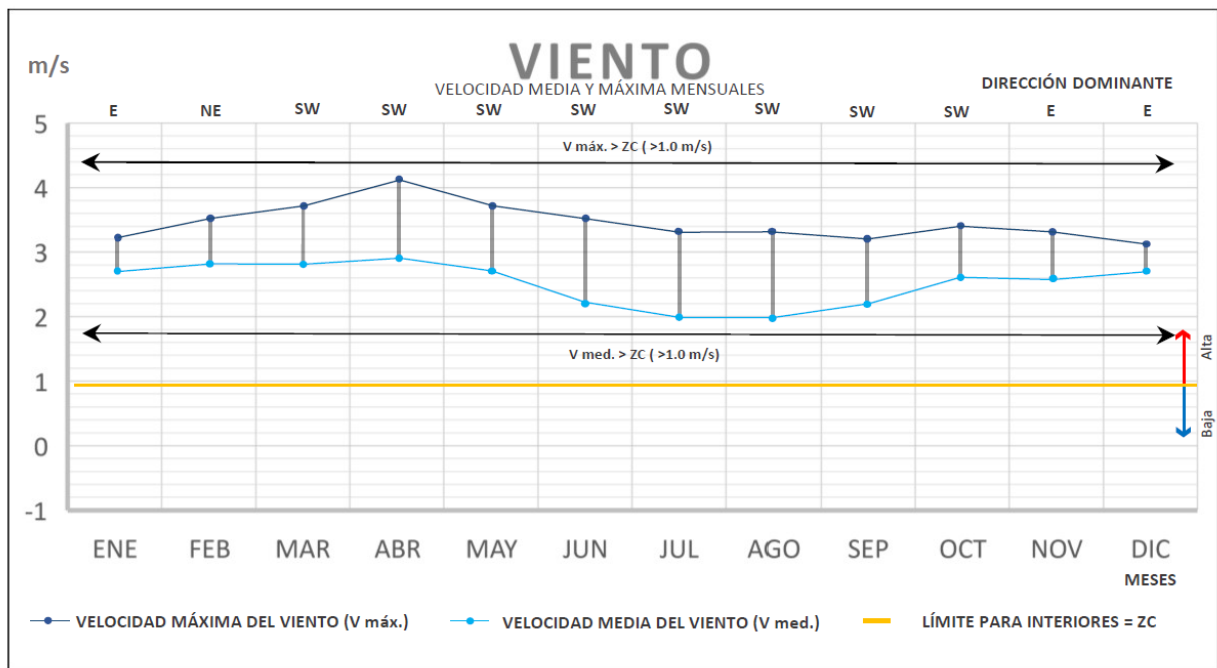
3.3.2.4. Régimen de Viento

“De acuerdo con Evans (2007), las velocidades de viento superiores a 1.0 m/s se consideran indeseables para interiores, mientras que las inferiores a este valor pueden generar condiciones de confort con extremos probables que podrían atenderse a partir de un posible rango de amplitud” (Rincón, 2019. P. 123-124). Por lo tanto, se ha determinado aplicar este límite que corresponde a 1.0 m/s.

La siguiente gráfica muestra la velocidad y dirección del viento (Figura 29), la velocidad media (promedio anual) en Ensenada es de 2.5 m/s y los vientos dominantes provienen del SW con una frecuencia del 19.3 % anual. Los meses de julio y agosto son los que presentan una velocidad media menor que equivale a 2.0 m/s.

Figura 29.

Velocidades mensuales de viento (media y máxima)



Nota. Gráfica elaborada a partir de la BAT “*Bioclimatic analysis tool: An alternative to facilitate and streamline preliminary studies*”. Por Martínez, R. & Fuentes, V., 2014. Energy Procedia, 57(55), 1374–1382. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.128>

3.3.3. Área de estudio

La selección del área de estudio se llevó a cabo a través un análisis multicriterio, con el objetivo de identificar las zonas de mayor vulnerabilidad y bajos recursos que por sus características se vean gravemente afectados dados el incremento de temperatura, puesto que, esta población es más susceptible a los efectos de la ICU. El análisis de la ciudad se realizó por medio de la exploración de las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) de la ciudad, estas son extensiones territoriales conformadas por un conjunto de manzanas o cuadras que subdividen a un municipio.

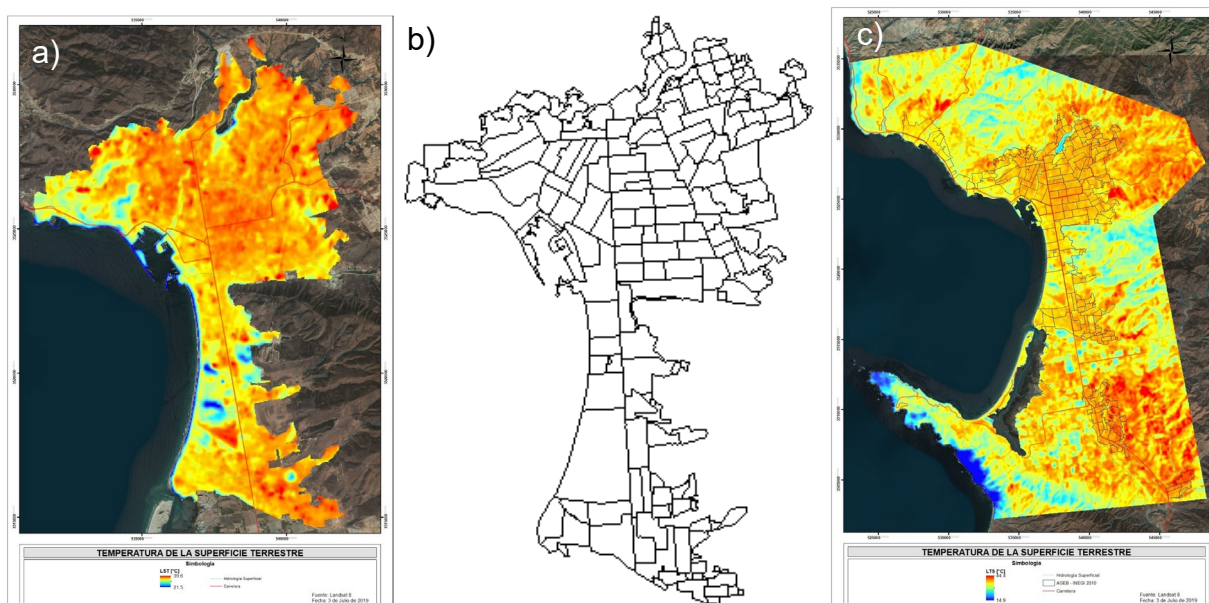
El objetivo fue identificar la AGEB más crítica de la ciudad de acuerdo con: I) Datos sociodemográficos (densidad demográfica; población total; total de viviendas; viviendas particulares habitadas; ocupantes en viviendas particulares habitadas; población de 12 y más económicamente activa y población sin afiliación a servicios de salud); II) Desviación respecto a la media (se tomará como criterio que las AGEB ubicadas por arriba de la media representan una zona crítica de la ciudad); III) Temperatura de la Superficie Terrestre (LTS) (identificación de zonas con temperatura elevada; y IV) Composición geométrica de cada AGEB (orientaciones críticas y usos de suelo).

En la Figura 30 se presentan tres mapas, el primero (izquierda) muestra la Temperatura de la Superficie Terrestre de la ciudad de Ensenada del día 03 de julio de 2019, se identificó un rango de temperatura de 21.5 – 39.6 °C se observa mayor temperatura al norte y centro de la ciudad. La segunda imagen (centro) muestra las AGEB que componen la ciudad y la última figura (derecha) presenta la LTS del municipio de Ensenada y por AGEB, lo que facilita la identificación de AGEB que presentan temperaturas elevadas.

En la Figura 31 se observa a manera de esquema los criterios considerados para la selección del área de estudio, en el Capítulo 3, apartado 3.1 se desglosan y se presenta la AGEB seleccionada.

Figura 30.

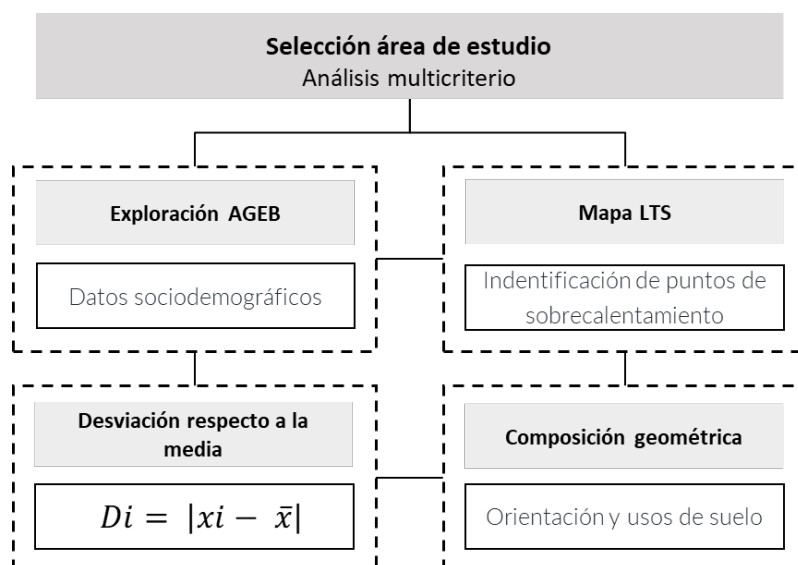
Mapa de LTS de la ciudad de Ensenada (a), (b) AGEB de la ciudad y (c) mapa de LTS con AGEB



Nota. Obtenido con base en el *Censo de la Población y Vivienda 2020 (INEGI)*. Fecha de acceso 2021-11-05 y de Landsat 8 (2019-07-03)

Figura 31.

Criterios para la selección del área de estudio



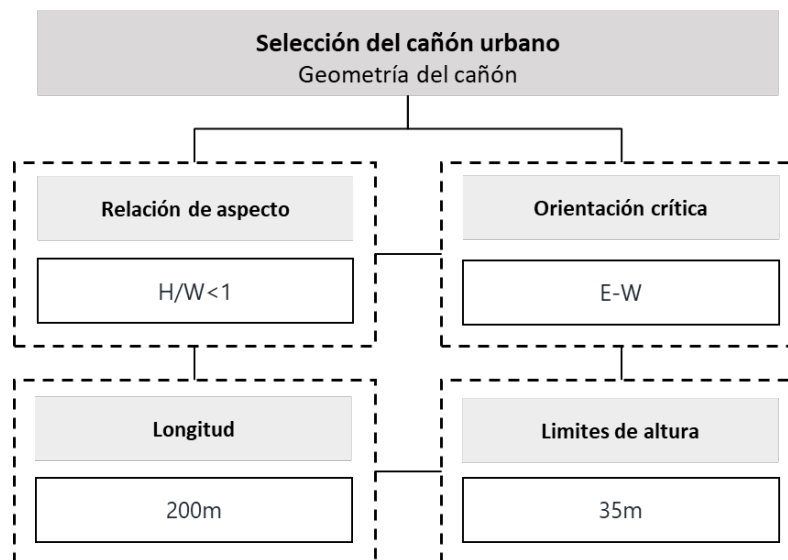
3.3.4. Unidad de análisis

La unidad de análisis consiste en un cañón urbano ubicado dentro de la ciudad de Ensenada, B.C., esta selección se llevó a cabo dentro de la AGEB identificada como

crítica a razón de las características definidas en el apartado anterior. La selección del cañón urbano se llevó a cabo a partir de cuatro criterios: a) orientación crítica del cañón; b) la relación de aspecto (H/W); c) los límites de altura segun el uso de suelo y d) longitud de la calle (cañón más largo sin intersecciones) (Figura 32). Según Abdollahzadeh & Bioria, (2021), las orientaciones con más problemáticas por orden son las siguientes: NW-SE (caso más crítico); W-E (caso crítico); N-S (mayor nivel de comodidad en términos de confort) y NE-SW (caso óptimo).

Figura 32.

Criterios para la selección de cañón urbano



3.3.5. *Periodo de estudio*

El periodo de estudio corresponde al día térmico típico mensual cálido, el cual se define como el cálculo de la mínima sumatoria mensual de las diferencias absolutas de dos de sus variables climáticas.

- 1) La oscilación térmica promedio diaria (Osc_{md}) respecto a la oscilación térmica promedio mensual (Osc_{mm}) y;
- 2) La Temperatura de Bulbo Seco promedio diaria (T_{md}) respecto a la Temperatura de Bulbo Seco promedio mensual (T_{mm}).

Esto se traduce a través en la siguiente ecuación:

Ecuación 3.

Día Típico Mensual (Método de oscilación y Media)

$$D_{tm} = \sum [abs(Osc_{md} - Osc_{mm}) - abs(T_{md} - T_{mm})] \Rightarrow D_{tm} \cong 0$$

Para determinar este día típico se empleó una hoja de cálculo en Excel que utiliza el método de Oscilación y Media (Ecuación 3) y un archivo climático EPW, en la Tabla 14 se muestran los días típicos de temperatura obtenidos. A partir de una revisión y análisis de las temperaturas, se estableció como día térmico típico mensual cálido el 29 de agosto ubicado entre las horas 5 761 al 5 784. En la Tabla 15 se observan las isotermas de temperaturas horarias de los días típicos mensuales de Ensenada.

Tabla 14.

Gradientes térmicos de temperaturas máximas, mínimas y medias de los días típicos de Ensenada

Días típicos Temperatura			
Día	Máxima	Media	Mínima
4 - ene	21.2	15.3	9.6
7 - feb	20.5	14.6	9.4
14 - mar	21.1	15.7	10.2
15 - abr	22.1	17.2	12.6
5 - may	25.5	20.7	16.0
26 - jun	27.5	23.1	19.0
20 - jul	29.8	25.6	20.7
29 - ago	31.2	26.5	22.2
30 - sept	29.6	24.7	19.8
17 - oct	27.3	21.6	16.6
16 - nov	23.2	17.4	11.6
7 - dic	19.6	13.7	8.3

Tabla 15.

Isotermas de temperaturas horarias de los días típicos mensuales de Ensenada

Día	Temperatura horaria																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
04-ene	14.4	13.1	11.7	11	10.2	9.7	9.6	11.1	13.5	15.9	17.9	19.6	20.7	21.2	21.1	20.2	18.5	17.8	17	16.3	15.6	14.8	14	13.1
07-feb	11.3	10.7	10.2	9.9	9.6	9.4	9.5	11.1	13.3	15.5	17.3	18.8	19.8	20.4	20.5	20	18.8	17.5	16.7	15.9	15.1	14.2	13.3	12.4
14-mar	12.5	11.8	11.2	10.8	10.4	10.2	10.6	13	15.2	17	18.5	19.8	20.6	21	21.1	20.6	19.5	18.1	17.5	16.8	16.2	15.6	14.9	14.2
15-abr	14.7	13.8	13.4	12.9	12.6	12.7	14.2	15.8	17.2	18.5	19.7	20.7	21.5	22	22.1	21.8	21	20	18.9	17.9	17	16	15	13.9
05-may	17	16.6	16.4	16.2	16	16.4	18	19.5	21	22.3	23.4	24.2	25	25.4	25.5	25.2	24.4	23.5	22.4	21.5	20.7	19.8	18.9	18.1
26-jun	21	19.9	19.4	19	19	19.5	20.4	21.7	23	24.1	25.3	26.2	26.9	27.3	27.5	27.3	26.7	25.9	24.8	23.6	22.7	21.7	20.7	19.6
20-jul	22.6	21.7	21.2	20.8	20.7	21.2	22.1	23.4	24.7	26.1	27.3	28.4	29.2	29.7	29.8	29.7	29.2	28.2	27	26.8	26.5	26.2	26	25.7
29-ago	23.6	23.1	22.8	22.4	22.2	22.2	23.4	24.8	26.4	27.8	29.1	30	30.8	31.1	31.2	30.9	30.2	29.1	28	27.2	26.4	25.6	24.8	24
30-sep	22.7	22.1	21.7	21.4	21.2	21.2	22.4	23.9	25.7	27.5	29.1	29.4	29.6	29.2	28.8	28.2	27.3	26.3	25.2	24	23.1	22.1	20.9	19.8
17-oct	17.9	17.3	17.1	16.8	16.6	16.6	17.6	19.4	21.5	23.2	24.6	26	26.9	27.3	27.2	26.4	25	23.6	23	22.3	21.6	20.9	20.2	19.5
16-nov	13.9	13.2	12.6	12.2	11.8	11.6	11.8	14.5	16.9	19.1	20.8	22	22.9	23.2	22.9	21.8	20.2	19.6	19.1	18.5	18	17.4	16.9	16.3
07-dic	10.1	9.6	9.1	8.8	8.5	8.3	8.4	10.5	12.9	15.4	17.1	18.3	19.1	19.6	19.5	18.5	17	16.2	15.6	14.8	14	13.2	12.4	11.6

Frio

Confortablemente frío 80%

Confort 90% de las personas

Confortable cálido 80%

Caliente

3.3.6. Herramientas e instrumentos

Los instrumentos y herramientas se seleccionaron conforme a los objetivos de la investigación. Se empleó una cámara termográfica infrarroja marca Flir modelo C5 para medir las temperaturas de la superficie, con un rango de temperatura de -20 a 400 °C, resolución de 19 200 píxeles y error de ± 3 °C o ± 3 %. Las tomas de fotografías térmicas se emplearon como un método ilustrativo para describir el estado actual del cañón urbano y la importancia de la sombra sobre la temperatura de los materiales (calle, aceras y muros).

La toma de fotografías hemisférica se realizó a través de una cámara marca Canon con lente ojo de pez, lo que permitió capturar el estado actual del cañón urbano, con la finalidad de determinar el factor de cielo visible (SVF). Se trata de una cámara modelo 80D, lente EF-S 18-135 mm IS USM con lente canon ef 8-15 mm f/4l ojo de pez usm. Para estimar el SVF se empleó una herramienta que calcula y simula flujos de radiación de onda corta y larga en distintos entornos, pero que también permite calcular el SVF, denominada *Rayman* (Matzarakis et al., 2007, 2010).

En cuanto a las simulaciones, estas se llevaron a cabo a través de un interfaz gráfico de diseño computacional asistido por algoritmos denominada *Grasshopper*® y un visualizador 3D (Rhinoceros). Para el análisis de las variables climáticas se empleó un complemento ambiental denominada *Ladybug*®, este importa archivos de *EnergyPlus Weather*® (.EPW) y proporciona una variedad de gráficos interactivos en 2D y 3D. Por ejemplo, permite llevar a cabo análisis de radiación, horas de luz solar y sombra.

Por último, se empleó un motor evolutivo que permite a los usuarios ejecutar simulaciones evolutivas,0 es un complemento para Grasshopper. Este funciona a través de un modelo evolutivo que tiene como objetivo replicar y aplicar los principios evolutivos básicos de variación, evaluación y selección para generar una población de soluciones de diseño candidatas en función a objetivos geométricos y ambientales definidos. La interfaz permite a los diseñadores importar y analizar datos meteorológicos y ejecutar simulaciones de radiación, trayectoria solar e iluminación natural (Luke, 2015; Showkatbakhsh & Makki, 2020).

En la Tabla 16 se describen las especificaciones de las herramientas e instrumentos que se emplearon para esta investigación. Se definen modelos y marcas de los instrumentos y la fecha de medición, mientras que en las herramientas se especifican los nombres comerciales y el uso de estas.

Tabla 16.

Herramientas e instrumentos

Herramientas e Instrumentos			
Herramienta	Gráfico descriptivo	Fecha y Hora	Hora
Cámara térmica marca Flir modelo C5, rango de temperatura de -20 a 400 °C y resolución de 19 200 píxeles y error de ± 3 °C o ± 3 %.		21/03/2022 (Solsticio de primavera)	13:00 – 14:00
Cámara marca Canon modelo 80D, lente EF-S 18-135 mm IS USM con lente canon ef 8-15 mm f/4l ojo de pez usm.		21/03/2022 (Solsticio de primavera)	Media día solar 12:54pm
Herramienta que calcula y simula flujos de radiación de onda corta y larga en distintos entornos, y permite calcular el factor de cielo visible	Rayman®	21/03/2022 (Solsticio de primavera)	Media día solar 12:54pm
Interfaz gráfica de diseño computacional asistido por algoritmos y un visualizador 3D	Rhinoceros 3D® y Grasshopper®	Día térmico típico mensual cálido 29 de agosto	
Complemento ambiental para <i>Grasshopper</i> , importa archivos EPW y proporciona una variedad de gráficos interactivos en 2D y 3D. Por ejemplo, permite llevar a cabo análisis de radiación, horas de luz solar y sombra.	Ladybug®	Día térmico típico mensual cálido 29 de agosto	
Motor evolutivo que permite a los usuarios ejecutar simulaciones evolutivas, en un complemento para <i>Grasshopper</i>	Wallacei®	Día térmico típico mensual cálido 29 de agosto	

3.3.7. Desarrollo del modelo de simulación experimental

Para llevar a cabo el diseño del algoritmo de optimización morfológica fue necesario definir objetivos o criterios de aptitud, estos hacen referencia a las condiciones a la que se sometió la geometría primitiva, posterior a ello, se construyeron genes (parámetros dinámicos) en función a los objetivos preestablecidos, los genes permiten manipular la composición geométrica del cañón, a estos últimos se les asignaron límites y condicionales de acuerdo con la normatividad de la ciudad de Ensenada.

Debido a que la teoría evolutiva puede resultar extraño para algunos diseñadores, una descripción breve de la terminología es clave para una comprensión integral del experimento. En la Tabla 10, del apartado 1.6 Marco conceptual se define la terminología básica del diseño evolutivo.

3.3.7.1. Selección de objetivos de aptitud

Dado que el experimento tiene como objetivo optimizar bajo un principio evolutivo de elitismo, la morfología de un cañón urbano para que sea capaz de alcanzar proporciones geométricas de compacidad solar orientadas a mitigar el efecto de sobrecalentamiento derivado de la ICU a microescala, se definieron tres objetivos de aptitud para guiar el experimento hacia la formulación efectiva del problema de diseño (Figura 33). Los objetivos definidos son:

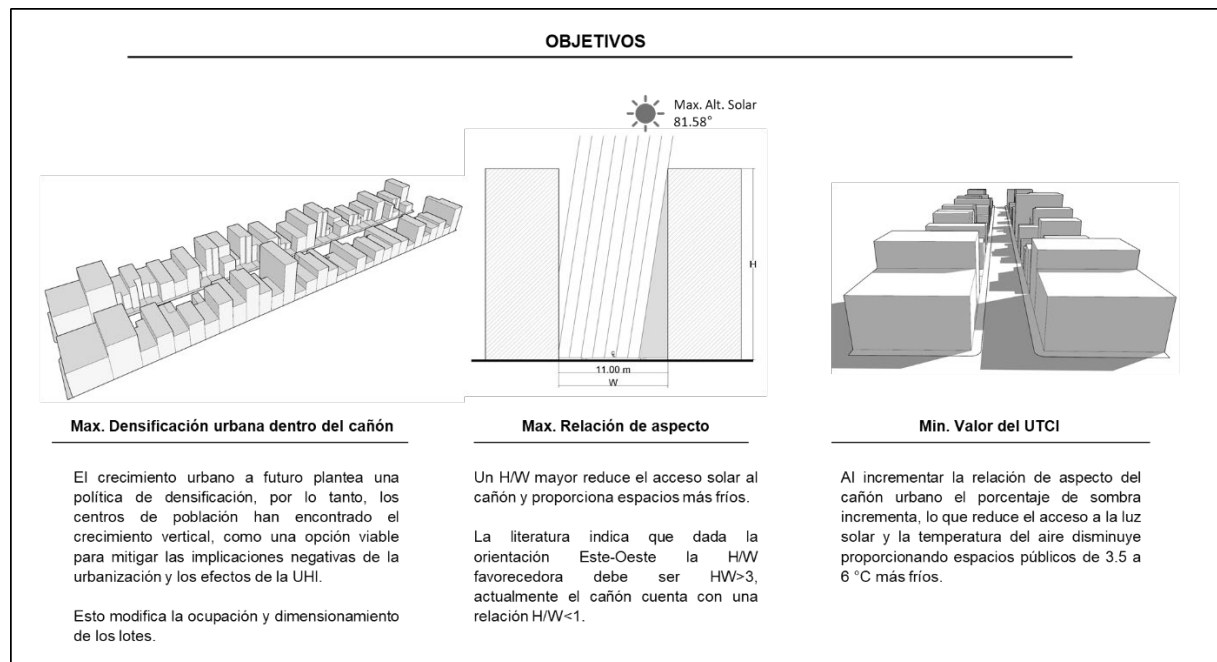
- 1) Maximizar la densificación urbana dentro del cañón: el crecimiento urbano a futuro plantea una política de densificación, por lo tanto, los centros de población han encontrado el crecimiento vertical, como una opción viable para mitigar las implicaciones negativas de la urbanización y los efectos de la ICU. Esto modifica la ocupación y dimensionamiento de los lotes.
- 2) Maximizar la relación de aspecto (alto entre ancho H/W): al incrementar las alturas de las edificaciones, la relación de aspecto (H/W) que mantienen los edificios, respecto a los anchos de vialidad cambia. Un H/W mayor reduce el acceso solar al cañón y proporciona espacios más fríos. La literatura indica que dada la orientación Este-Oeste la relación de aspecto favorecedora es $HW > 3$, actualmente el cañón cuenta con una relación $H/W < 1$.

- 3) Minimizar el valor del índice universal de confort térmico (UTCI): al incrementar la relación de aspecto del cañón urbano, el porcentaje de sombra incrementa, lo que reduce el acceso a la luz solar y la temperatura del aire disminuye proporcionando espacios públicos de 3.5 a 6 °C más fríos.

Los objetivos uno y dos están directamente relacionados con las variaciones morfológicas empleadas para construir la forma geométrica del cañón urbano, en el contexto del modelo evolutivo, estas variaciones de altura representan el “código genético” (genes) de las edificaciones.

Figura 33.

Objetivos de aptitud



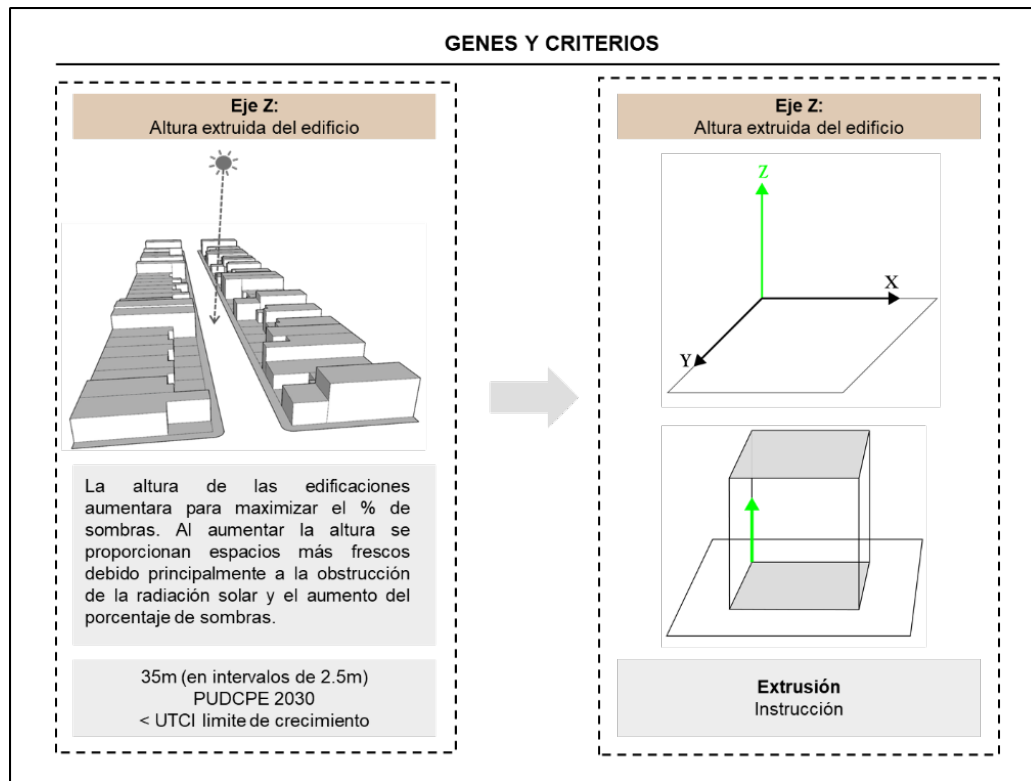
Estos genes definen los atributos de la composición geométrica del cañón urbano y permiten la mutabilidad de las características morfológicas que definen a la geometría primitiva. Los genes establecidos están en función al eje Z, lo que permite que las edificaciones crezcan y se desplacen. En la Figura 34 se describen los genes, mientras que las condiciones aplicadas al algoritmo para la ejecución de acciones se enlistan a continuación:

- 1) La altura de las edificaciones aumentará para maximizar el % de sombras. Al aumentar la altura de las edificaciones se proporcionan espacios más frescos debido a la obstrucción de la radiación solar y el aumento en la proyección de sombras, esto a través del UTCI y el PDUCPE 2030 como limitantes de crecimiento vertical de las edificaciones. La altura crecerá en intervalos de 2.5 m a partir de la altura existente de cada edificación, el límite de altura corresponde a 35m conforme lo estimula el PDUCPE 2030.
- 2) Una vez aumentadas las alturas de las edificaciones y a través de una regla matemática establecida al algoritmo se obtiene la altura media de estas, la cual se divide entre el ancho del cañón urbano que corresponde a 11m (8m de vialidad y 3m de aceras); el valor numérico obtenido de esta división corresponde a la relación de aspecto (H/W), la cual se verá afectada en cada interacción del algoritmo o variación morfológica. El motor evolutivo maximiza dicho valor hasta alcanzar el óptimo con relación a los tres objetivos de aptitud establecidos al algoritmo.
- 3) Al maximizar la relación HW del cañón urbano, la densidad de este se ve afectada; para que el algoritmo evolutivo pueda maximizar la densificación urbana dentro del cañón se estableció la siguiente regla: una vez aumentada las alturas de las edificaciones, se calcula el volumen resultante de cada una de estas, posteriormente, se suman dichos volúmenes y el resultante se divide entre el número total de edificaciones (32 unidades habitacionales) para calcular el volumen medio del cañón. Este valor numérico se verá afectado a medida que las poblaciones y generaciones evolucionan.
- 4) Para cada variación de altura o escenario resultante, se calcula el UTCI por medio de un componente de evaluación ambiental que integra un modelo de cálculo solar basado en el conocido “*SolarCal*” de Edward Arens (2015) que evalúa el efecto de la radiación solar sobre el confort exterior. El objetivo del motor evolutivo es minimizar el UTCI; para que el algoritmo pueda disminuir dicho índice se localiza el valor más alto de temperatura (°C) para cada uno de los escenarios resultantes, este valor de temperatura o sensación térmica se

conecta al motor evolutivo que se encarga de minimizarlo en relación con los otros objetivos de aptitud establecidos, es decir, buscará la configuración óptima respecto a los tres objetivos.

Figura 34.

Representación esquemática de Genes y Criterios



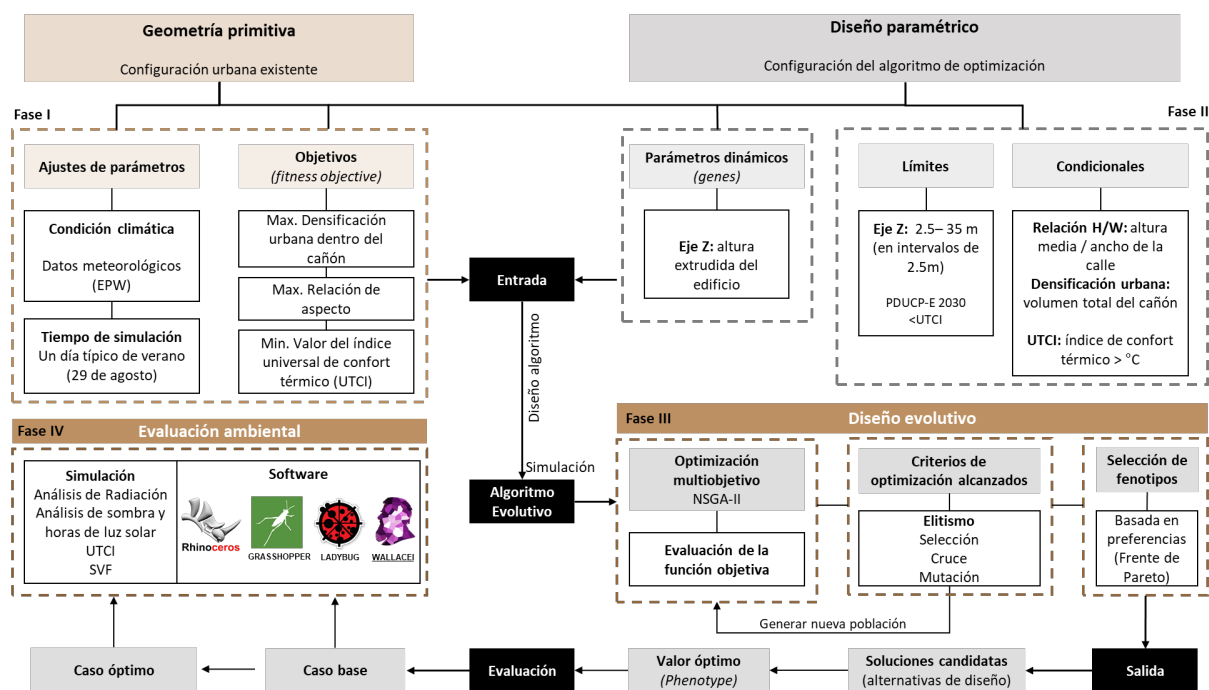
3.3.7.2. Implementación del diseño algorítmico y modelado de estrategia evolutiva

El experimento se ejecuta dentro de la interfaz gráfica de diseño computacional asistido por algoritmos y un visualizador 3D. Se llevan a cabo simulaciones de radiación solar; sombras; microclima urbano a través del UTCI; horas de luz solar y porcentaje de visibilidad del cielo (SVF). Estas fueron realizadas en el escenario base y en el escenario del caso de optimización morfológica seleccionado posterior a las variaciones morfológicas aplicadas a la forma geométrica del cañón urbano, es decir, una vez realizada la optimización multiobjetivo, por otro lado, las variaciones morfológicas fueron ejecutadas con el complemento Wallacei® un motor evolutivo y analítico desarrollado por Mohammed Makki y Milad Showkatbakhsh.

La plataforma opera a través del Algoritmo Genético Multiobjetivo de Clasificación no Dominado II (NSGA-II), en la Figura 35 se describe el pseudocódigo del experimento, el esquema se divide en cuatro fases. La fase I y II representan los parámetros de entrada del algoritmo de optimización morfológica. Estos parámetros permiten la manipulación de la composición geométrica del cañón y hacen referencia a las condiciones a la que se someterá la geometría primitiva. En la fase III se describe la ejecución de la simulación de acuerdo con el algoritmo NSGA-II. El algoritmo está compuesto por tres componentes: I) parámetros de entrada; II) la ejecución del algoritmo, y III) los parámetros de salida, estas representan el Frente de Pareto, es decir, las alternativas de diseño óptimas seleccionadas. Por otro lado, la fase IV hace referencia a la evaluación climática realizada al caso óptimo y al caso base.

Figura 35.

Pseudocódigo del experimento



Como anteriormente se mencionó, el NSGA-II funciona a través de una población inicial de soluciones aleatorias (escenarios), cabe resaltar que esta población inicial no corresponde al caso base, el algoritmo genera a partir del caso base una población inicial que es aleatoria, posterior a ello estas soluciones se van modificando en base a

procesos de variación (selección, cruce y mutación). Las soluciones se evalúan a través de una medida de desempeño objetiva y finalmente, se seleccionan algunas y se descartan otras mediante un mecanismo de selección predefinido. Por último se seleccionan la o las soluciones que alcanzan valores óptimos (Park et al., 2020).

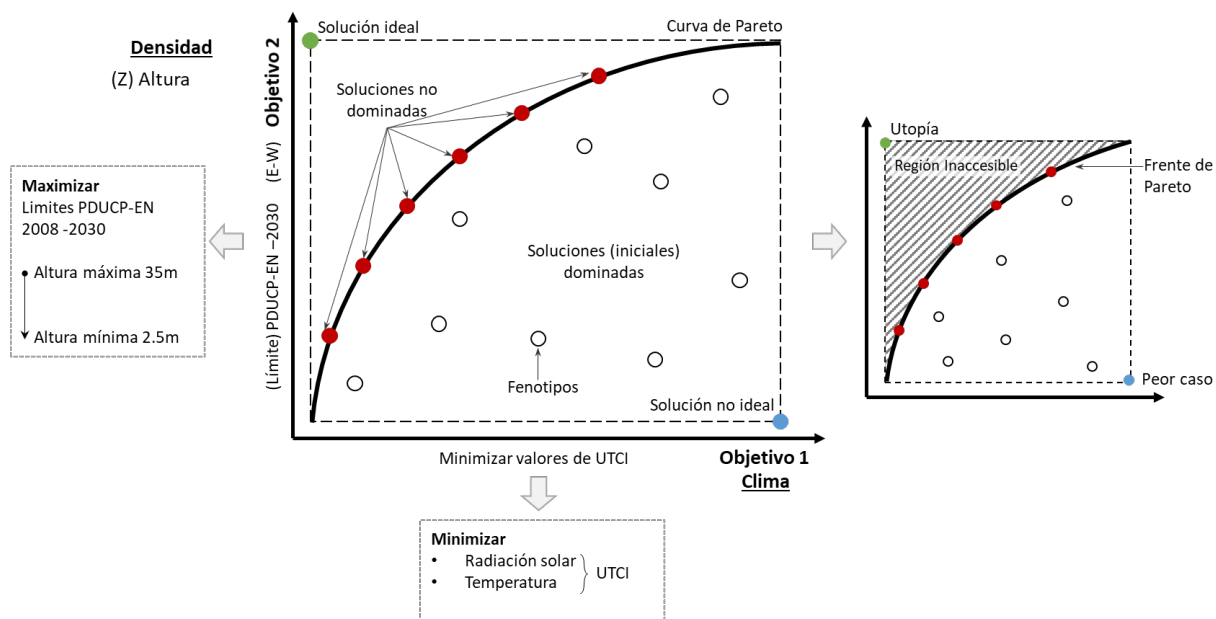
3.3.7.3. Plan para la selección del caso óptimo

Debido a la naturaleza de la investigación el alcance de esta es de tipo correlacional, debido a que existe una correlación entre: a) la configuración geométrica del cañón (densidad) y b) el microclima resultante en el cañón.

El objetivo es lograr un Óptimo o Frente de Pareto, en la Figura 36 se presenta de manera descriptiva la correlación entre la densidad del cañón y el microclima resultante, en relación con el Frente de Pareto como método para la selección y análisis del caso óptimo. Este último representa a las soluciones no dominadas, es decir, las soluciones óptimas encontradas en base a todos los escenarios generados.

Figura 36.

Descripción del Frente de Pareto



3.3.7.4. Configuración de la interfaz

El entorno computacional juega un papel importante en la aplicación de un modelo evolutivo como estrategia de diseño. El tamaño de la población se limitó a 25 individuos (escenarios), mientras que el tamaño de la generación se estableció en 20 generaciones, límite impuesto por la carga computacional y el tiempo requerido para realizar el experimento. En cada iteración de ejecución de la simulación, los 20 escenarios se evalúan en función a los criterios de aptitud (establecidos anteriormente) y se prescribe un valor de aptitud. Se implementó un valor de elitismo del 50 % que garantiza que la mitad de la población se reproducirá a partir de las soluciones óptimas, mientras que la otra mitad se reproduce aleatoriamente a partir de las soluciones candidatas restantes. Por último, una alta tasa de mutación junto con una baja probabilidad de mutación y una tasa de cruce moderada, garantiza que se aplique una variación adecuada a los individuos de la población. La Tabla 17 muestra los valores de la configuración de la interfaz.

Tabla 17.

Configuración de la interfaz para las simulaciones

Parámetros	Breve descripción	Valor
Tamaño de la población	Número de soluciones en cada generación	25
Tamaño de la generación	Número de interacciones por ejecución de la simulación	20
Probabilidad de cruce	Porcentaje de soluciones en la generación que se reproducirá para la siguiente generación; es decir, el número de veces que se produce un cruce de cromosomas en una generación, o bien, la posibilidad de que dos cromosomas intercambien algunas de sus partes. Una tasa del cruce del 100 % significa que todos los descendientes se generan por cruce	50 %
Probabilidad de mutación	El porcentaje de mutaciones que toma lugar en la generación (Deb et. al. recomienda que la probabilidad de mutación sea $1/n$, donde n es el número de variables en el diseño del problema. De tal manera que el valor predeterminado es $1/n$).	$1/n$
Tasa de cruce	Un valor de índice de distribución grande da una mayor probabilidad de generar descendientes cercanos a las soluciones principales, mientras que un valor de índice de distribución pequeño permite seleccionar soluciones distantes como soluciones secundarias (<i>children Solutions</i>).	60 %
Tasa de mutación		80 %
Semilla aleatoria	Descendencia aleatoria a partir de la cual se efectúan las operaciones de selección, recombinación y mutación.	1

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

El capítulo cinco se conforma a partir de dos apartados, el primero consiste en la caracterización del escenario experimental, en este se definió la selección del área de estudio y el análisis climático de la zona, posterior a ello se determinó la unidad de análisis y se llevó a cabo el modelado de la geometría primitiva del cañón urbano para la simulación de los escenarios, por último se presentan los datos obtenidos de la toma de fotografías térmicas y hemisféricas para el cálculo de la visibilidad del cielo (SVF). Mientras que el apartado dos, muestra los datos obtenidos de las simulaciones.

4.1. Caracterización del escenario experimental

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la selección del área de estudio; se realizó un análisis climático que permitió analizar el comportamiento del medio ambiente en el que se desplaza el experimento. Por último, se abordan los datos obtenidos de las mediciones In Situ, estas consistieron en la toma de fotografías hemisféricas para calcular la visibilidad del cielo o SVF y la toma de fotografías térmicas del cañón urbano, las cuales fueron empleadas como un método ilustrativo para describir el estado actual del cañón urbano y la importancia de la sombra sobre la temperatura de los materiales (calle, aceras y muros).

4.1.1. Área de estudio y análisis climático

Como se describió en el apartado 3.3.3 Área de estudio, la selección se realizó a través de un análisis multicriterio que involucra: I) Datos sociodemográficas; II) Desviación respecto a la media; III) Temperatura de la superficie terrestre y IV) La composición geométrica de cada AGEB (Figura 31). Con el objetivo de identificar la AGEB más crítica de la ciudad.

4.1.1.1. Variables sociodemográficas

El estudio de la ciudad se llevó a cabo a través de la exploración de las Áreas Geoestadísticas Básicas de la ciudad (AGEB), debido a que estas permitieron analizar la ciudad a partir de extensiones territoriales (conjunto de manzanas), lo que facilita el estudio. El objetivo consistió en identificar la AGEB más crítica de la ciudad en función con los siguientes datos sociodemográficos: a) densidad demográfica, b) población total, c) total de viviendas, d) viviendas particulares habitadas, e) ocupantes en viviendas particulares habitadas, f) población de 12 y más económicamente activa y e) población sin afiliación a servicios de salud. La exploración de AGEB se llevó a cabo por medio de la plataforma SCINCE¹ 2020 del INEGI, los datos obtenidos de esta exploración fueron trasladados a una tabla en una hoja de cálculo en Excel (Ver

¹ SCINCE: Sistema de Consulta de Información Censal. <https://gaia.inegi.org.mx/scince2020/>

Apéndice 2), y posteriormente se determinó la desviación respecto a la media o varianza ajustada de cada una de las variables mencionadas anteriormente, por medio de la siguiente fórmula (Ecuación 4):

Ecuación 4.

Desviación respecto a la media

$$Di = |xi - \bar{x}|$$

Donde:

xi : valor de la variable estadística

$\bar{x}$: La media aritmética

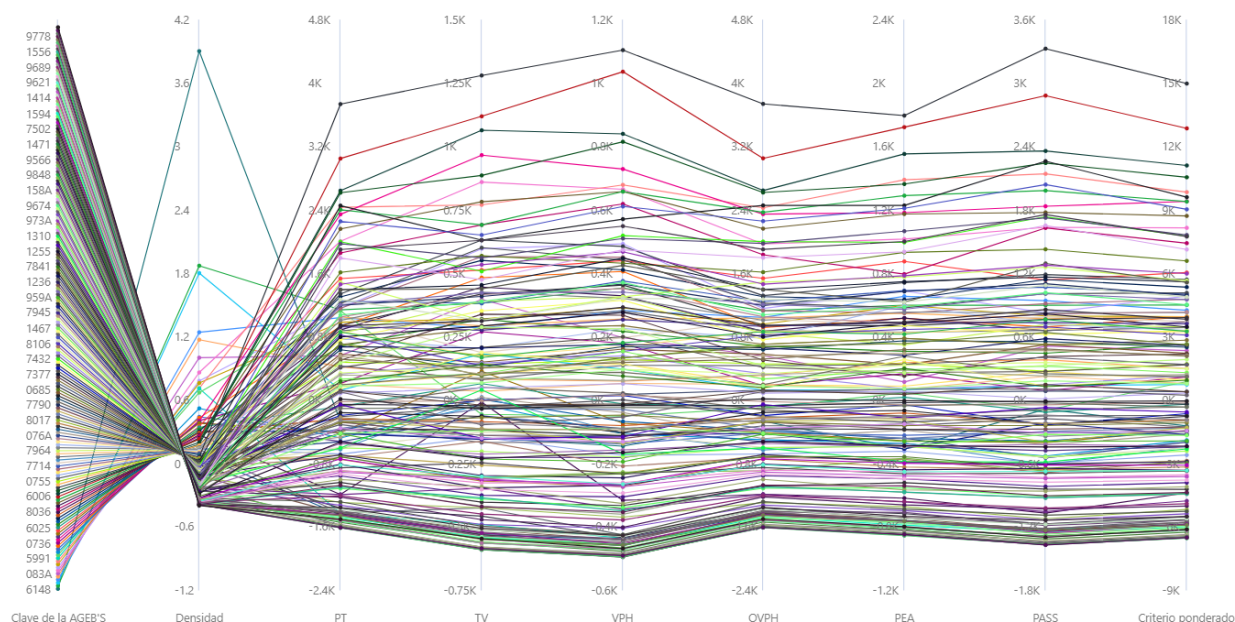
La varianza ajustada es una medida de posicionamiento o dispersión que indica que tanto se desvían o separan los datos con respecto a la media, de tal manera que los datos que se encuentran por encima de la media dan como resultado cantidades positivas, mientras que los que se encuentran por debajo de esta, dan un número negativo. Se tomó como criterio que las AGEB ubicadas por arriba de la media representan una zona crítica de la ciudad.

Por último, se agregó una última variable, la cual se denominó como “criterio ponderado” esta consistió en calcular el valor final de cada AGEB por medio de la suma de cada uno de los datos obtenidos de la desviación respecto a la media, es decir, cada una de las variables suman o restan puntos según su medida de posicionamiento, lo que permitió identificar las AGEB críticas.

Los datos obtenidos fueron graficados a través de un gráfico de coordenadas paralelas (Figura 37) con ayuda de una herramienta que permite visualizar datos denominado *Power Bi*® de *Microsoft*®, este tipo de gráfico es empleado para trazar datos numéricos multivariados y son ideales para comparar diversas variables y ver las relaciones entre ellas.

Figura 37.

Gráfico de coordenadas paralelas



Nota. Nomenclatura: PT (población total); TV (total de viviendas); VPH (viviendas particulares habitadas); OVP (ocupantes en viviendas particulares habitadas); PEA (población de 12 y más económicamente activa) y PASS (población sin afiliación a servicios de salud). Elaborado a partir de *datos sociodemográficos obtenidos del SCIENCE 2020 del INEGI*.

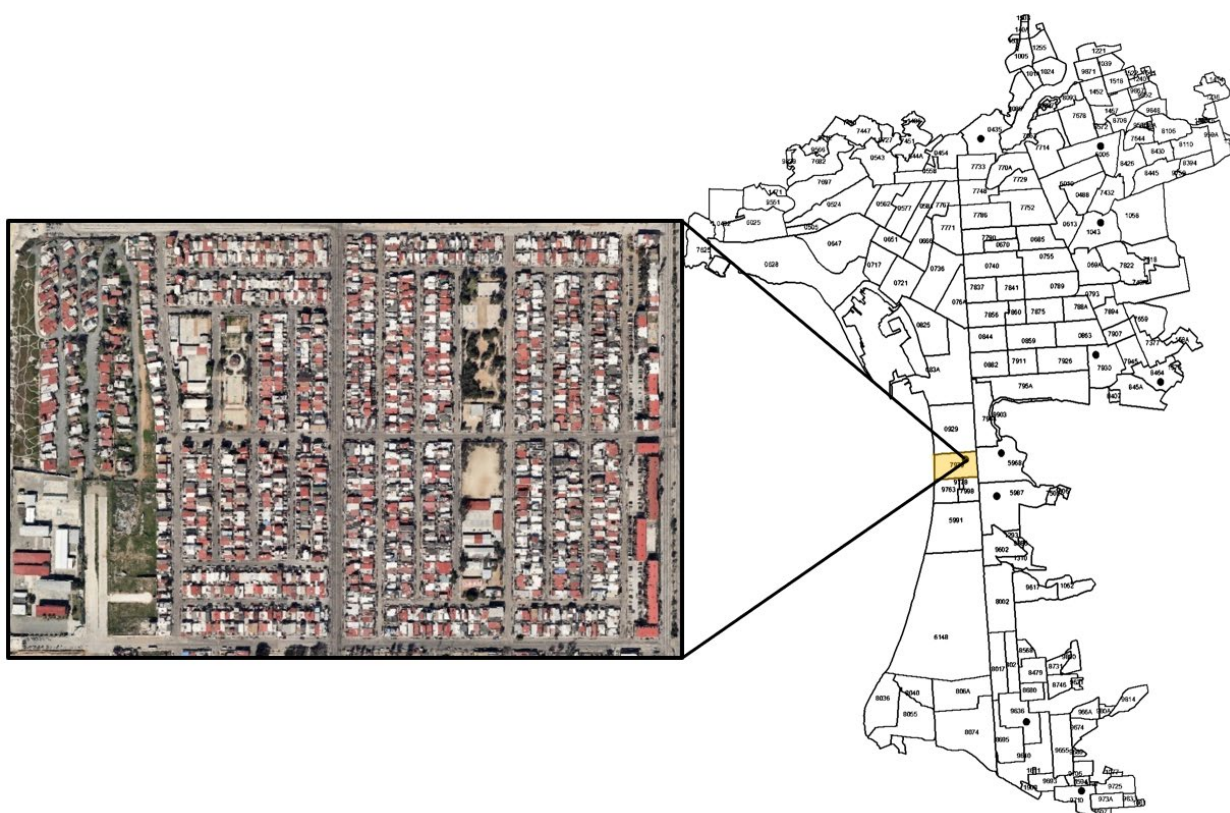
Las AGEBS críticas encontradas en el análisis multicriterio (Figura 37) se enlistan a continuación de manera descendente: 7979; 6006; 9636; 7930; 5987; 8464; 5968; 1043 y 9710. Posteriormente estas AGEBS fueron comparadas con una imagen de satélite LANDSAT 8 que muestra la temperatura de la superficie terrestre (Ver Apéndice 3 y Apéndice 4) para seleccionar el caso donde las personas son vulnerables y las temperaturas tienden a ser elevadas.

Como último paso, se realizó un análisis de la composición geométrica de las AGEBS críticas, los criterios analizados fueron la orientación de las calles y el uso de suelo. Se registraron tres usos de suelo: a) habitacional; b) equipamiento y c) industria, se decidió por un uso de suelo habitacional. Con respecto a la orientación se identificaron cuatro tipos de orientaciones N-S; E-W; NW-SE; y NE-SW. Según Abdollahzadeh & Biloría, (2021), las orientaciones con más problemáticas son NW-SE y E-W.

En la Figura 38 se muestra la AGEB seleccionada para el área de estudio que corresponde a la AGEB con clave 7979 (Fracc. Punta Banda I), debido a que fue la que presentó mayor vulnerabilidad sociodemográfica.

Figura 38.

AGEB críticas y Área de estudio (Fracc. Punta Banda I)



Nota. Elaborado a partir de Google Earth. Fecha de acceso 2021-11-05

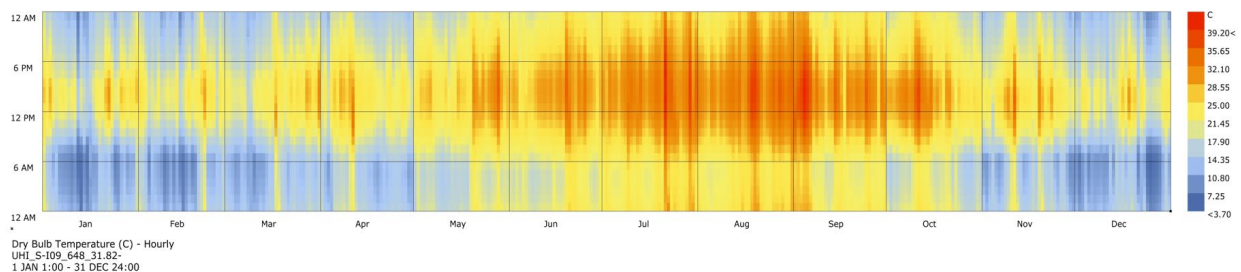
Una vez identificada el área de estudio se llevó a cabo un análisis climático de la zona que permitió conocer el comportamiento del medio natural en el que se desplaza el experimento. Los datos de las variables climáticas se obtuvieron a partir de un archivo climático EPW (*EnergyPlus Weather*) por medio de información interpolada para el área de estudio, estos fueron analizados y graficados por medio de una interfaz gráfica de diseño computacional asistida por algoritmos y un complemento ambiental para la interfaz. El análisis se llevó a cabo a lo largo de un año típico.

4.1.1.2. Temperatura de Bulbo Seco

La temperatura neutra (T_n) corresponde a $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ con un rango aceptable entre los $20.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para la zona de confort. En base a la Figura 39, se observa que los meses cálidos corresponden a julio, agosto y septiembre, mientras que los meses fríos son enero, febrero y diciembre. Se presenta un rango de temperatura de $< 3.70\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $> 39.20\text{ }^{\circ}\text{C}$. El mes más cálido es agosto, mientras que el mes más frío es enero. En el caso de las condiciones higrotérmicas, alrededor de las 06 h 00 se presenta la temperatura más baja del día, y alrededor de las 15 h 00 la temperatura más alta del día. En tanto, alrededor de las 10 h 00 y las 20 h 00, se presentan las condiciones medias de temperatura. Se aprecia que los meses de julio y agosto las temperaturas sobrepasan el rango de confort durante prácticamente todo el día, mientras que los meses de junio y septiembre las temperaturas se elevan a partir de las 06 h 00.

Figura 39.

Comportamiento mensual y horaria de la temperatura de bulbo seco



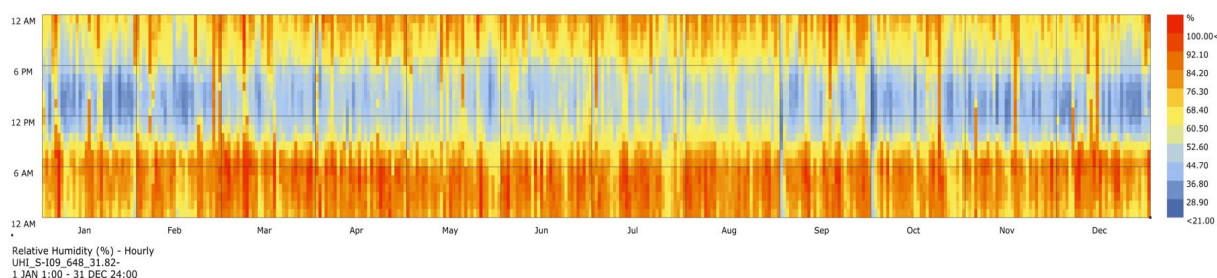
4.1.1.3. Humedad Relativa

El mes más seco corresponde a enero se presenta una HR_{med} igual a 65.4 %, mientras que en el mes húmedo que es agosto se presenta una igual a 86.1 %. Como se observa en el siguiente gráfico (Figura 40) prácticamente durante las madrugadas, mañanas y noches de todo el año se presentan condiciones de Humedad Relativa por encima de la zona de confort a excepción del periodo que va de noviembre a enero que presenta condiciones de confort a medio día, mientras que todas las tardes del año se presenta condiciones de confort. En el caso de las condiciones higrotérmicas, alrededor de las 06 h 00 se presenta la humedad relativa más alta del día, y alrededor

de las 15 h 00 la humedad relativa más baja del día. En tanto, alrededor de las 10 h 00 y las 20 h 00, se presentan las condiciones medias.

Figura 40.

Comportamiento mensual y horaria de la Humedad Relativa

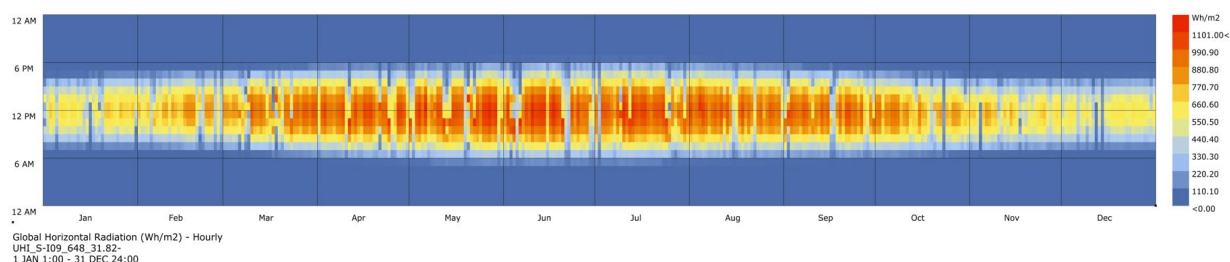


4.1.1.4. Radiación Global Horizontal

En el siguiente gráfico (Figura 41) se presenta la Radiación Global Horizontal es alta durante prácticamente todo el año al presentar registros superiores a los 700.0 Wh/m² a excepción por el periodo de noviembre a febrero que presentan registros inferiores. Se presenta un rango de 110 a 990 Wh/m². Los meses de abril a julio presentan una mayor radiación solar, mientras que los meses con menor radiación solar son para diciembre y enero. Mientras que en la Figura 42 se presentan tres rosas de radiación, la primera gráfica (izquierda) en base a la radiación total, la segunda (al centro) en base a la radiación difusa y la última (derecha) corresponde a la radiación directa.

Figura 41.

Comportamiento mensual y horaria de la Radiación Global Horizontal

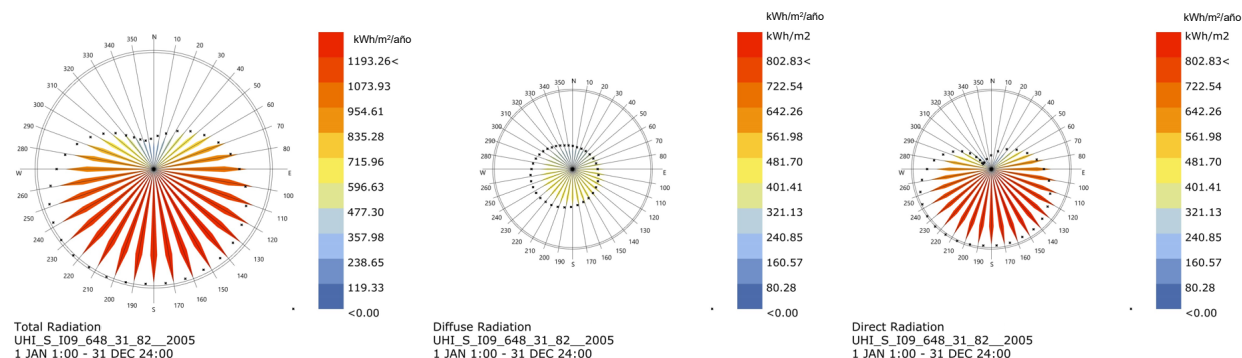


En resumen, se presentan mayores rangos de radiación provenientes del sureste al suroeste obteniendo una radiación por arriba de los 1 193.26 kWh/m²/año. Para la radiación difusa se observa que la gráfica se encuentra inclinada al suroeste con un rango de 481.70 – 561.98 kWh/m²/año, en cambio en la gráfica de radiación directa se

encuentra orientada del sureste al noreste obteniendo mayor rango al sur con una radiación superior a los 722.54 kWh/m²/año.

Figura 42.

Rosa de Radiación Solar Total, Difusa y Directa

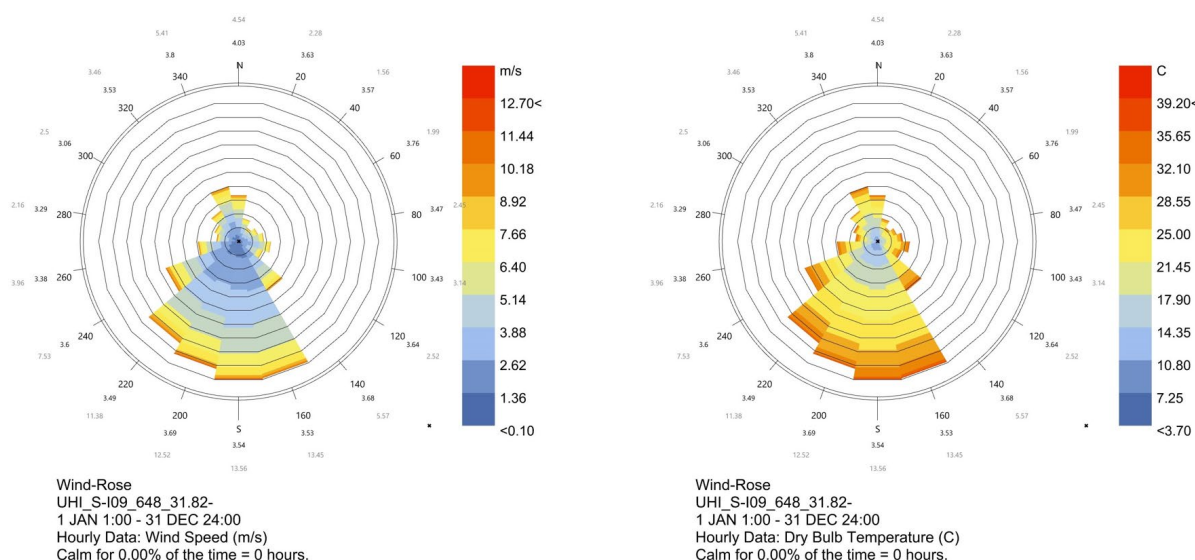


4.1.1.5. Régimen de Viento

En la Figura 43 se observan dos rosas de viento, el primer gráfico muestra la velocidad y dirección del viento, y el segundo la temperatura del viento. Cada cuña representa el porcentaje de tiempo que el viento proviene de cada una de las direcciones cardinales, los colores de cada cuña transmiten la velocidad y temperatura del viento. Se observan mayores rangos de velocidad y temperatura del viento provenientes del sureste al suroeste alcanzando una temperatura de hasta 35.65 °C.

Figura 43.

Gráfica de velocidad, dirección y temperatura del viento



4.1.2. Unidad de análisis

La unidad de análisis corresponde a un cañón urbano ubicado dentro del Fracc. Punta Banda I, en Ensenada, la selección se llevó a cabo en base a cuatro criterios: a) Orientación crítica; b) la relación de aspecto (H/W); c) los límites de altura según el uso de suelo y d) el largo de la calle (Figura 32).

En el sitio se identificaron dos tipos de orientación Este–Oeste con una desviación de 9.54° del eje principal y Norte–Sur con una desviación de 9.54° al Oeste. Según Abdollahzadeh & Biloría, (2021), las orientaciones que presentan mayor problemática se enlistan a continuación por orden: NW-SE (caso más crítico); W-E (caso crítico); N-S (mayor nivel de comodidad en términos de confort); NE-SW (caso óptimo).

El cañón urbano seleccionado se ubica en la calle Jorge Mazón entre Miguel Mendoza y la Av. Dr. Pedro Loyola, con coordenadas: Latitud: $31^\circ 49' 53''$ Longitud: $-116^\circ 36' 23''$ en el Fracc. Punta Banda I, Ensenada, B.C. Los criterios de selección se enlistan a continuación:

- a) Ubicación geográfica: se localiza dentro de la AGEB con mayor vulnerabilidad sociodemográfica conforme al gráfico de coordenadas paralelas (Figura 37).
- b) Orientación: la orientación E-W se ha considerado en algunos estudios la peor orientación y en otro como la segunda peor, debido a que experimenta radiación solar extrema y presentan el valor más alto de temperatura media radiante, por lo que sufren de condiciones térmicas más cálidas y mayor tiempo de prolongación de la temperatura media radiante (Manni et al., 2020).

Srivanit & Jareemit, (2020), explican que en este tipo de orientación se perciben las peores condiciones térmicas durante el día y recomiendan que en cañones urbanos profundos se apoyen del uso de la sombra mutua de los edificios y vegetación para mejorar el rendimiento térmico y evitar la radiación solar directa. Por otra parte Limona et al., (2019) señala que en comparación con los cañones urbanos orientados norte- sur, la orientación este – oeste, requiere de sombra en las horas más críticas de calor donde las temperaturas son elevadas.

- c) Geometría del cañón: la relación de aspecto (H/W) es el detalle geométrico más importante sobre un cañón urbano. Actualmente el cañón cuenta con una relación de aspecto de 0.54. Conforme con Vardoulakis et al., (2014), se clasifica como un cañón poco profundo debido a que presenta $HW < 1$. Según Ng & Cheng, (2012) y Abdollahzadeh & Biloría, (2021) el valor óptimo para la relación H/W de los cañones puede variar en función a la orientación de la calle, en este sentido, para calles orientadas al W-E se considera una relación $HW > 3$. Por otro lado, por su longitud se clasifica como un cañón largo al contar con una longitud de 200 m. La calle Jorge Mazón es la calle más larga del fraccionamiento.
- d) Límites de altura: conforme al Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Ensenada 2008-2030 los edificios pueden alcanzar una altura de hasta 35 m debido al uso de suelo habitacional (ver Tabla 11). Cabe mencionar que actualmente dentro del cañón se cuentan con viviendas unifamiliares y dos torres de condominios.

En la Figura 44 en el inciso (a) se observa una vista aérea de la AGEB 7979, en color amarillo se resalta el cañón urbano seleccionado, este también se muestra en el inciso (b), adema se remarca la orientación del cañón (9.53°). En el inciso (c) se presenta una vista en 3D del cañón urbano.

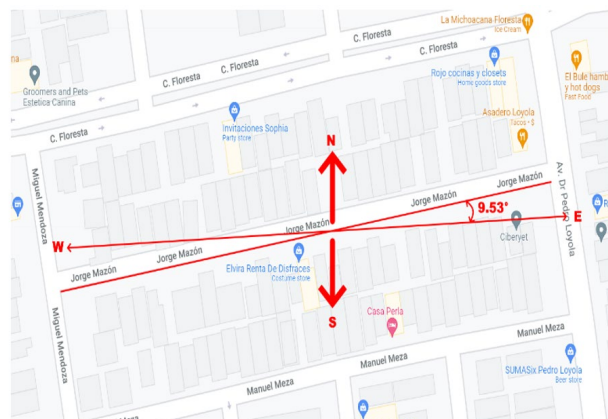
Figura 44.

Cañón urbano seleccionado con orientación W-E (Punta Banda I)

a) vista aérea de la AGEB 7979



b) vista aérea del cañón urbano seleccionado



c) vista aérea 3D del cañón urbano seleccionado



Nota. Elaborado a partir de Google Earth. Fecha de acceso 2021-11-15

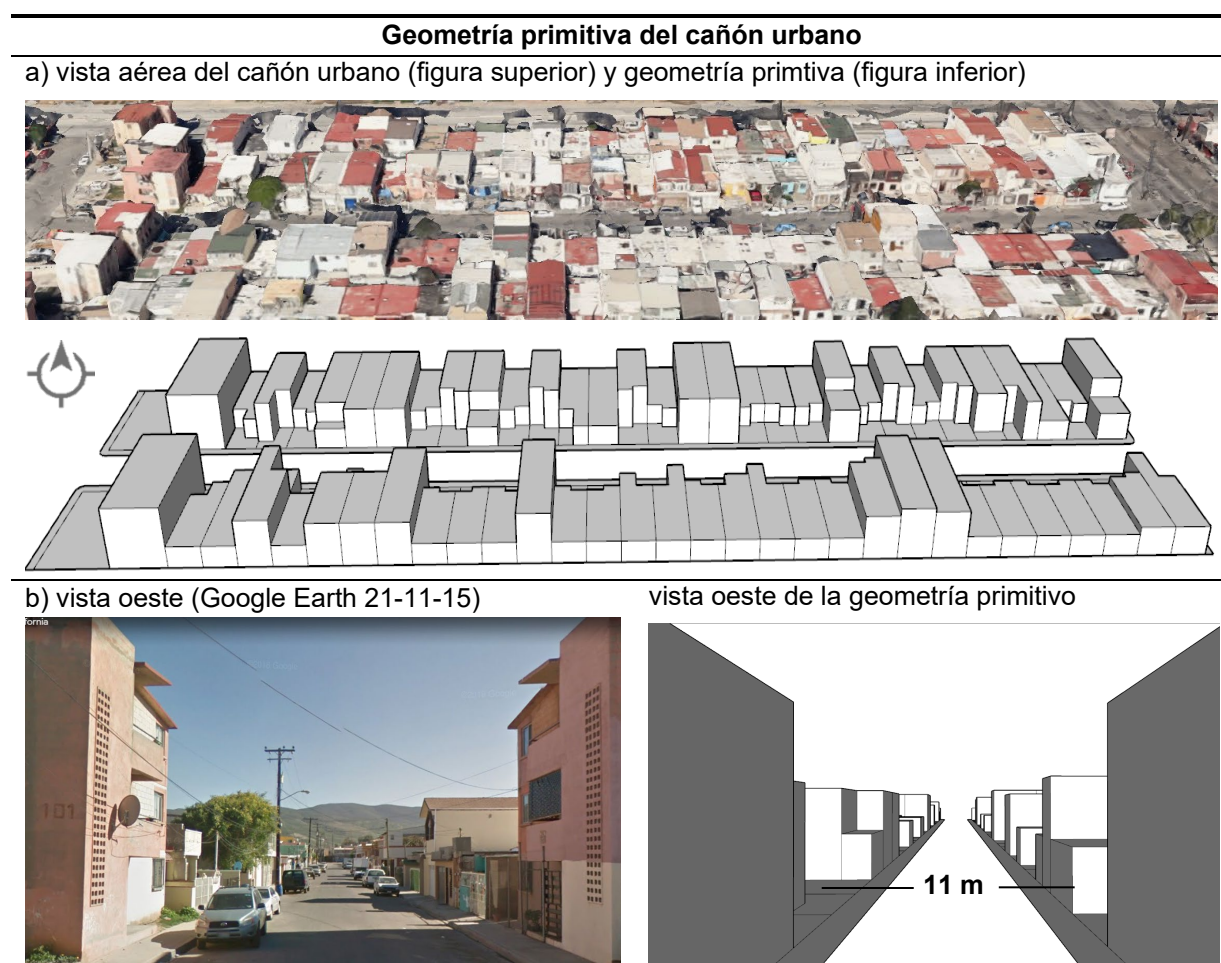
Por otro lado, la geometría primitiva hace referencia al empleo de figuras geométricas sencillas para representar la volumetría de un área determinada, para este caso hace referencia a la geometría del cañón urbano analizado. Para llevar a cabo el análisis del cañón urbano y la configuración de las simulaciones, fue necesario realizar el primitivo de la geometría del cañón.

La variación morfológica del cañón urbano y su respuesta a las diferentes condiciones ambientales y climáticas se aborda mediante la aplicación de un modelo evolutivo, el cual emplea la geometría primitiva del cañón urbano para la aplicación de las transformaciones. La intención es utilizar un proceso evolutivo de variación (a través de cruces y mutaciones), evaluación (análisis de los escenarios generados de acuerdo con qué tan bien se desempeñan en las condiciones de aptitud) y selección (se clasifican en función de la no dominancia) para la generación de una población de escenarios a través de múltiples generaciones que difieren en morfología.

En la Figura 45 se observan diferentes vistas del primitivo del cañón urbano desarrollado y una comparación con respecto a imágenes obtenidas por Google Earth (21-11-15), en el inciso (a) la figura superior se muestra una vista aérea del cañón urbano de estudio, mientras que la figura inferior ilustra la misma vista pero de la geometría primitiva llevada a cabo; el inciso (b) a la izquierda se ilustra la vista oeste del cañón urbano que corresponde a la ubicación de las dos torres de condominios, al lado derecho se observa la misma vista pero del primitivo; en cambio la figura (c) izquierda presenta la vista este del cañón urbano y la derecha el primitivo de dicha vista, por último en el inciso (d) en la figura izquierda se observa la vista aérea del lado oeste del cañón y en la derecha el primitivo de esa vista.

Figura 45.

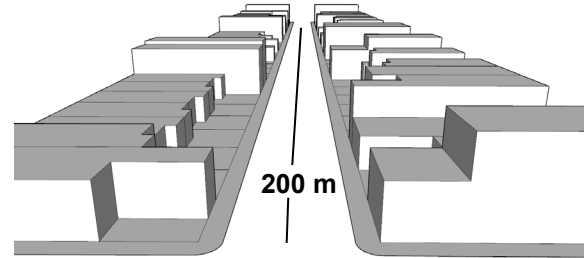
Geometría primitiva del cañón urbano



c) vista este (Google Earth 21-11-15)



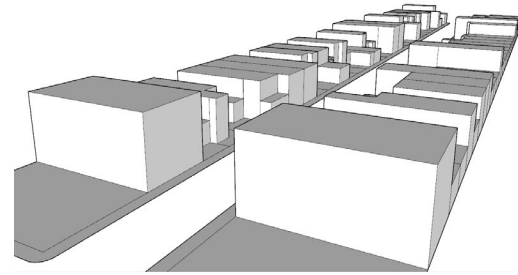
vista este de la geometría primitiva



d) vista aérea oeste (21-11-15)



Vista aérea oeste de la geometría primitiva



Nota. Elaborado a partir de Google Earth. Fecha de acceso 2021-11-15

4.1.3. Recolección de datos en campo

En seguida se presentan los datos obtenidos de las mediciones en campo, los cuales consistieron en la toma de fotografías hemisféricas que permitieron calcular la visibilidad del cielo o SVF y la toma de fotografías térmicas del cañón urbano, estas mediciones fueron empleadas como un método de referencia e ilustrativo para describir el estado actual del cañón urbano y la importancia de la sombra sobre la temperatura de los materiales (calle, aceras y muros). El SVF se empleó para analizar el impacto de las edificaciones respecto a la obstrucción del cielo, el porcentaje de sombras y la temperatura superficial.

4.1.3.1. Mediciones In Situ SVF

La toma de fotografías hemisféricas se realizó el 21 de marzo de 2022 (Solsticio de primavera) a mediodía solar (12 h 54 hora civil). El ángulo de visión de la cámara se establece en 90° y la altura se estableció en 1.10 m respecto al suelo, conforme lo dicta la norma ISO 7726 (Middel et al., 2017), en la Figura 46 se aprecia el montaje de la cámara en el tripie. Para la toma de fotografías la cámara fue orientada al Norte. El SVF se calculó con apoyo de *Rayman* una herramienta desarrollada por Albert Ludwig,

que permite calcular y simular flujos de radiación de onda corta y larga en distintos entornos, y también es empleado para estimar el SVF (Matzarakis et al., 2007, 2010).

El SVF se concentra en calcular la exposición de una superficie al cielo visible desestimando, para efectos de esta tesis componentes de bioclimatología urbana. Para la utilidad buscada el cálculo de SVF es indistintivo, pero la fecha seleccionada presentaba condiciones climáticas oportunas para el desarrollo de actividades en campo, asimismo se empleó como un método referencial que permitió estudiar la correlación entre el porcentaje de obstrucción de cielo y la temperatura superficial dentro del cañón urbano. Un SVF alto indica mayor fracción del cielo visible, por ende, mayor radiación en la superficie del cañón y mayor facilidad de escape de la energía por las noches, mientras que un SVF bajo representa menor fracción del cielo visible, lo que contribuye a la disminución de la radiación que entra a la superficie del cañón e incremento de la temperatura superficial por las noches.

En este sentido se decidió realizar la toma de fotografías en tres ubicaciones: a) en la esquina oeste debido que presenta un cambio en la tipología de edificio (torre condominal) respecto al resto de las edificaciones que conforman al cañón urbano (vivienda unifamiliar); b) al centro del cañón, en diversos estudios la caracterización del SVF se lleva a cabo en medio del cañón y c) en la esquina este que a diferencia de la esquina oeste se caracteriza por presentar viviendas unifamiliares. En la Figura 47 se puede observar la ubicación exacta y en la Tabla 18 se presentan los descriptivos generales de SVF del cañón urbano de análisis.

Figura 46.

Montaje de la cámara en el tripie



Figura 47.

Ubicación de la toma de fotografías hemisféricas



Tabla 18.

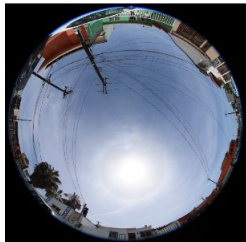
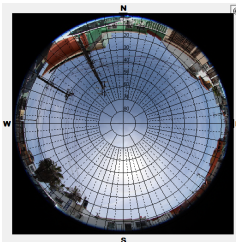
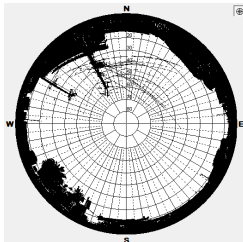
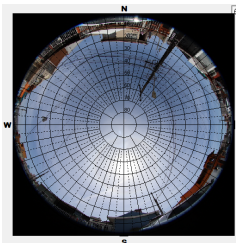
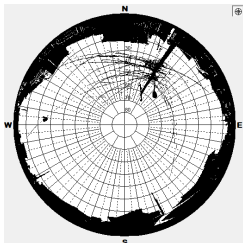
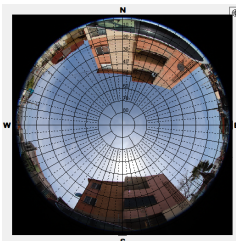
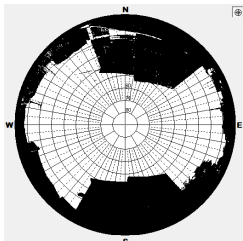
Descriptivos generales de SVF del cañón urbano de análisis

Descriptivos generales de SVF del cañón urbano de análisis		
Fecha y Tiempo	Ubicación geográfica	Cañón urbano
Fecha: 21/03/2022	Latitud: 31° 49'	Orientación: E-W
Mediodía solar	Longitud: 116° 36'	H/W: 0.54 = H/W <1
Hora civil: 12 h 54		
Altura solar: 59 °	Altitud: 13 msnm	Largo del cañón: 200 m
Cielo: Despejado	Temperatura: 20 °C	Ancho de la calle: 11 m

Para llevar a cabo el cálculo de SVF, fue necesario preparar primero las fotografías previamente tomadas con la cámara, debido a que la herramienta requiere que las fotografías sean cuadradas y se encuentren guardadas en un formato *bitmaps* (.bmp), se recurrió de un editor gráfico (*Adobe Illustrator*) para el procesamiento de las fotografías. Posteriormente fueron ingresadas a la herramienta *Rayman*, dentro de este fueron editadas nuevamente, se retiró el fondo azul del cielo y los colores fueron cambiados a monocromático, una vez que estuvieron listas se llevó a cabo la estimación del SVF. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 19, como se puede apreciar la esquina oeste caracterizada por la presencia de las dos torres de

condominios presenta un SVF menor (0.58) respecto al resto del cañón, los cuales se encuentran en un rango de 0.72 - 0.74, lo que resulta en una mayor obstrucción de la radiación solar y mayor porcentaje de sombras (esto se aprecia en la Figura 48-49).

Tabla 19.
Fotografías hemisféricas y cálculo de SVF

Calculó del factor de cielo visible o Sky View Factor				
Ubicación	Fotografías hemisféricas del estado actual			SVF
Esquina de la calle (E-W)				0.72
Centro de la calle				0.74
Esquina de la calle (W-E)				0.58
SVF 0 - 1	= 1 cielo visible = 0 cielo obstruido		< SVF = > H/W > SVF = < H/W	

Nota. Elaborado a partir de “Modelling radiation fluxes in simple and complex environments- application of the RayMan model” por Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. 2007. International Journal of Biometeorology 51(4),323-334. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0061-8>

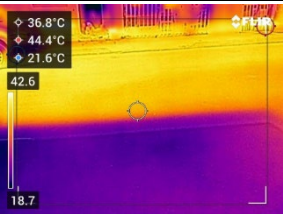
4.1.3.2. Fotografías térmicas

La toma de fotografías térmicas se realizó de 13 h 00 a 14 h 00 el 21 de marzo de 2021 (Solsticio de primavera) se registró una temperatura atmosférica de 20 °C y una temperatura reflejada de 22 °C. Las fotografías se realizaron por medio de una cámara

termográfica marca Flir modelo C5. La distancia para obtener las imágenes térmicas fue de 1 m, y las imágenes se calibraban automáticamente con la distancia. Estas fueron realizadas en la calle, aceras y muros de algunas edificaciones (fachadas), los datos obtenidos se muestran en la Tabla 20. El objetivo fue dar a conocer la importancia de la sombra sobre la temperatura de los materiales. Por lo que se realizó una tabla comparativa (Tabla 21) que muestra la temperatura mínima que alcanzan las superficies sombreadas a diferencia de las superficies soleadas.

La temperatura superficial más alta se observó principalmente en la calle, por contrario, la temperatura más baja se midió en algunas fachadas de las edificaciones y en aceras sombreadas. La razón de la menor temperatura de la superficie de la fachada del edificio se debe al material de la fachada. La temperatura más baja alcanzada fue de 12.7 °C y esta se midió en una acera con sombra, mientras que la temperatura más alta fue de 46.1 °C y 43 °C las cuales corresponde a la acera y calle respectivamente y sin presencia de sombra (Tabla 21). En la Tabla 22 se presentan los descriptivos generales de la toma de fotografías térmicas dentro del cañón urbano de análisis.

Tabla 20.
Fotografías térmicas del cañón analizado

Fotografías térmicas del cañón analizado			
Foto	Foto térmica	Foto	Foto térmica
			
Calle y aceras	Max: 38.0 °C Min: 14.3 °C	Calle y aceras	Max: 38.3 °C Min: 15.7°C
			
Calle y aceras	Max: 36.3 °C Min: 14.1 °C	Calle y aceras	Max: 39.0 °C Min: 21.6 °C

			
Calle y aceras	Max: 39.4 °C Min: 13.8 °C	Calle y aceras	Max: 39.3 °C Min: 17.5 °C

Tabla 21.
Fotografías térmicas del cañón urbano analizado

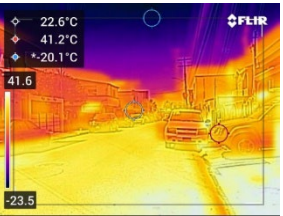
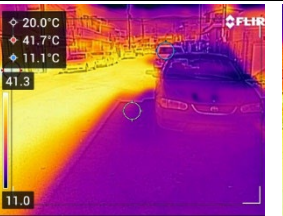
Fotografías térmicas del cañón analizado			
Área sombreada	Área de luz	Área sombreada	Área de luz
			
Min: 12.7 °C	Max: 40.3 °C	Min: 14.3 °C	Max: 46.1 °C
			
Min: 17.5 °C	Max: 40.0 °C	Min: 17.5 °C	Max: 43.0 °C

Tabla 22.
Descriptivos generales de fotografías térmicas del cañón urbano de análisis

Descriptivos generales de fotografías térmicas del cañón urbano de análisis			
Fecha	Ubicación geográfica	Parámetros	Cañón urbano
Fecha: 21/03/2022	Latitud: 31°49'	Emisividad: 0.95	Orientación: E-W
Hora: 13 h 00–14 h 00	Longitud: 116°36°	Temp. Refl: 22 °C	H/W: 0.54 = H/W <1
Altura solar: 59 °	Altitud: 13 msnm	Temp. atmosférica: 20 °C	Largo: 200 m
Cielo: Despejado		H. Relativa: 50 %	Ancho calle: 11 m
		Distancia: 1 m	

4.2. Simulación

Los escenarios de simulación se llevaron a cabo dentro de la interfaz gráfica de diseño computacional asistido por algoritmos y el visualizador 3D denominados *Grasshopper®* y *Rhinoceros®*, por medio de un componente de evaluación ambiental, que permite el cálculo de interacciones complejas del entorno construido y el clima local. Las simulaciones fueron realizadas para el día cálido extremo que corresponde al día 29 de agosto, se llevaron a cabo análisis de radiación solar acumulada; iluminación solar directa acumulada; análisis de proyección de sombra de la morfología para la hora cálida crítica del día cálido extremo que corresponde a las 15:00 h; análisis de factor de cielo visible y análisis del microclima urbano a través del índice Universal de Confort Térmico (UTCI, a través del UTCI se realizaron análisis por categoría del estrés térmico, del estado térmico de un sujeto dentro del cañón urbano y de las condiciones de UTCI. En la Tabla 23 se describen los componentes empleados para la realización de las simulaciones.

Tabla 23.

Descripción de los componentes de Ladybug® empleados

Algoritmo (componente)	Descripción
Análisis de radiación	Permite calcular la radiación total que incide sobre una superficie o geometría en específico. El componente emplea una matriz de cielo del componente selectSkyMxt. y la dirección del norte de la superficie o geometría analizada. Este componente es útil para llevar a cabo estudios de radiación en espacios al aire libre, donde la radiación juega un papel importante en el confort térmico.
Análisis de iluminación solar directa	Este componente calcula el número de horas de luz solar directa que recibe una geometría o superficie de entrada utilizando vectores solares del componente sunPath. También se emplea para estudios de sombra en ambientes exteriores.
Índice universal de confort térmico (UTCI)	Es un modelo de confort térmico estrictamente para exteriores. Es un estándar internacional para la sensación de temperatura exterior y es la más común de las métricas de temperatura utilizadas por los meteorólogos. El UTCI asume que los sujetos caminan y que adaptan su ropa de forma natural a la temperatura exterior. Se calcula por medio de un componente de evaluación ambiental que integra un modelo de cálculo solar basado en el conocido “<i>SolarCal</i>” de Edward Arens (2015) para evaluar el efecto de la radiación solar en el confort exterior. Parámetros de entrada requeridos para calcular la sensación térmica:

	• Temperatura del aire o temperatura de bulbo seco • Temperatura media radiante (MRT) • Humedad relativa • Velocidad del viento Parámetros de entrada requeridos para calcular la MRT: • Localización (altitud y azimut del sol) • Temperatura de bulbo seco • Radiación normal directa por hora Wh/m² • Radiación horizontal difusa por hora en Wh/m² • Intensidad de la radiación infrarroja horizontal en Wh/m² • Fracción del cuerpo expuesta a la luz solar directa (relación humano-cielo) • Bóveda del cielo Parámetros de salida del componente UTCI • UTCI: índice universal de confort térmico en °C • Confort: indica si existe estrés térmico (0 estrés térmico; 1 sin estrés térmico) • Condición: indica el estado térmico de un sujeto (-1 frío; 0 neutro; +1 caliente) • Categoría: indica la categoría en la que caen las condiciones de UTCI, bajo una escala de 11 puntos: *-5= estrés por frío extremo (UTCI < - 40) *-4= estrés por frío muy fuerte (-40 <= UTCI < - 27) *-3= fuerte estrés por frío (- 27 <= UTCI < - 13) *-2= estrés moderado por frío (- 12 <= UTCI < 0) *-1= ligero estrés por frío (0 <= UTCI < 9) *0= sin estrés térmico (9 <= UTCI < 26) *+1= ligero estrés por calor (26 <= UTCI < 28) *+2= estrés por calor moderado (28 <= UTCI < 32) *+3= fuerte estrés por calor (32 <= UTCI < 38) *+4= estrés por calor muy fuerte (38 <= UTCI < 46) *+5= estrés por calor extremo (46 < UTCI)
Porcentaje de visibilidad (SVF)	Este componente se emplea para evaluar la visibilidad de la geometría de entrada desde un conjunto de puntos de visualización. También es empleado para evaluar el porcentaje de cielo que es visible desde la superficie para estudios de <i>Sky View Factor</i>

Nota: Todos los componentes funcionan con un archivo. EPW. Obtenido de “*Ladybug Primer*”. Por Campana, (2019) y Roudsari, (2021). <https://docs.ladybug.tools/ladybug-primer/>

Las simulaciones se realizaron para el escenario base y el escenario de optimización morfológica. Para la selección del caso óptimo se llevaron a cabo simulaciones de optimización multiobjetivo, las cuales se ejecutaron en un motor evolutivo y analítico Wallacei® de Mohammed Makki y Milad Showkatbakhsh. La

plataforma opera por medio del Algoritmo Multiobjetivo de Clasificación no Dominado II el NSGA-II.

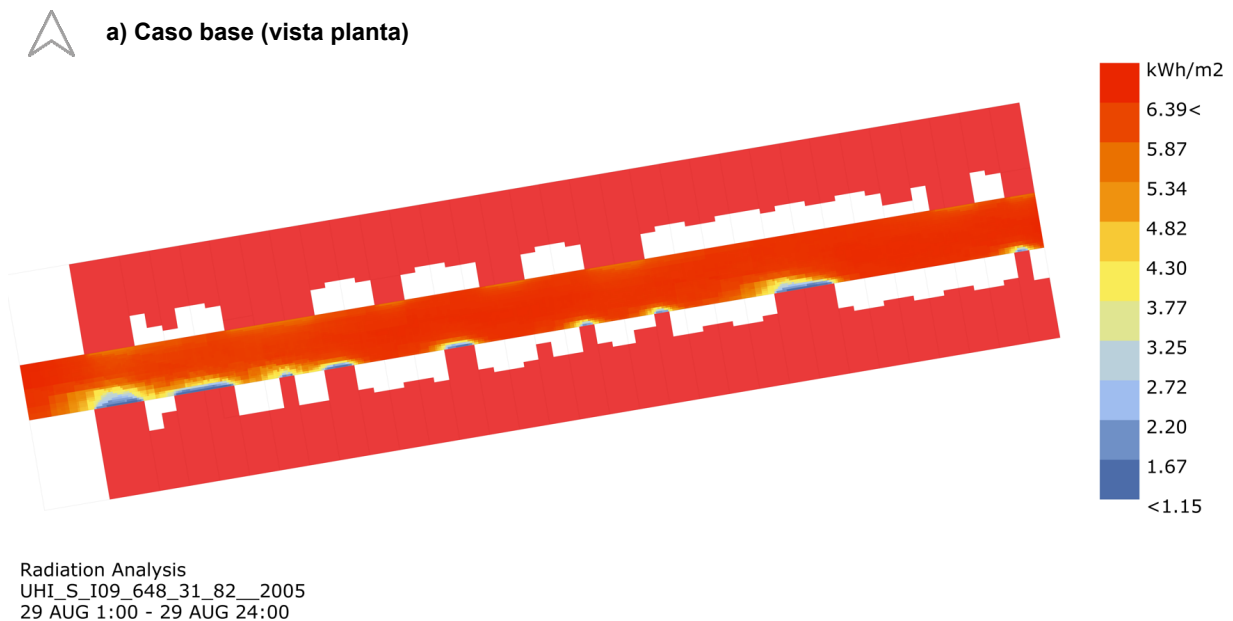
4.2.1. Escenario caso base

Para evaluar cómo las variaciones morfológicas del cañón urbano influyen en el ambiente térmico se realizaron un conjunto de simulaciones microclimáticas para el escenario previo y posterior a la optimización multiobjetivo. El escenario del caso base sirvió como apoyo para el diagnóstico de la situación actual. Los resultados obtenidos del análisis climático se muestran a continuación:

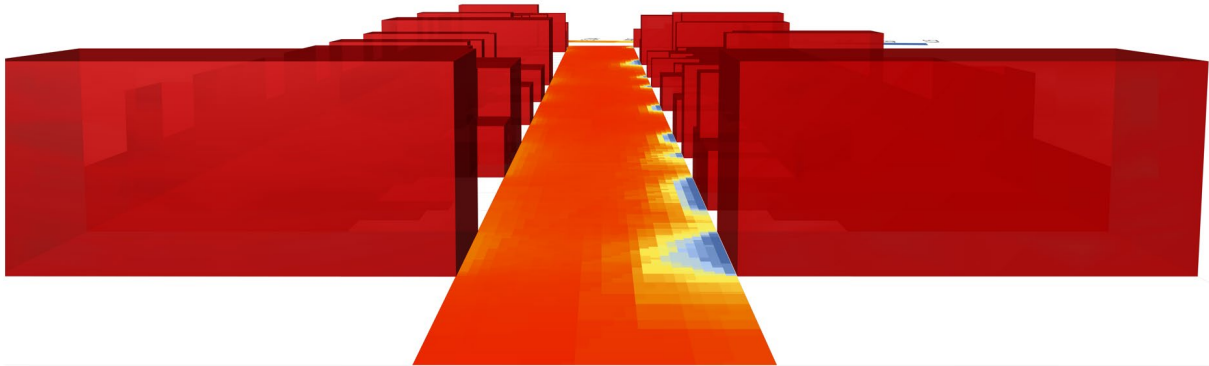
En la Figura 48 (a) se observa el análisis de radiación solar acumulada para el día cálido extremo (29 de agosto) expresada en kWh/m², se aprecia que el centro de la calle o vialidad del cañón es la que presenta los valores máximos de radiación que corresponde a 6.39 kWh/m², mientras que la mínima fue de 1.15 kWh/m² y esta se presentó en la acera orientada al sur. La mayor parte del cañón urbano presenta una radiación de 6.39 kWh/m². En el inciso (b) se muestra la vista lateral (oeste) del cañón.

Figura 48.

Análisis de radiación solar acumulada para el día cálido extremo (kWh/m²), vista en planta y lateral



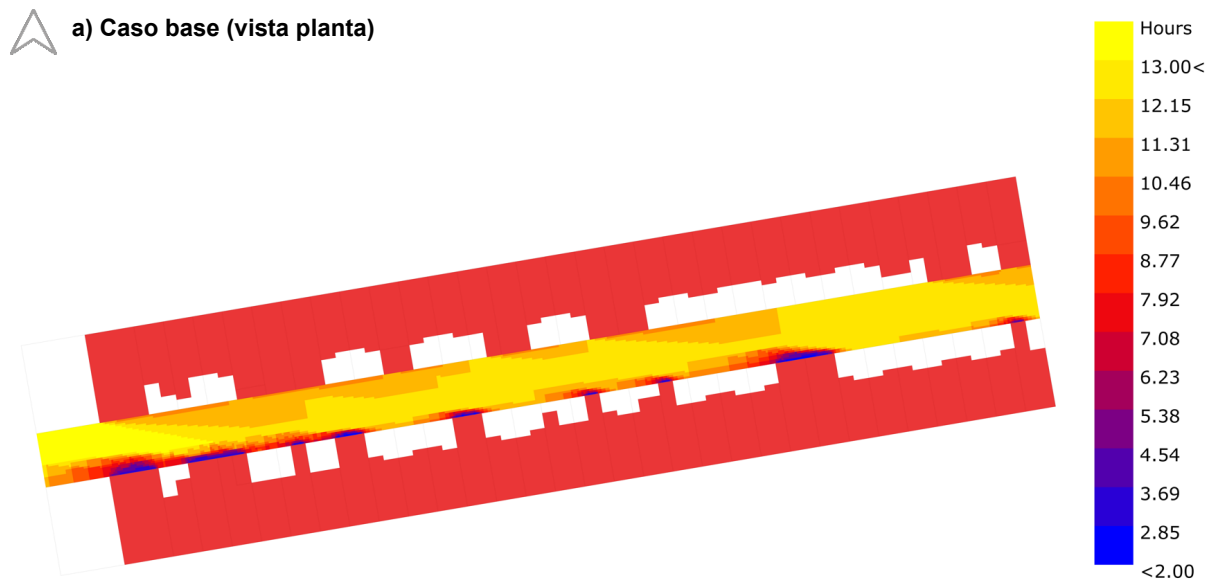
b) Caso base (vista lateral oeste)



La Figura 49 muestra el análisis de iluminación solar directa acumulada para el día cálido extremo, se registró un total de 13 h 00 de luz disponibles y un mínimo de 2 h 00 que corresponde a la acera con orientación al sur debido a la proyección de sombra de las edificaciones. Se aprecia que la mayor parte del día el cañón urbano presenta arriba de 11 h 00 de luz solar directa. En el inciso (b) se muestra la vista lateral (oeste) del cañón.

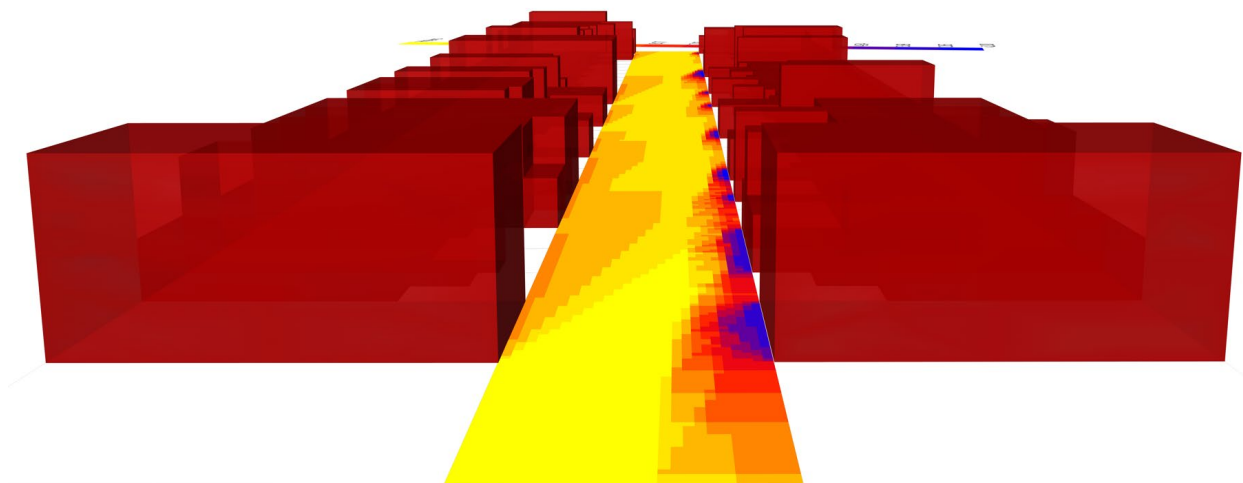
Figura 49.

Análisis de iluminación solar directa acumulada para el día cálido extremo (horas de luz), vista en planta y lateral



SunlightHours Analysis

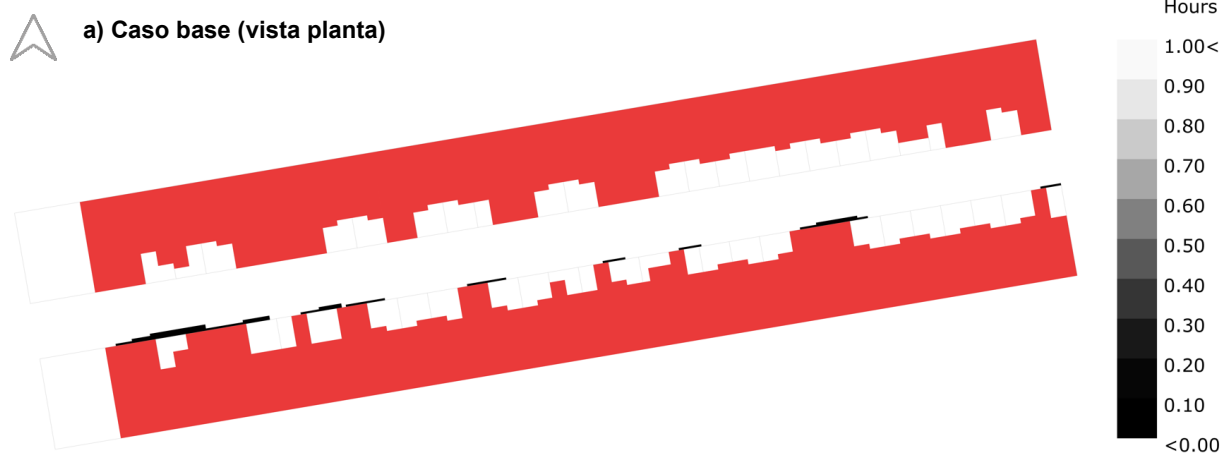
b) Caso base (vista lateral oeste)



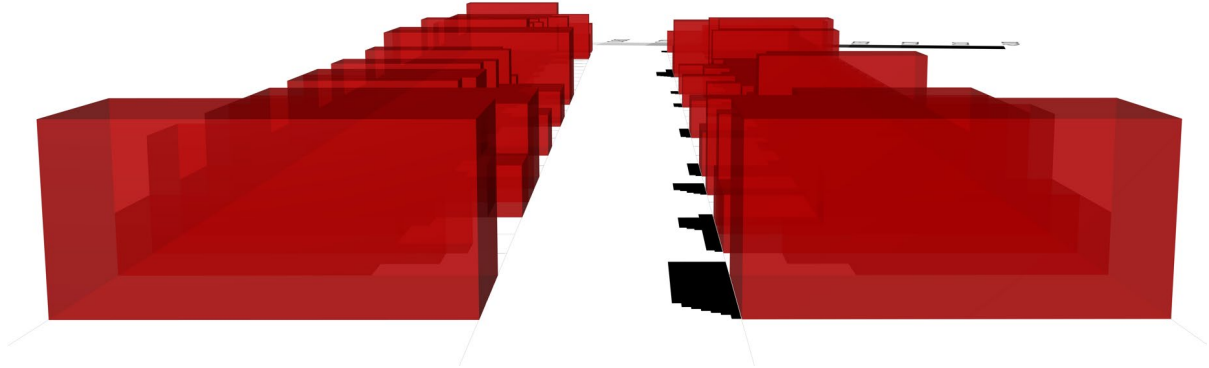
El análisis de proyección de sombras de la morfología se calculó para la hora cálida crítica que corresponde a las 15 h 00 del día cálido extremo, es decir el 29 de agosto. Los resultados se observan en la Figura 50, como se observa en la figura solo la acera lateral derecha presenta un porcentaje mínimo de sombras, debido a una relación de aspecto $H/W < 1$. En el inciso (b) se muestra la vista lateral (oeste) del cañón.

Figura 50.

Análisis de proyección de sombras de la morfología para la hora cálida crítica del día cálido extremo (horas de sombra), vista en planta y lateral



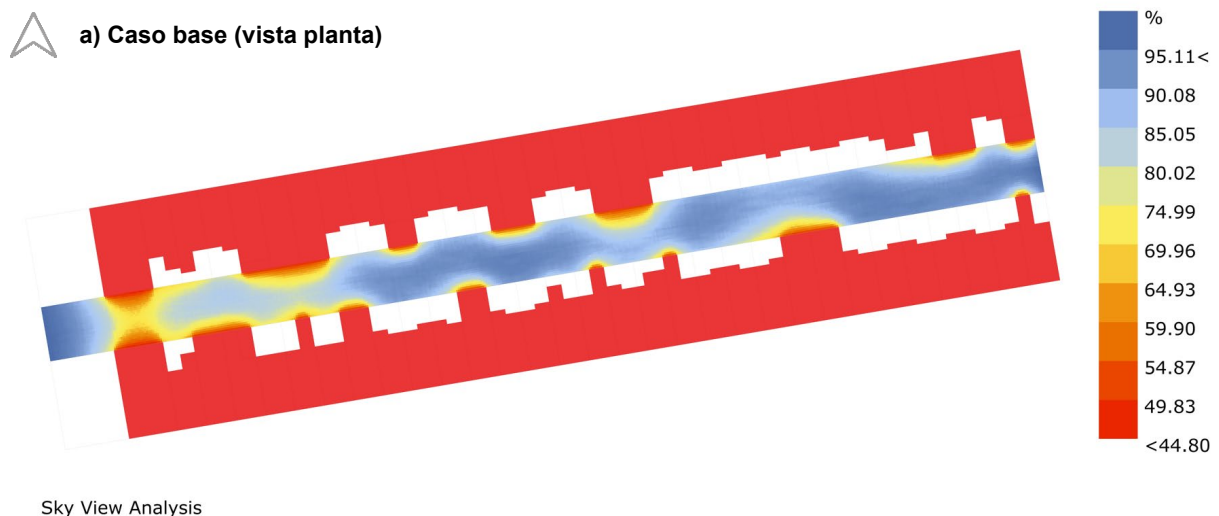
b) Caso base (vista lateral oeste)



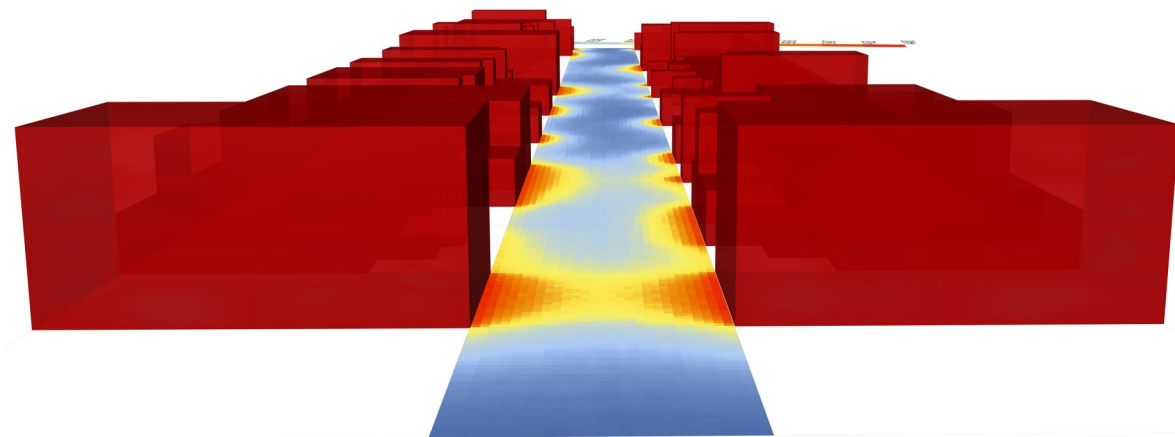
El factor de cielo visible (SVF) fue empleado para evaluar el porcentaje de cielo que es visible desde la superficie, el 100 % indica que el cielo es completamente visible, este factor se ve afectado por las obstrucciones del contexto circundante, es decir edificios y árboles. El SVF permite estimar la cantidad de radiación directa que recibe el suelo. Como se puede apreciar en la Figura 51 el SVF estimado dentro del cañón urbano se ubica en un rango de 60 a 95 % de visibilidad. La esquina con C. Miguel Mendoza es la que presenta un menor porcentaje de visibilidad inferior al 60 % debido a las dos torres de condominios que se ubican en esta esquina, por lo que también presenta menor radiación solar y mayor porcentaje de sombras en comparación al resto del cañón urbano. En el inciso (b) se muestra la vista lateral (oeste) del cañón.

Figura 51.

Análisis de factor de cielo visible (% de visibilidad), vista en planta y lateral



b) Caso base (vista lateral oeste)

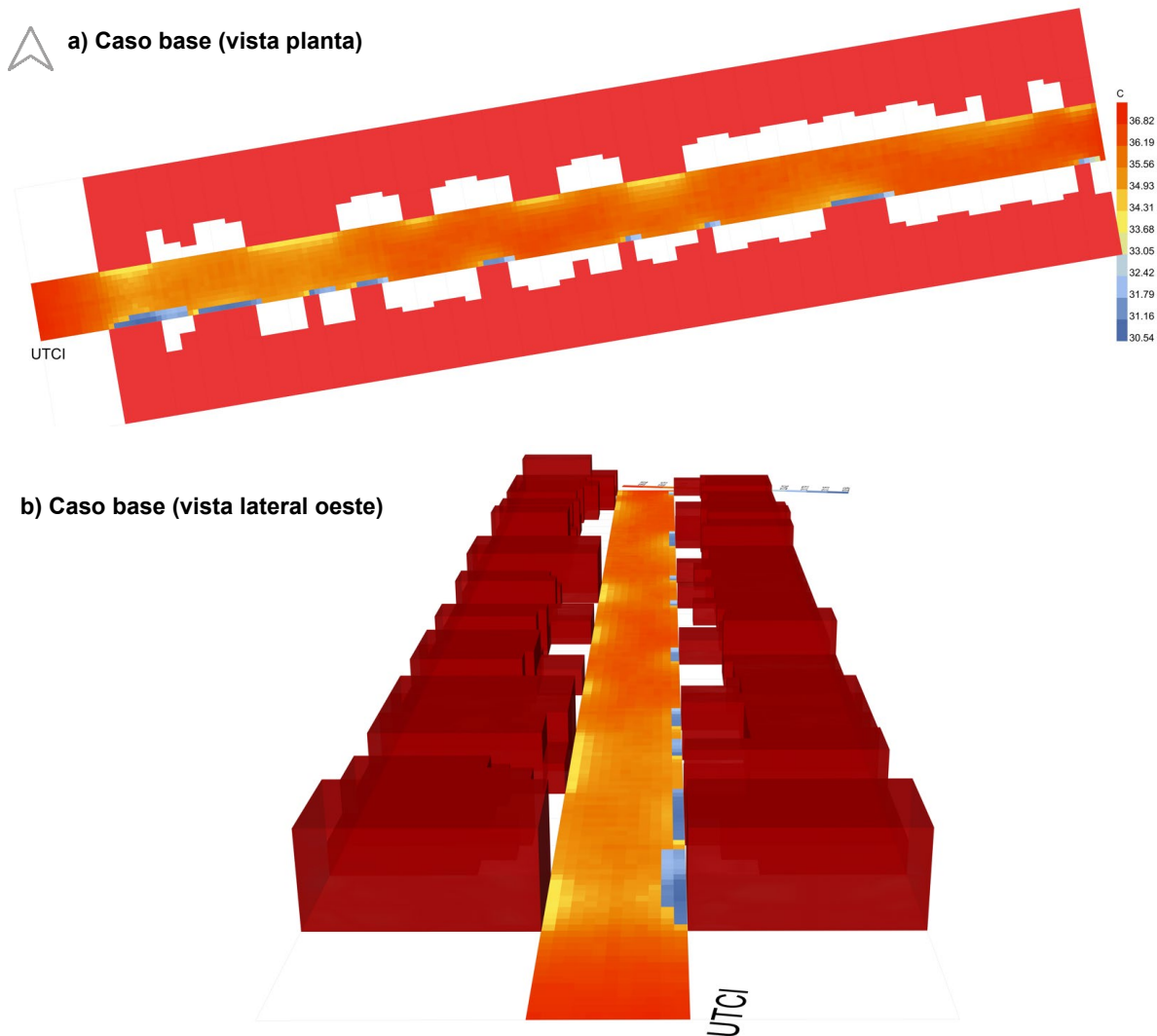


Se realizaron estudios de microclima urbano a través del Índice UTCI para la hora cálida del día cálido extremo, es decir, las 15 h 00 del 29 de agosto. El UTCI es un modelo de confort térmico estrictamente para exteriores y representa un estándar internacional para la sensación de temperatura exterior ($^{\circ}\text{C}$). Este se calcula a través de un modelo de cálculo solar basado en el conocido “*SolarCal*” de Edward Arens (2015) que evalúa el efecto de la radiación solar en el confort exterior. Lo que lo hace tan complejo es que incorpora múltiples condiciones climáticas (temperatura de bulbo seco, temperatura media radiante, humedad relativa y velocidad del viento) (Predictia, 2021).

En la Figura 52 se ilustra el análisis del microclima urbano, en general la distribución de temperaturas está entre 30.54°C y 36.82°C , se aprecia que la temperatura mínima alcanzada corresponde a la acera con orientación al sur debido a la proyección de sombra de las edificaciones, mientras que la mayor parte de cañón urbano presenta una temperatura superior a los 35°C . En el inciso (b) se presenta la vista lateral oeste del cañón.

Figura 52.

Análisis del microclima urbano a través del índice Universal de Confort Térmico para la hora cálida del día cálido extremo (°C), vista en planta y lateral



A través del UTCI se realizaron análisis por categoría de estrés térmico, el estado térmico de un sujeto dentro del cañón urbano y las condiciones de UTCI. La Figura 53 muestra que el ambiente térmico dentro del cañón urbano presenta estrés por calor, por consiguiente, la categoría del estado térmico de un sujeto corresponde a +1: caliente (Figura 54). La categoría de las condiciones de UTCI se localizan dentro de una escala de +2= estrés por calor moderado ($28 \leq \text{UTCI} < 32$), mientras que la mayor parte del cañón se ubica en la escala +3= fuerte estrés por calor ($32 \leq \text{UTCI} < 38$), debido principalmente a la orientación del cañón urbano y la baja relación de aspecto $H/W < 1$ (Figura 55).

Figura 53.

Análisis por categoría de estrés térmico para la hora cálida del día cálido extremo a través del UTCI (adimensional)

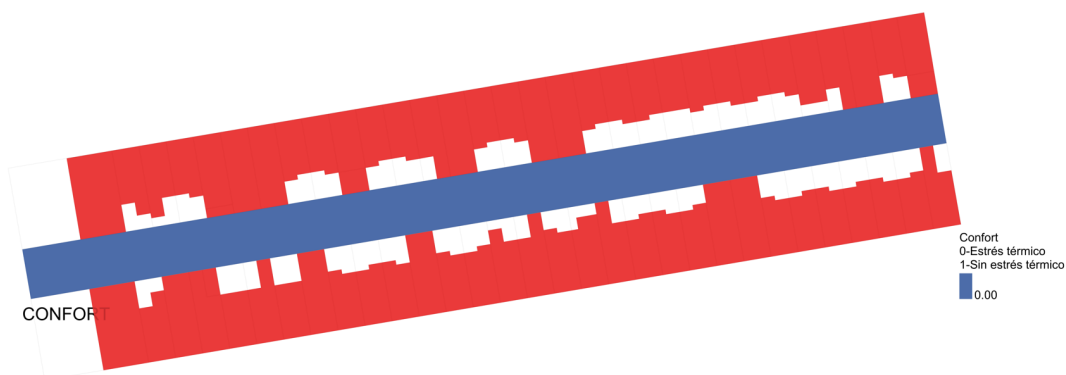


Figura 54.

Análisis por categoría del estado térmico de un sujeto dentro del cañón urbano para la hora cálida del día cálido extremo a través del UTCI (adimensional)

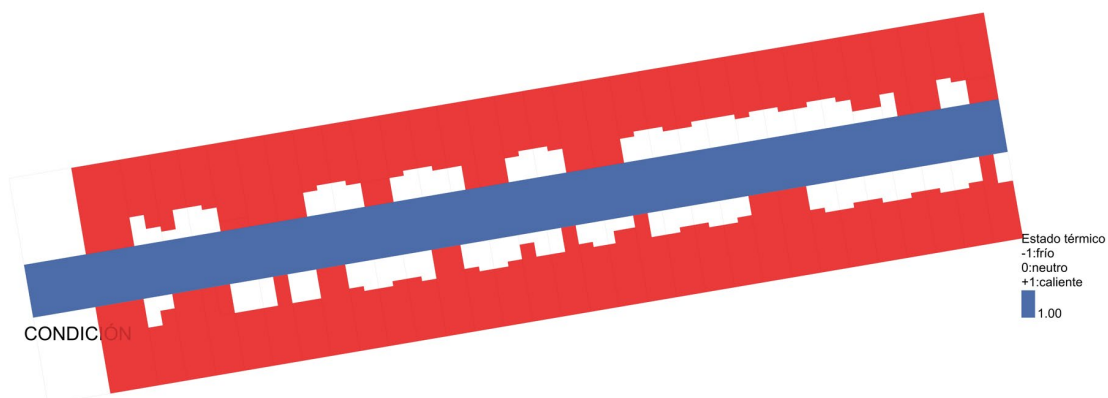
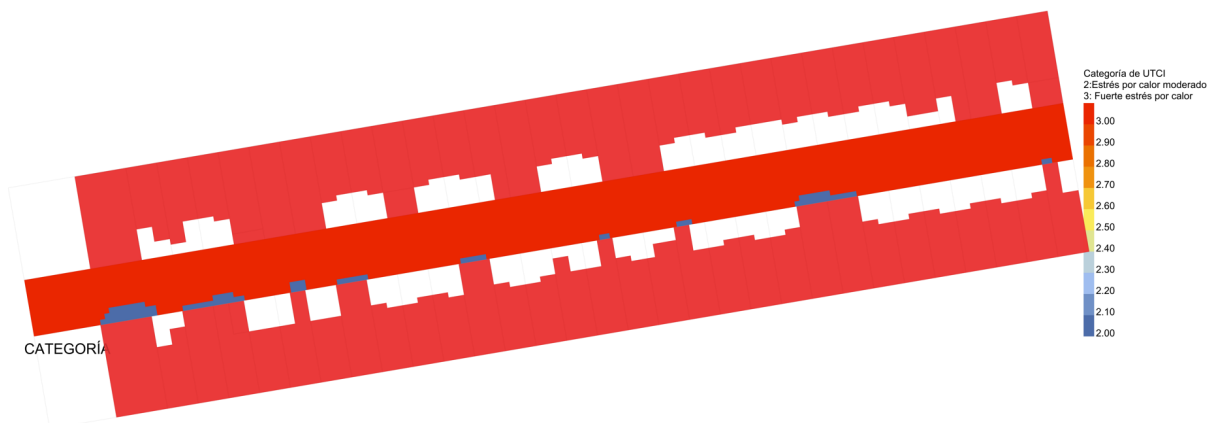


Figura 55.

Análisis por categoría de las condiciones de UTCI para la hora cálida del día cálido extremo (adimensional)



4.2.2. Optimización multiobjetivo

A diferencia de otros experimentos de diseño de un solo objetivo, el motor evolutivo multiobjetivo tiende a producir una variedad de geometrías significativas en función a los objetivos de aptitud establecidos. Debido a la naturaleza multiobjetivo de la herramienta los objetivos se evalúan de manera simultánea, pero de forma independiente para cada individuo de la población, de tal forma que las soluciones óptimas dentro del Frente de Pareto que logran un alto valor de aptitud con respecto a un criterio también pueden resultar ser significativamente bajas en otros criterios, lo que resulta en múltiples soluciones óptimas en su población final.

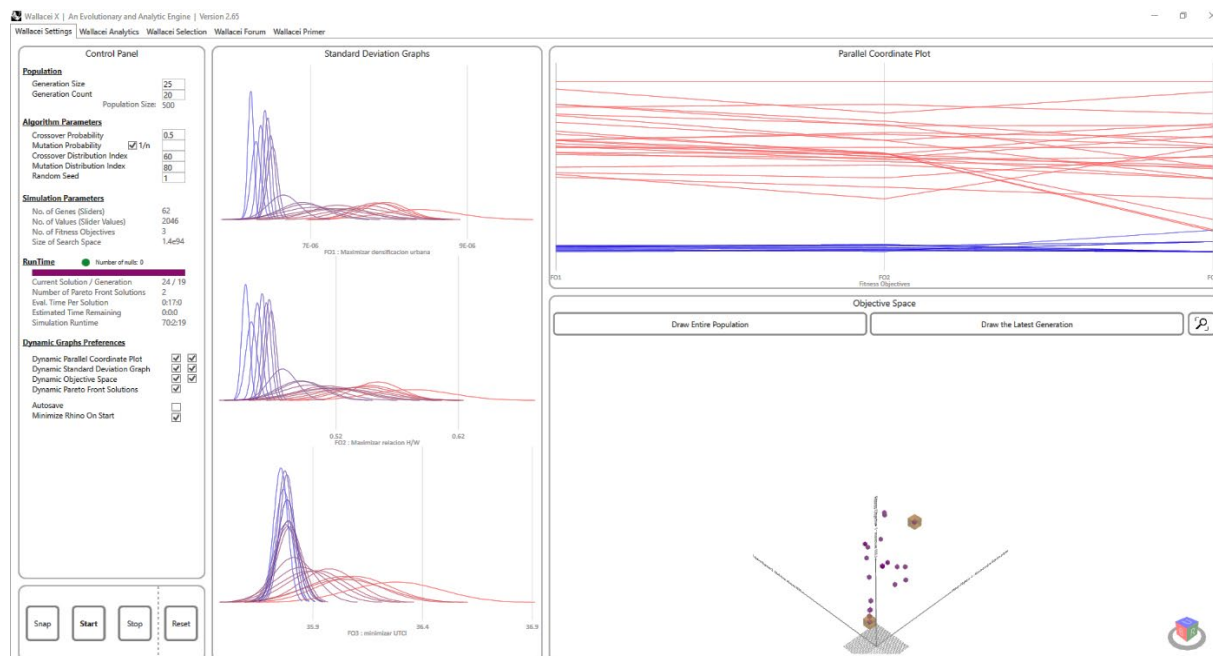
Los objetivos definidos para esta investigación fueron: a) maximizar la densificación urbana dentro de cañón; b) maximizar la relación de aspecto del cañón; y c) minimizar el microclima urbana a través del UTCI, el tamaño de la población fue limitado a 20 generaciones con 25 individuos cada una, límite impuesto por la carga computacional y el tiempo requerido para realizar el experimento. Se implementó un valor de elitismo del 50 % que garantiza que la mitad de la población se reproduzca a partir de las soluciones más óptimas, mientras que la otra mitad se reproducirá aleatoriamente a partir de las soluciones candidatas restantes. Por último, una alta tasa de mutación junto con una baja probabilidad de mutación y una tasa de cruce moderada, garantiza que se aplique una variación adecuada a los individuos de la población.

Como se ilustra en la Figura 56 la simulación tuvo una duración de 70 horas, es decir 8.4 minutos por solución aproximadamente, mientras que el espacio de búsqueda para cada solución corresponde a 1.4×10^{94} lo que representa el número de soluciones posibles en función al número de genes y parámetros. Dentro de la población total se encontraron dos soluciones de Frente de Pareto. Cabe resaltar que la herramienta inicia el conteo de las generaciones e individuos a partir del número "0".

El resultado de la ejecución del algoritmo produjo 500 fenotipos con tres valores de aptitud por solución, con un total de 1 500 valores. En la Figura 57 se presenta un render vista en planta de la última generación (núm. 19) que contiene 25 individuos y en el Apéndice 5 se observan una vista isométrica de la misma generación.

Figura 56.

Configuración del interfaz (Wallacei Settings)



Nota. Imágenes extraídas de Wallacei X®

Analizar visualmente las morfologías resultantes llevaría bastante tiempo, además de que resulta ineficiente, por lo tanto, el análisis estadístico de las soluciones generadas se realizó a través de *Wallacei Analytics®* (complemento de *Grasshopper®*) permite analizar los valores de aptitud generados por la simulación evolutiva y presenta de manera gráfica el análisis comparativo de los valores de aptitud de todas las soluciones dentro de la población, de acuerdo con 4 métodos analíticos primarios (desviación estándar; valores de aptitud; línea de tendencia de los valores de desviación estándar y línea de tendencia del valor medio). Se analizó de manera general el comportamiento de las 500 soluciones y se comparó la primera y última generación, posterior a ello se analizaron las soluciones óptimas en función a cada uno de los objetivos de aptitud y finalmente se seleccionó la solución óptima que mejor responde a los tres objetivos definidos.

Figura 57.

Render de la última generación (25 individuos) vista en planta



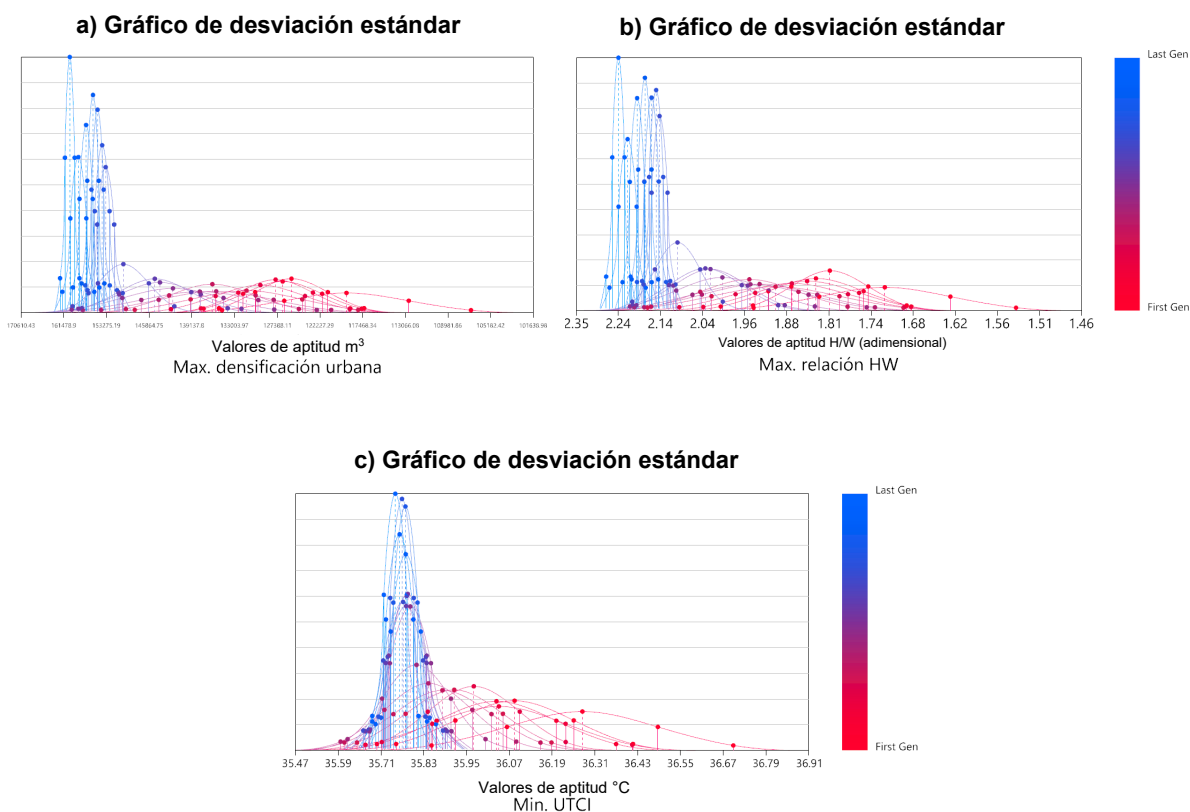
Number of exported solutions : 25 out of 500

En la Figura 58 se observa el gráfico de desviación estándar para todas las generaciones de la población para cada objetivo de aptitud de forma independiente. Un valor de desviación estándar bajo indica que la mayoría de los valores se agrupan alrededor de la media (menos variación dentro de la población), mientras que un factor de desviación estándar alto indica que los valores se extienden más lejos de la media (más variación dentro de la población). Las líneas rojas representan las primeras generaciones, mientras que las azules las últimas generaciones, entre más plana la curva, es decir mayor extensión en el eje “x”, mayor variación de desviación estándar, entre más estrecha y espigada menor variación. El eje “x” representan los valores de aptitud obtenidos de las simulaciones. Un cambio de inclinación de la curva hacia la izquierda indica un mejor rendimiento, en el caso de los gráficos “a” y “b” el valor de aptitud en el eje “x” aumenta de derecha a izquierda debido a la maximización de estos objetivos, a diferencia del gráfico “c” que este disminuye a medida en que se avanza en la simulación.

Se observa que en los tres gráficos de desviación estándar (a, b y c) las primeras generaciones presentan mayor variación dentro de la población. El objetivo 3 fue el que presento menor variación dentro de su población (Figura c) a diferencia de los objetivos 1 y 2 que presentan una variación mayor y similar (Figuras a y b). De tal manera que podemos interpretar las gráficas de la siguiente forma los valores de desviación estándar decrecen y las soluciones presentan un mejor rendimiento a medida en que los cruces y mutaciones de los individuos de generación en generación se acercan al elitismo, esto se aprecia mayormente en los gráficos a y b en donde se observa como las generaciones se van desviando a la izquierda (mejor rendimiento) a diferencia del gráfico c en donde las últimas generaciones se mantienen en un rango.

Figura 58.

Gráfico de desviación estándar de cada generación por objetivo de aptitud.



El gráfico de desviación estándar se calculó a través de la Ecuación 5, la cual calcula la desviación estándar para cada generación en la población, X es el valor de aptitud de la solución y es el valor medio de aptitud de la generación.

Ecuación 5.

Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}$$

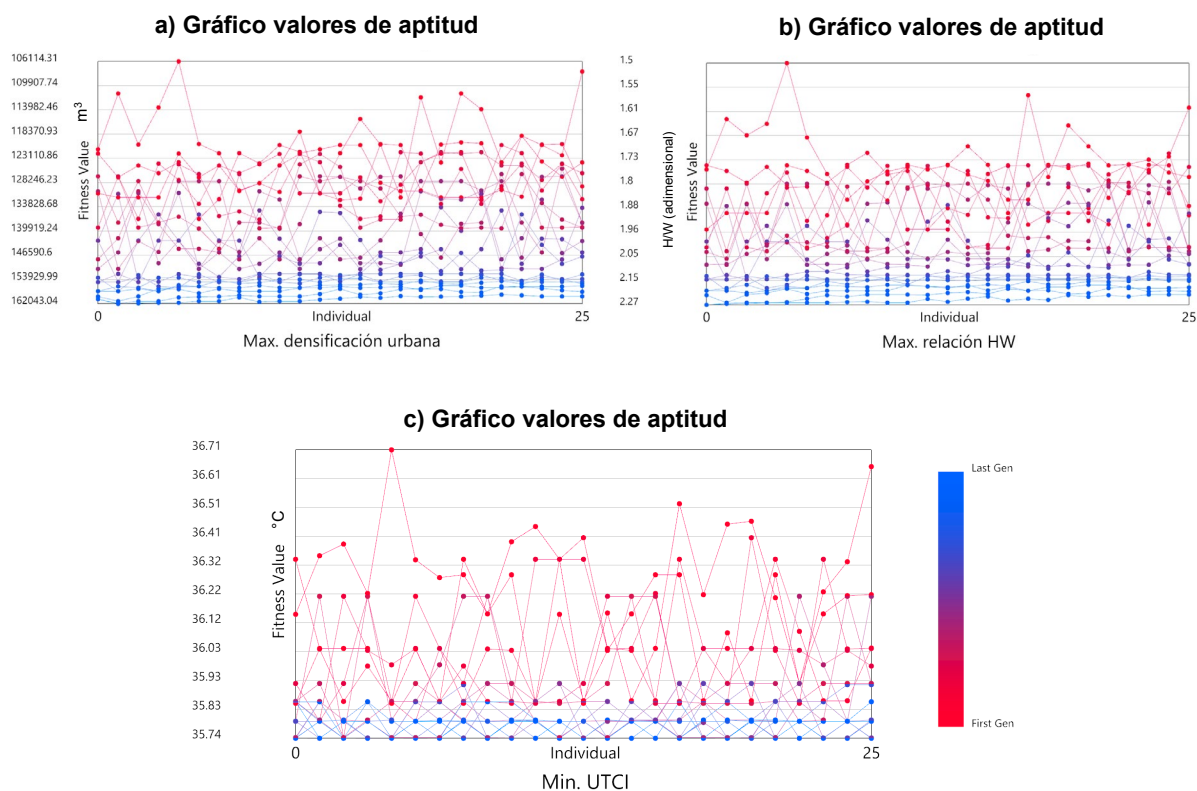
El gráfico de valores de aptitud analiza los valores de aptitud para cada objetivo de forma independiente en toda la población. El gráfico se muestra por generación y cada punto de quiebre de izquierda a derecha representa una solución (individuo). Cada generación está conectada con una polilínea, las líneas rojas representan las primeras generaciones y las azules las últimas generaciones, el eje “x” representa las soluciones por generación, mientras que el eje “y” muestra el valor aptitud obtenido por solución. A medida en que las líneas se acercan al eje “x” significa que las soluciones tienden a acercarse a la solución más adecuada u óptima.

Como se ilustra en la Figura 59 los valores iniciales (primeras generaciones) tienden a presentar una mayor fluctuación a diferencia de las últimas generaciones donde se presenta una menor fluctuación. Para el caso de los objetivos 1 y 2 (gráficos a y b) que consisten en maximizar la densificación urbana (m^3) y relación de aspecto (H/W) del cañón urbano, se observa que las últimas generaciones presentan valores mayores de volumen y relación H/W a medida en que se avanza en la simulación, es decir, los valores en “y” aumentan medida en que se acercan al eje “x”, por ejemplo, en el caso del objetivo 1 (gráfico a) la mayoría de las soluciones que corresponden a las primeras generaciones se mantienen dentro de un rango 118 370 a 139 919 m^3 , mientras que las soluciones de las últimas generaciones alcanzan valores de hasta 162 043 m^3 . Lo mismo sucede para del objetivo 2 (gráfico b) para este caso una de las soluciones de las primeras generaciones alcanzo un valor H/W de 1.5, mientras que las soluciones de las últimas generaciones alcanzan valores superiores a 2, es decir un $HW > 2$, por otro lado, las soluciones de las primeras generaciones se encuentran dentro de un rango $1.5 < HW < 2$.

Por otro lado, el objetivo 3 que consiste en minimizar el valor de UTCI, para este caso los valores del eje “y” disminuyen a lo largo de la simulación (gráfico c). Las últimas generaciones responden de mejor manera al objetivo 3 al presentar valores menores a 35.8 °C en comparación con las primeras generaciones que alcanzan una temperatura de hasta 36.5 °C. También se observa que los valores de aptitud obtenidos de las simulaciones para este objetivo se mantienen dentro de un rango en comparación con los objetivos 1 y 2 que muestran mayor dispersión en los valores de aptitud (gráficos a y b). En general la dispersión de los valores de aptitud para cada objetivo disminuye a lo largo de la simulación.

Figura 59.

Gráfico de valores de aptitud para cada objetivo múltiple en toda la población



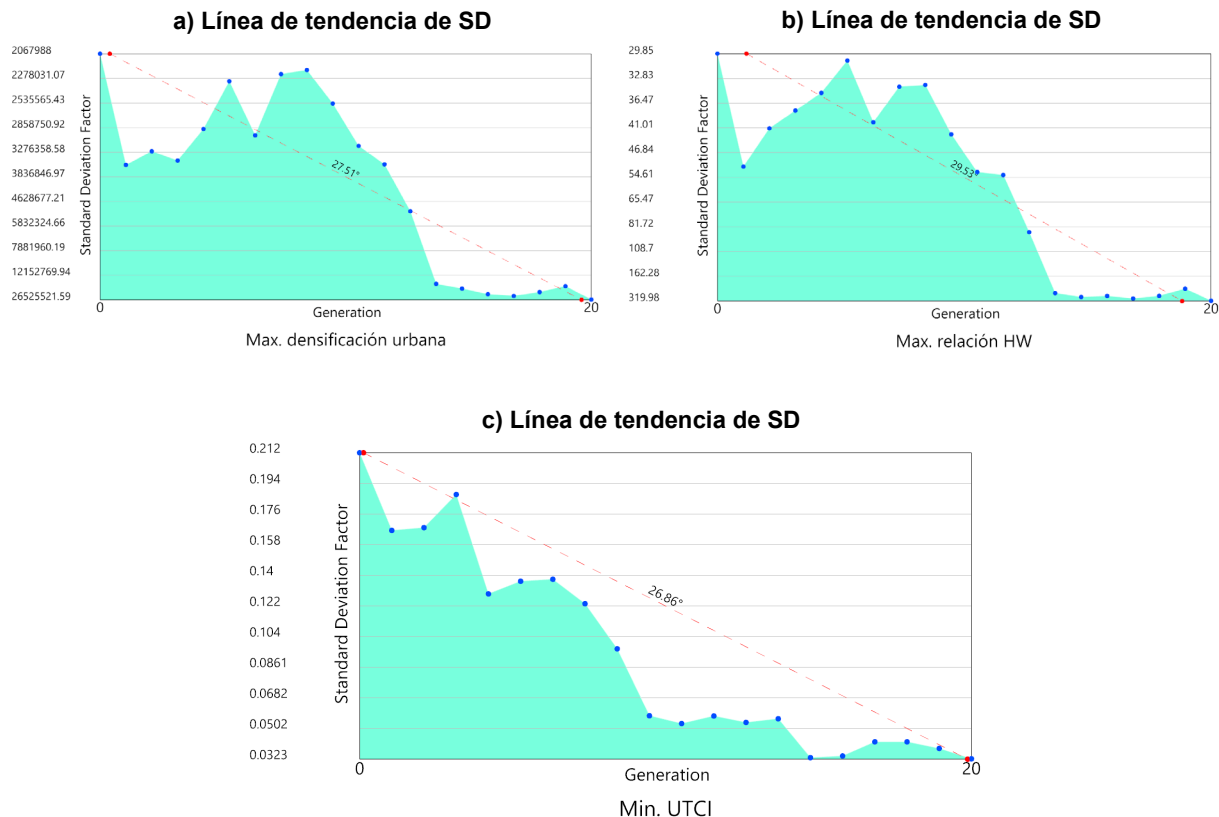
En la Figura 60 se presenta el gráfico de la línea de tendencia de la desviación estándar, está representa el factor de desviación estándar por generación. Las gráficas muestran de izquierda a derecha la tendencia de la evolución de la simulación para

encontrar el óptimo, cada punto de quiebre en el eje “x” es una generación, mientras que el eje “y” muestra el valor medio de separación respecto al factor de desviación estándar. A medida en que los puntos se acercan al eje “x” significa que las soluciones tienden a acercarse a la solución más adecuada u óptima.

De tal manera que podemos interpretar las gráficas de la siguiente forma, los valores del factor de desviación estándar por generación decrecen a medida en que los cruces y mutaciones de los individuos de generación en generación se acercan al elitismo, se observa claramente que las últimas generaciones son las que presentan menor factor de desviación estándar en comparación con las primeras, además se muestra una tendencia clara de baja fluctuación a partir de la generación 9 para los objetivos 1 y 2 (gráficos a y b), mientras que para el objetivo 3 (gráfico c) a partir de la generación 6, este objetivo es el que presenta un menor factor de desviación estándar a lo largo de las generaciones. En general se aprecia una línea de tendencia decreciente.

Figura 60.

Gráfico de la línea de tendencia de la desviación estándar



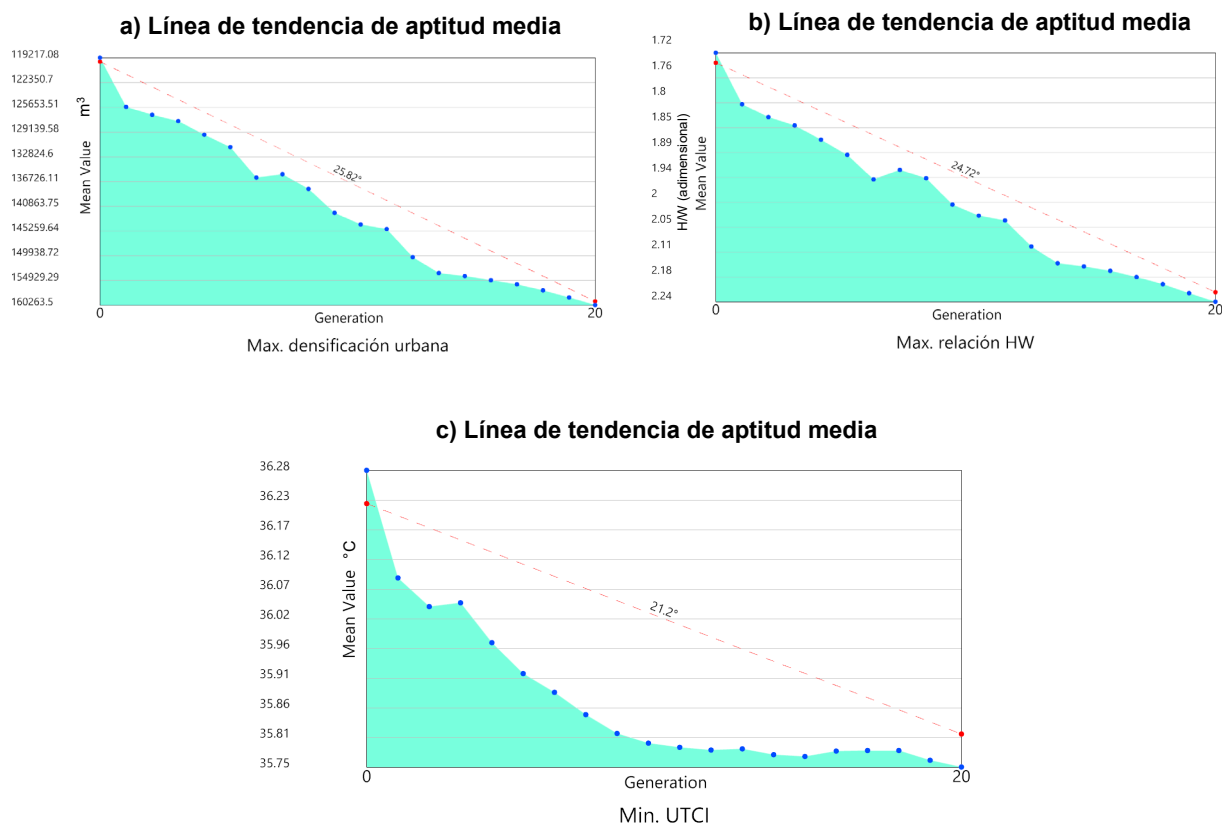
Por otro lado, el gráfico del valor medio o línea de tendencia de aptitud media muestra el valor de aptitud promedio para cada objetivo múltiple y para cada generación, entendiendo por valor de aptitud a la expresión numérica de una generación respecto al caso más apto, es decir la desviación respecto al caso óptimo. De izquierda a derecha muestra la tendencia de la evolución de la simulación y cada punto de quiebre en el eje “x” representa una generación, en el eje “y” se muestra el valor de aptitud medio por generación. A medida en que los puntos se acercan al eje “x” significa que las soluciones tienden a acercarse a la solución más adecuada u óptima.

Como se ilustra en la Figura 61 el valor de aptitud medio para los objetivos 1 y 2 (gráficos a y b) aumentan a medida en que se avanza en las generaciones, esto se debe a que estos dos objetivos deben de maximizarse para aumentar el porcentaje de sombras respecto a las edificaciones, mientras que el objetivo 3 el valor medio decrece a medida en que avanzan las simulaciones.

En este sentido, se concluye que las últimas generaciones responden de mejor manera a los objetivos planteados como se observa en el valor medio de los gráficos a, b y c, los gráficos “a” y “b” (objetivos 1 y 2 respectivamente) muestran un comportamiento similar uniforme en comparación al gráfico “c” (objetivo 3). Esto se debe a la compatibilidad de los objetivos 1 y 2. A partir de la generación 10 en el objetivo 3 el valor medio se mantiene en un rango, mientras que en los objetivos 1 y 2 se puede ver claramente una variación mayor. En general se observa una línea creciente para los objetivos 1 y 2 (gráficos a y b) y una línea decreciente para el objetivo 3 (gráfico c), a pesar que los tres gráfico muestran una línea de tendencia similar que a simple vista pudiera parecer una línea de tendencia decreciente, esto se debe a que el objetivo del motor evolutivo es igualar a “0” el valor de aptitud, pero para el caso de los objetivos 1 y 2 que consisten en maximizar la densificación urbana (m^3) y relación de aspecto (H/W) el valor de aptitud aumenta a medida en que se acerca eje “x”, por lo que se concluye que las generaciones presentan un mejor rendimiento a medida en que las soluciones se acercan al elitismo.

Figura 61.

Gráfico de la línea de tendencia de aptitud media para cada generación y para objetivo de aptitud.



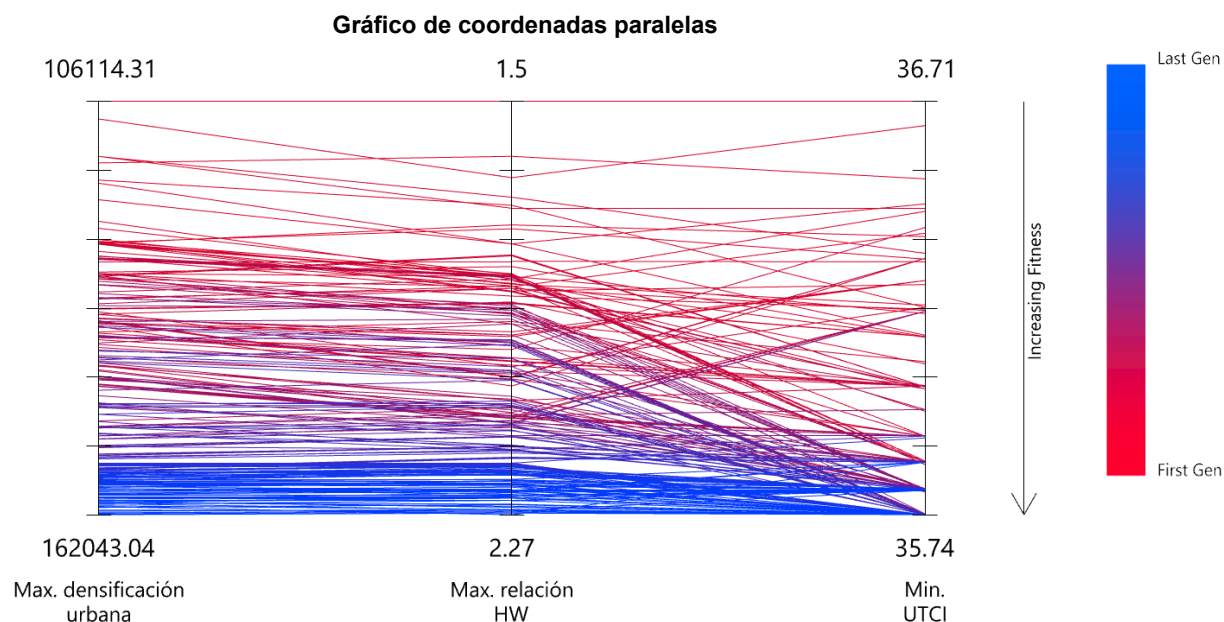
El gráfico de coordenadas paralelas analiza todas las soluciones de la población mediante la comparación de los valores de aptitud para cada escenario en todos los objetivos de aptitud, lo que permite observar patrones emergentes que pudieran haberse desarrollado a lo largo de la ejecución de la simulación y comprender mejor cómo se optimizan las soluciones a lo largo de la simulación. En la Figura 62 se observa el gráfico de coordenadas paralelas, a cada objetivo se le atribuye un eje y cada línea corresponde a una de las 500 soluciones, las líneas rojas representan las primeras generaciones, mientras que las azules las últimas. Entre más horizontal sea la línea significa que existe mayor compatibilidad entre los objetivos.

Los valores ubicados en la parte superior de los objetivos uno y dos representan el valor mínimo obtenido de volumen (m^3) y relación de aspecto (H/W) de las 500 soluciones, mientras que los valores inferiores representan el valor máximo, a diferencia del objetivo 3 (último eje) el valor superior indica la temperatura máxima alcanzada ($36.71^\circ C$) y el inferior la temperatura mínima ($35.74^\circ C$), de tal forma que

las soluciones que se acercan al eje “x” representan las soluciones más adecuadas. Se concluye que las últimas soluciones responden de mejor manera a los tres objetivos definidos, por lo tanto, los mecanismos de selección, cruce y mutación de parámetros han dado como resultado un mejor rendimiento en cada nueva generación.

Figura 62.

Gráfico de coordenadas paralelas



Las gráficas anteriores permitieron analizar el comportamiento y evolución de las soluciones a lo largo de la simulación, además se observa como estas van evolucionando a soluciones óptimas mientras se avanza en las generaciones, esto se aprecia de forma notoria en las Figura 63 y Figura 64 se observa una comparación del comportamiento de la primera y última generación. La primera generación muestra mayor variación dentro de la población, por ejemplo, el gráfico de diamante que se ilustra dentro de la Figura 62 y 63, analiza los valores de aptitud en función a los tres objetivos definidos, entre más al centro de la gráfica se genere el diamante, mejor es el comportamiento y rendimiento de la solución, mientras más grande sea el diamante menor será el rendimiento.

Se puede apreciar que la primera solución muestra una mayor variación entres los valores de aptitud y por ende un rendimiento menor en respuesta a los tres objetivos

de aptitud, a diferencia de la última generación que presenta una curva de desviación estar menor y una mejor adaptabilidad a los objetivos, sin embargo, no necesariamente la última solución de la última generación es la mejor.

Figura 63.

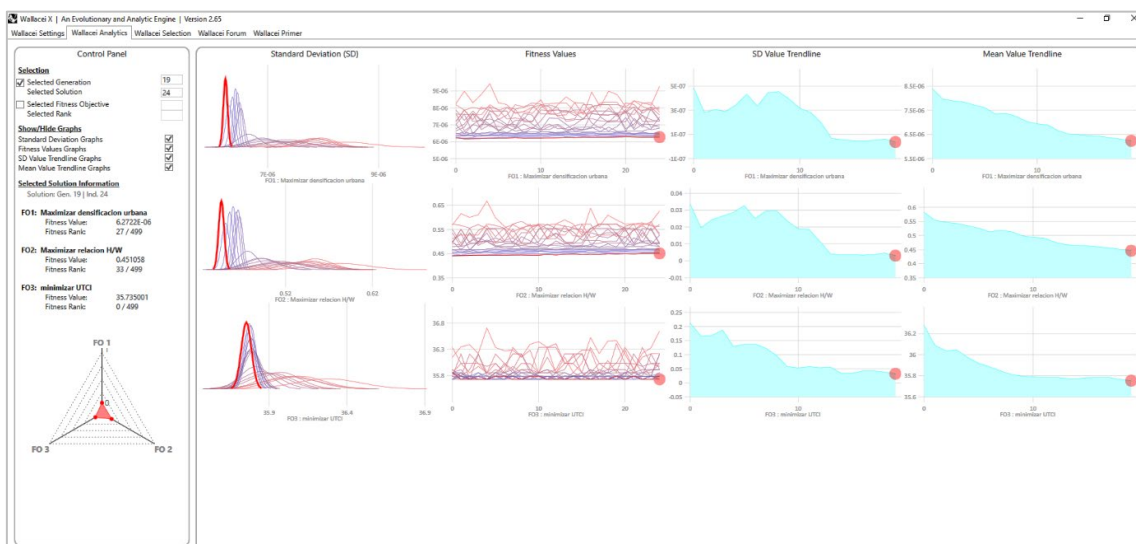
Comportamiento de la generación 1, individuo 1 (primera generación)



Nota. Imágenes extraídas de Wallacei X®

Figura 64.

Comportamiento de la generación 20, individuo 25 (última generación)



Nota. Imágenes extraídas de Wallacei X®

El gráfico de diamantes permite al usuario seleccionar una solución en base a su rango en la población, es decir, cada una de las 500 soluciones se clasifican de acuerdo con cada criterio de aptitud del más apto al menos apto, de tal manera que se le asigna a cada solución un número entero único que comienza en “0”, esta es una clasificación de toda la población y no se basa en una generación. Por medio de este método es posible seleccionar rápidamente las soluciones más adecuadas en toda la simulación y extraer su ubicación en la población. Este método solo funciona analizando un objetivo a la vez, para ello la selección se llevó a cabo empleando el número “0” (“óptimo”) para cada uno de los tres objetivos.

Los resultados se muestran en las Figuras 62-65, como se puede apreciar en la Figura 65 (a), para el objetivo uno (FO1) la solución que mejor se adapta a este criterio también presenta una buena adaptación al resto de los objetivos, la solución se ubica dentro de la generación 20 y corresponde al individuo 2 (recordar que la herramienta inicia el conteo de generaciones e individuos a partir del “0”, por lo que se recorre una generación e individuo), mientras que la que mejor solución que responde al objetivo dos (FO2) (Figura 66) (a) es la solución ubicada en la generación 19 y corresponde al ind.1, sin embargo, esta solución se comporta bien en los FO1 y FO2 pero en no muestra un buen comportamiento en el objetivo 3 (Figura 67). En cambio, para el objetivo 3 (FO3) (a), la solución óptima se localiza dentro de la generación 15 y corresponde al ind. 20, sin embargo, solo presenta un buen rendimiento en el FO3 y no responde bien a los FO1 y FO2. En el inciso (b) de las Figuras 62-65 se presentan los fenotipos para cada una de las soluciones mencionadas en este párrafo.

Figura 65.

Gráfico de diamante del objetivo de aptitud 1

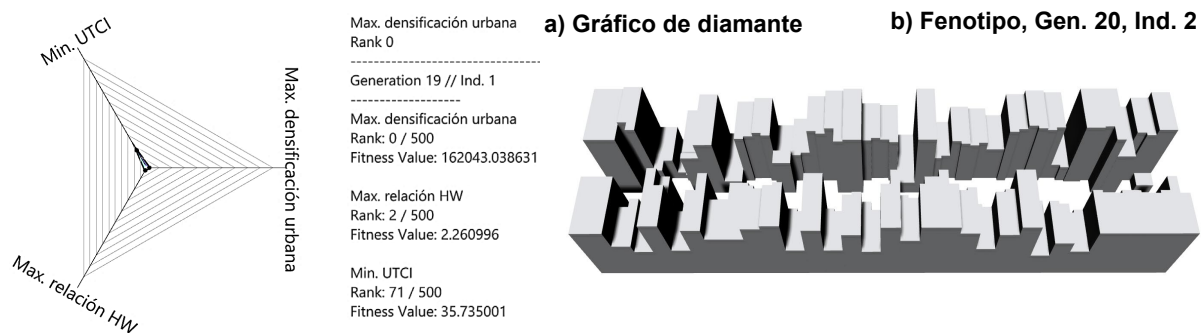


Figura 66.

Gráfico de diamante del objetivo de aptitud 2

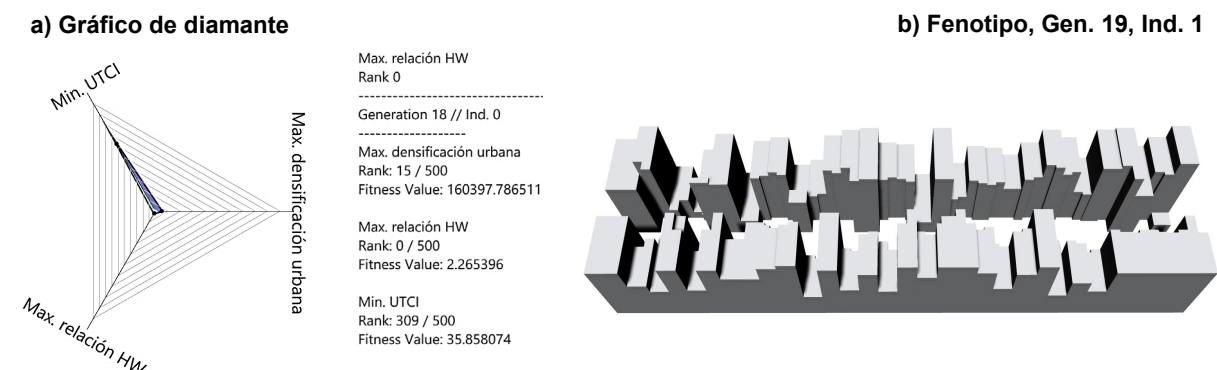
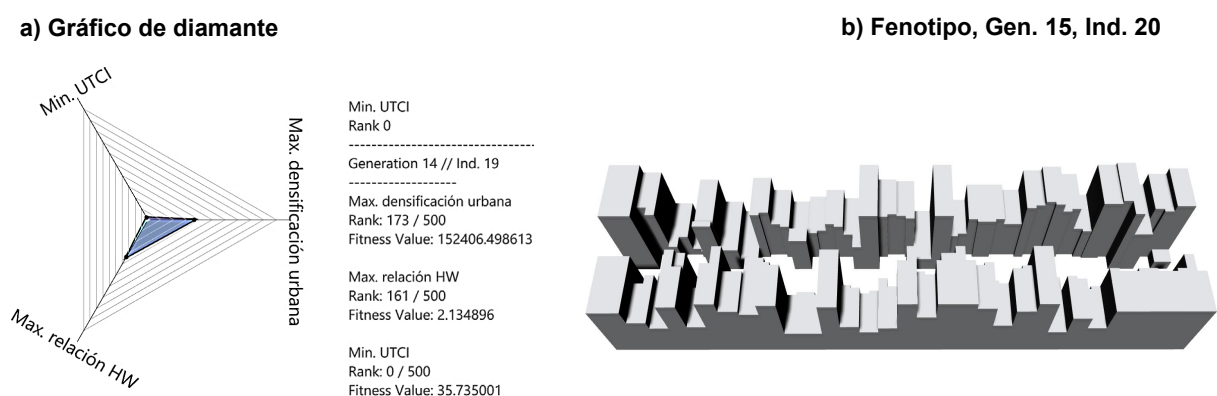


Figura 67.

Gráfico de diamante del objetivo de aptitud 3

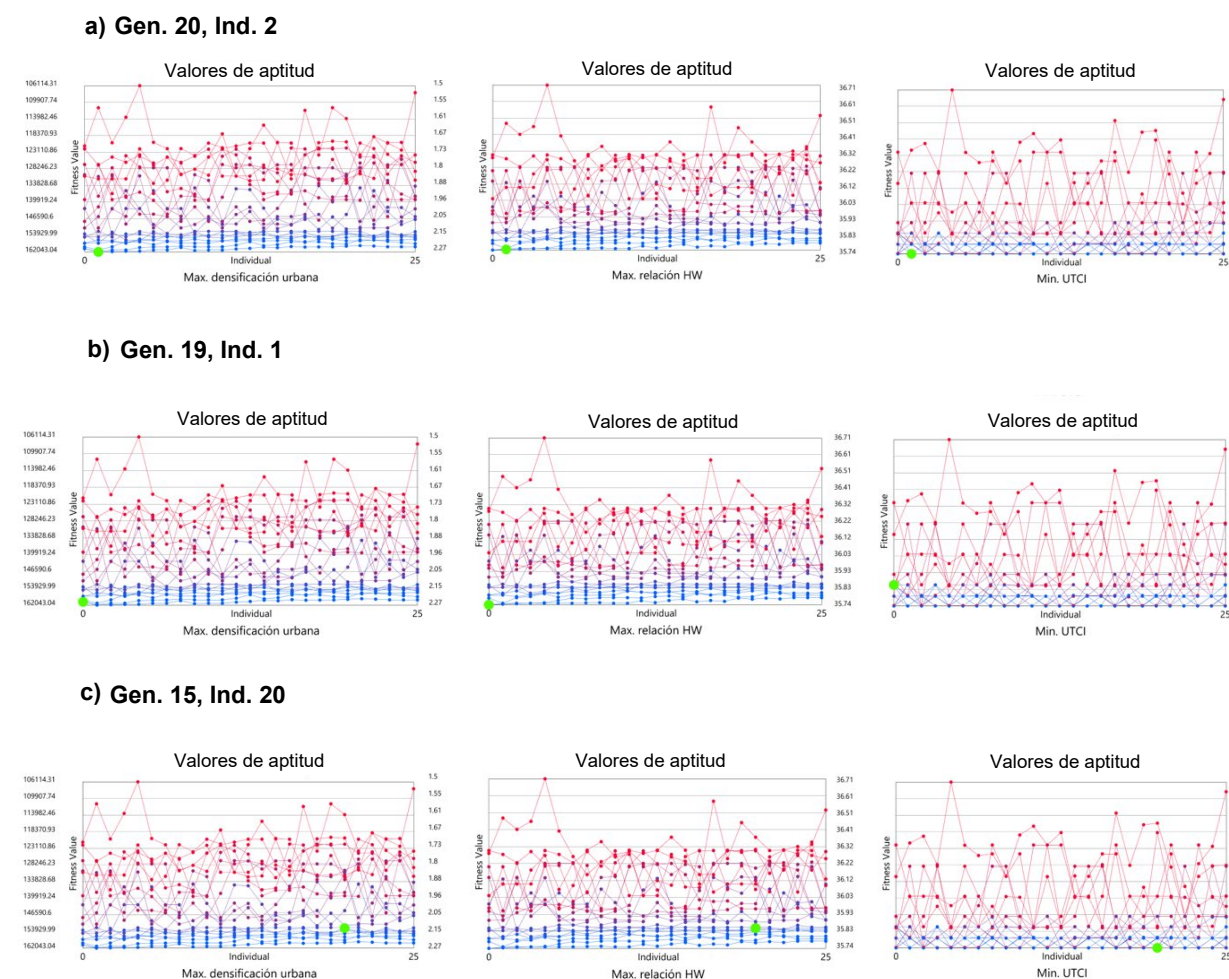


En la Figura 68 se presenta a través de gráficos de valores de aptitud una comparación de la ubicación de las soluciones óptimas para cada uno de los objetivos, la primera fila (gráficos a) corresponde al óptimo del FO1, la segunda fila (gráficos b) al óptimo del FO2 y la tercera fila (gráficos c) al óptimo del FO3. En esta figura se ilustra el comportamiento de estas tres soluciones respecto a cada uno de los objetivos, en el gráfico “a” se aprecia como la solución de la Gen. 20, Ind. 2 se ubican en el eje “x” (circulo verde) lo que significa un buen rendimiento para los tres objetivos, en el caso de la solución ubicada en la Gen. 19, Ind. 1 (circulo verde) en los dos primeros objetivos esta se localiza cercas del eje “x”, sin embargo, para el FO3 se aleja. Algo similar ocurre en la Gen.15, Ind. 20, pero en este caso la solución se aleja

del óptimo en los FO1 y FO2, mientras que para el FO3 esta se localiza en el eje “x”. Estas gráficas permiten entender el comportamiento de los gráficos de diamantes explicados anteriormente.

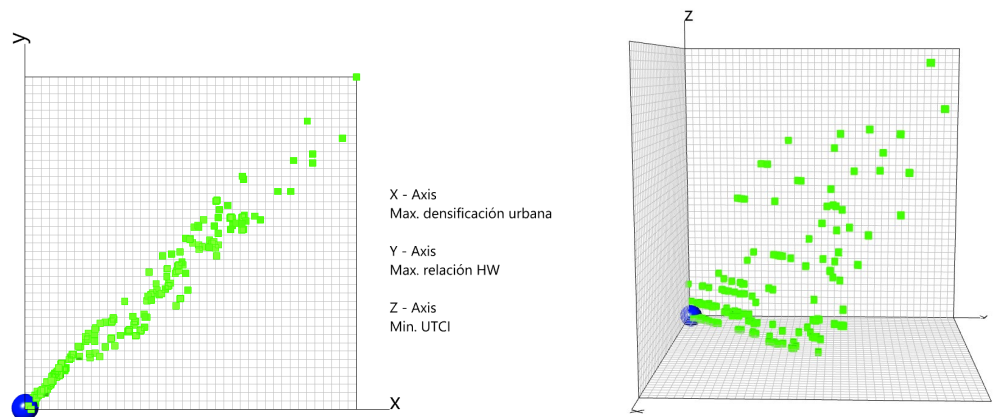
Figura 68.

Gráfico de valores de aptitud de las soluciones óptimas por objetivo



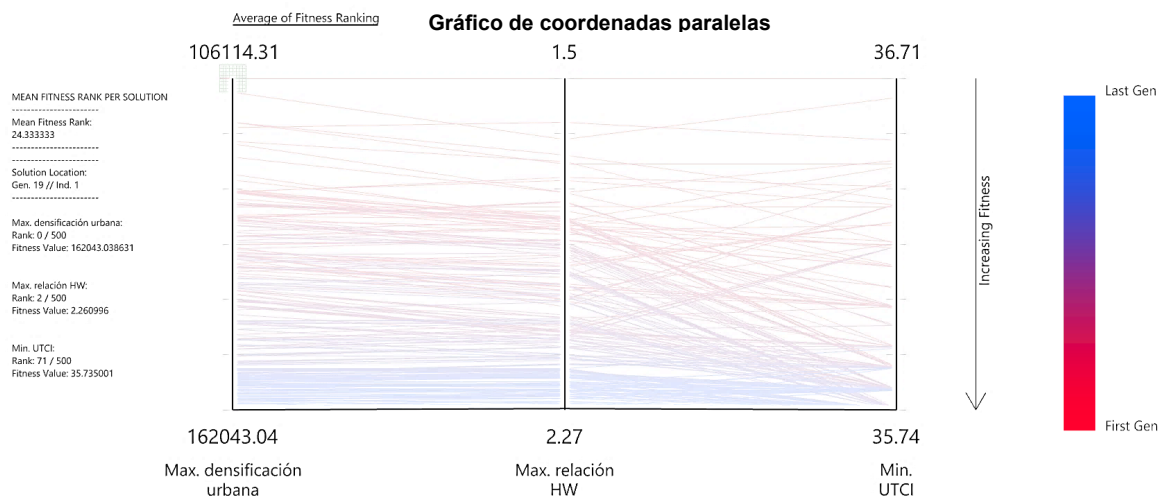
Por otro lado, el componente de Frente de Pareto calcula el valor de no dominancia para cualquier generación dentro de la población. En la Figura 69 se observa el gráfico de Frente de Pareto, los cuadros verdes representan todas las soluciones generadas, mientras que el círculo en azul muestra el Frente de Pareto, se observa una distribución de soluciones uniforme a lo largo de la simulación, sin embargo, dentro de toda la población solo se identificaron dos soluciones de Frente de Pareto. Las soluciones de Pareto se ubican dentro de la última generación y corresponden a los individuos 1 y 2.

Figura 69.
Gráfico de Frente de Pareto



Para la selección del caso de optimización morfológica se realizó un último análisis a través del gráfico de coordenadas paralelas, el método a emplear se denomina como “promedio de los rangos de aptitud” lo que hace es ordenar las soluciones conforme con su aptitud media, calculando la clasificación de aptitud media de los objetivos de cada solución (la solución “más apta” es la que tiene la clasificación media más baja). El análisis dio como resultado la solución de la generación 20, ind.2, como la solución óptima a este problema de diseño. Cabe resaltar que dicha solución es la misma que mejor desempeño tuvo en el objetivo 1 y además representa una de las dos soluciones de Frente de Pareto. En la Figura 70 muestra a través del gráfico de coordenadas paralelas la ubicación del caso óptimo (marcada con una línea negra).

Figura 70.
Gráfico de coordenadas Paralelas para la solución óptima



4.2.3. Caso de optimización morfológica

La solución óptima selecciona corresponde a la generación 20 individuo 2, debido a que representa la solución que mejor resuelve el problema de diseño compuesto por tres objetivos de aptitud a) maximizar la densificación urbana dentro de cañón; b) maximizar la relación de aspecto del cañón; y c) minimizar el microclima urbana a través del UTCI. Una vez seleccionado el óptimo de Pareto la solución se evaluó con respecto al caso base. En la Tabla 24 se presenta los valores calculados de los objetivos del caso de optimización morfológica respecto al caso base, como se puede observar la relación de aspecto aumento de un $HW < 1$ a un $HW > 2$, lo que resultó en un aumento del volumen de los edificios, al maximizar la altura de las edificaciones la proyección de sombras de la morfología aumenta proporcionando espacios más frescos debido a la obstrucción de la radiación solar, se presentó una disminución de $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el UTCI.

Tabla 24.

Comparación de los valores de aptitud por objetivo calculados del caso de optimización morfológica respecto al caso base

Escenario	Densidad (volumen m^3)	Relación de aspecto (H/W)		UTCI ($^{\circ}\text{C}$)
Caso base	25 575.5 m^3	HW<1	0.54	30.5 - 36.8 $^{\circ}\text{C}$
Gen. 20, Ind. 2	162 042.8 m^3	HW>2	2.26	29.0 - 35.8 $^{\circ}\text{C}$

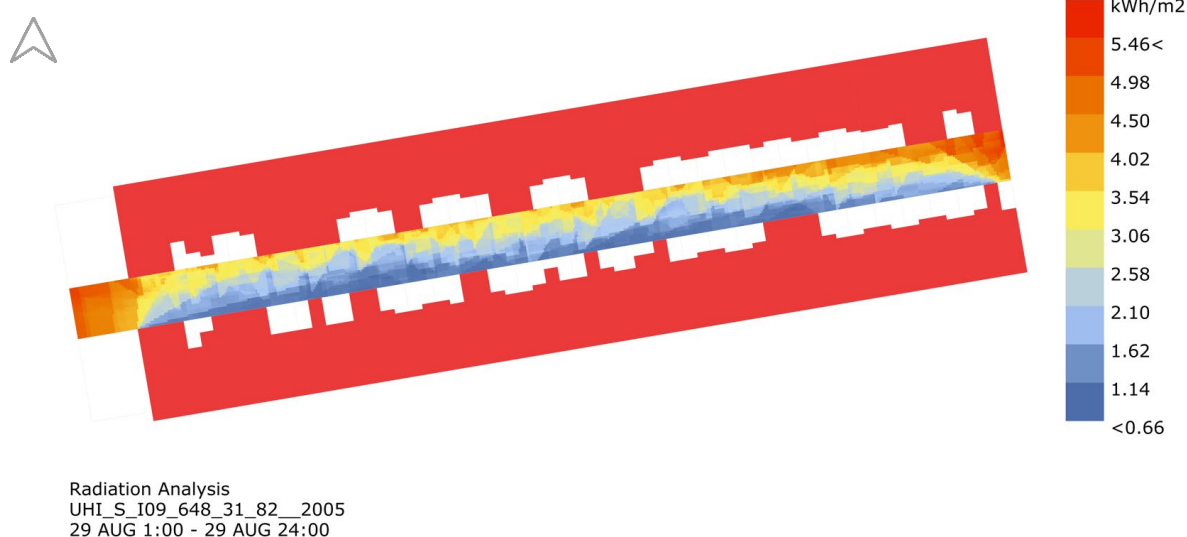
En la Figura 71 se ilustra la radiación solar acumulada para el día cálido extremo tanto para el escenario de caso base como el caso de optimización morfológica. Los resultados obtenidos muestran un potencial significativo de obstrucción al acceso solar debido a una mayor relación de aspecto como resultado de la densificación vertical. En consecuencia, la cantidad total de radiación que entra al centro de la superficie del cañón urbano se reduce hasta 2.3 kWh/m^2 (figura a). Como se observa en la figura “a” la radiación máxima alcanzada corresponde a 5.46 kWh/m^2 , en comparación al caso base figura “b” que la máxima es de 6.39 kWh/m^2 , se aprecia que el centro de la calle del cañón es la que presenta los valores máximos de radiación a diferencia del caso de optimización que al centro del cañón se presentan valores medios.

En general la distribución de la radiación solar se encuentra en un rango de 1.14 a 5.46 kWh/m², sin embargo, la mayor parte del cañón urbano presenta una radiación máxima de 4.02 kWh/m² (figura a) a diferencia del caso base que la mayor parte del cañón presenta una radiación de 6.39 kWh/m² (figura b).

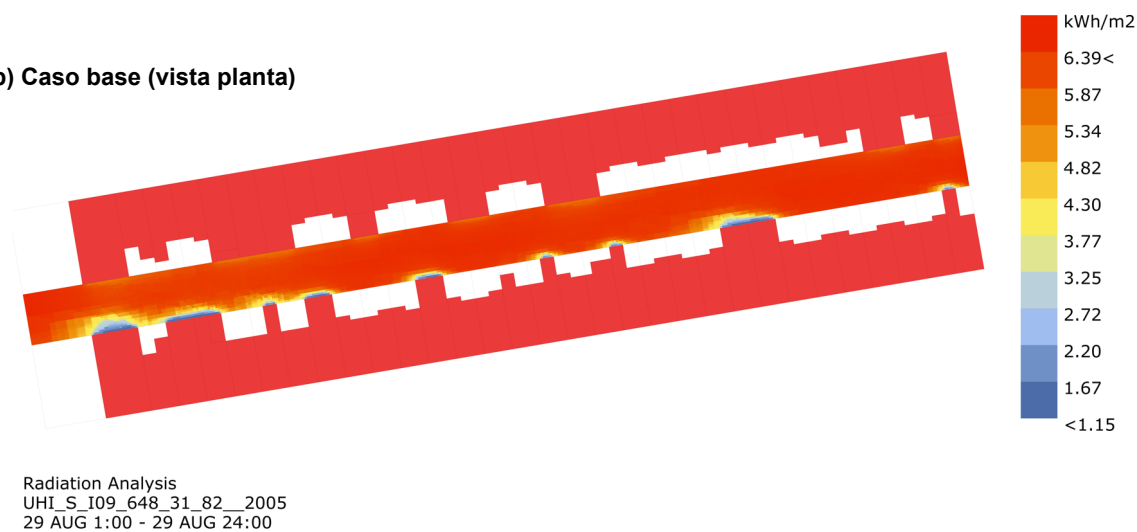
Figura 71.

Análisis de radiación solar acumulada para el día cálido extremo (kWh/m²), caso optimización morfológica vista en planta y lateral (a) vs caso base vista en planta y lateral (b)

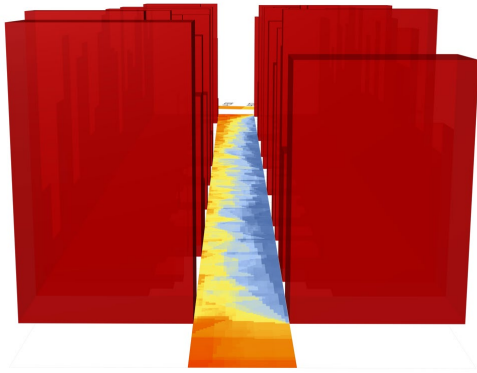
a) Caso optimización morfológica (planta)



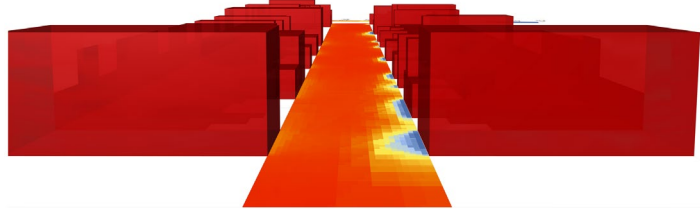
b) Caso base (vista planta)



a) Caso optimización (vista oeste lateral)



b) Caso base (vista oeste lateral)



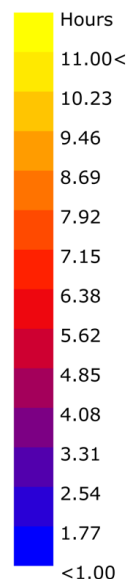
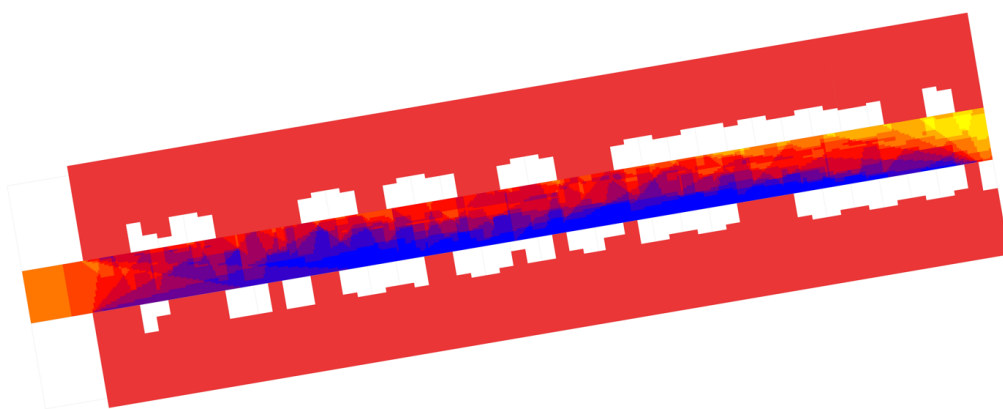
Conforme al estudio del análisis de iluminación solar directa acumulada el cañón urbano presentó una disminución de hasta 4 h 00 de luz solar directa al centro del cañón, lo que da como resultado un entorno local térmicamente más fresco durante el día (Figura 72). Como se muestra en la figura “a” en general la distribución de horas de luz solar se ubica en un rango de 1 h 00 a 11 h 00 máximas de luz disponible, además se aprecia que la mayor parte del día el cañón urbano se encuentra dentro de un rango de 2 a 7 horas de luz solar a diferencia del caso base que se registra un total de 11:00 horas de luz solar disponible la mayor parte del día y el rango de horas de luz corresponde de 2 h 00 a 13 h 00 (figura “b”).

Figura 72.

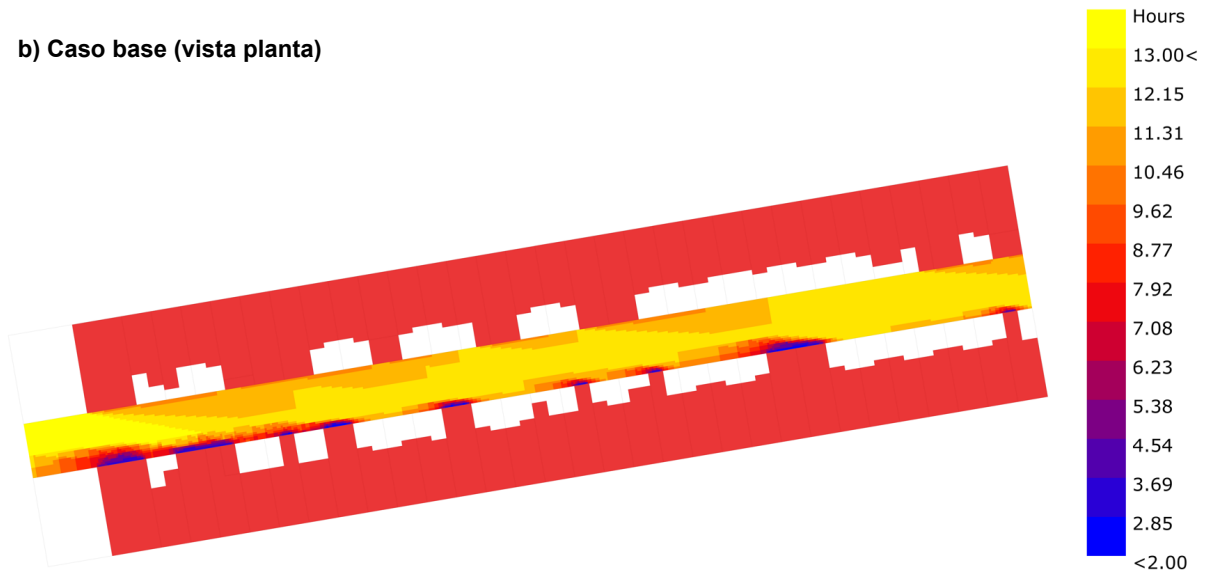
Análisis de iluminación solar directa acumulada para el día cálido extremo (horas de luz), caso optimización morfológica vista en planta y lateral (a) vs caso base vista en planta y lateral (b)



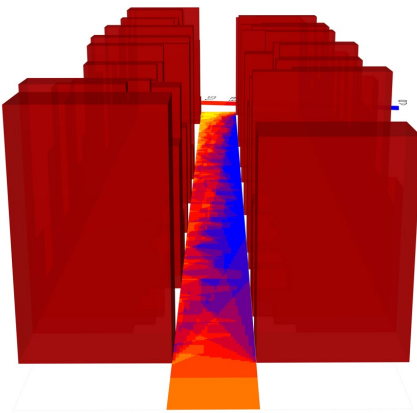
a) Caso optimización morfológica (planta)



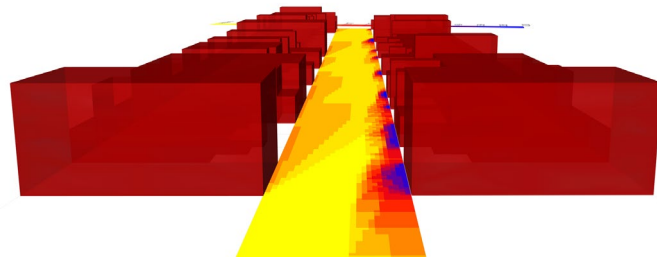
b) Caso base (vista planta)



a) Caso optimización (vista oeste lateral)



b) Caso base (vista oeste lateral)



El análisis de proyección de sombras de la morfología se calculó para la hora cálida crítica que corresponde a las 15 h 00 del día cálido extremo. Los resultados se presentan en la Figura 73, como se puede observar el porcentaje de proyección de sombras aumentó notoriamente en comparación al caso base debido a una relación de aspecto $HW > 2$ (figura a), en la figura “b” se muestra la proyección de sombra del caso base, se observa que solo la acera lateral derecha presenta un porcentaje mínimo de sombras, debido a una relación de aspecto $HW < 1$.

Figura 73.

Análisis de proyección de sombras de la morfología para la hora cálida crítica del día cálido extremo (horas de sombra), caso optimización morfológica vista en planta y lateral (a) vs caso base vista en planta y lateral (b)

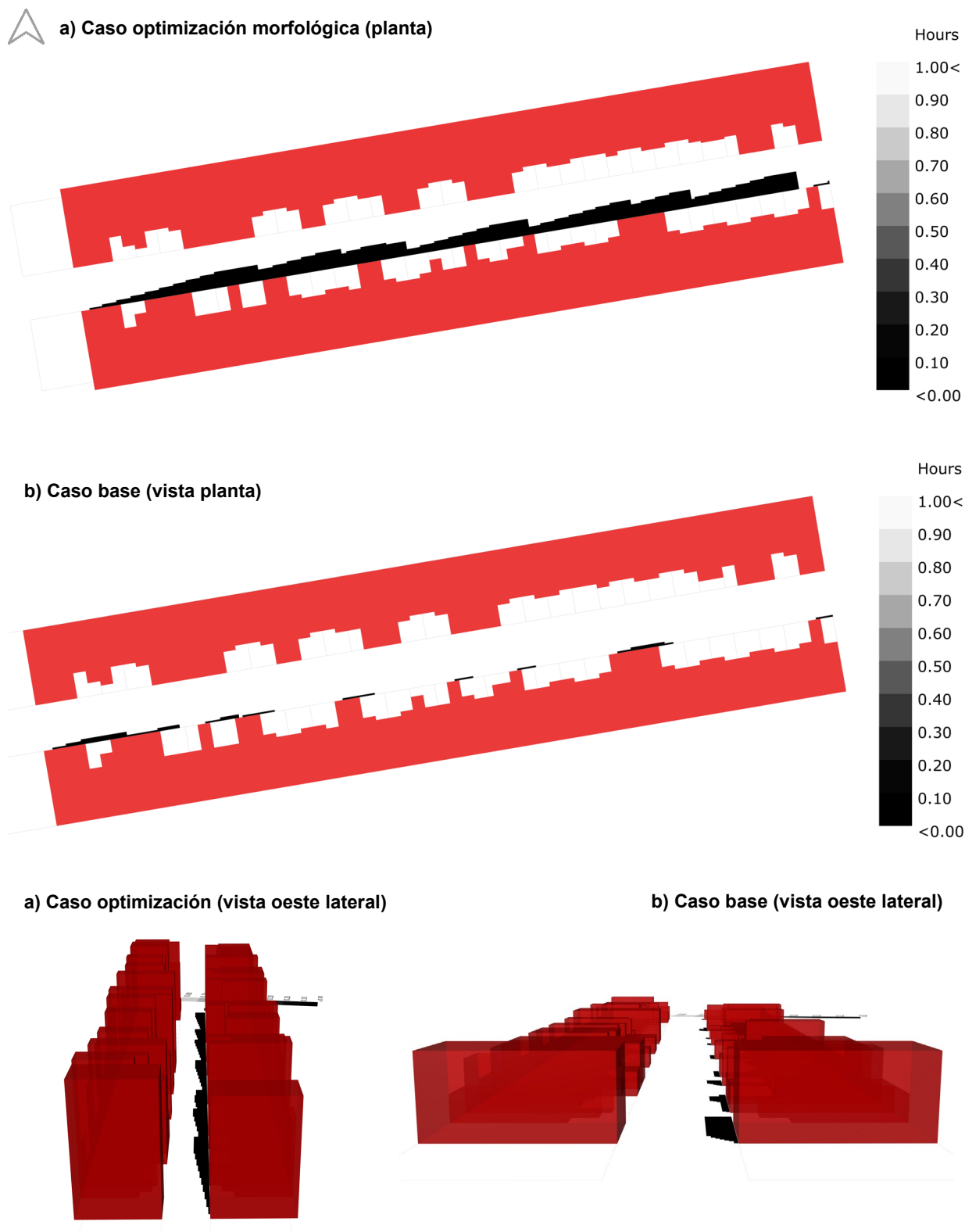
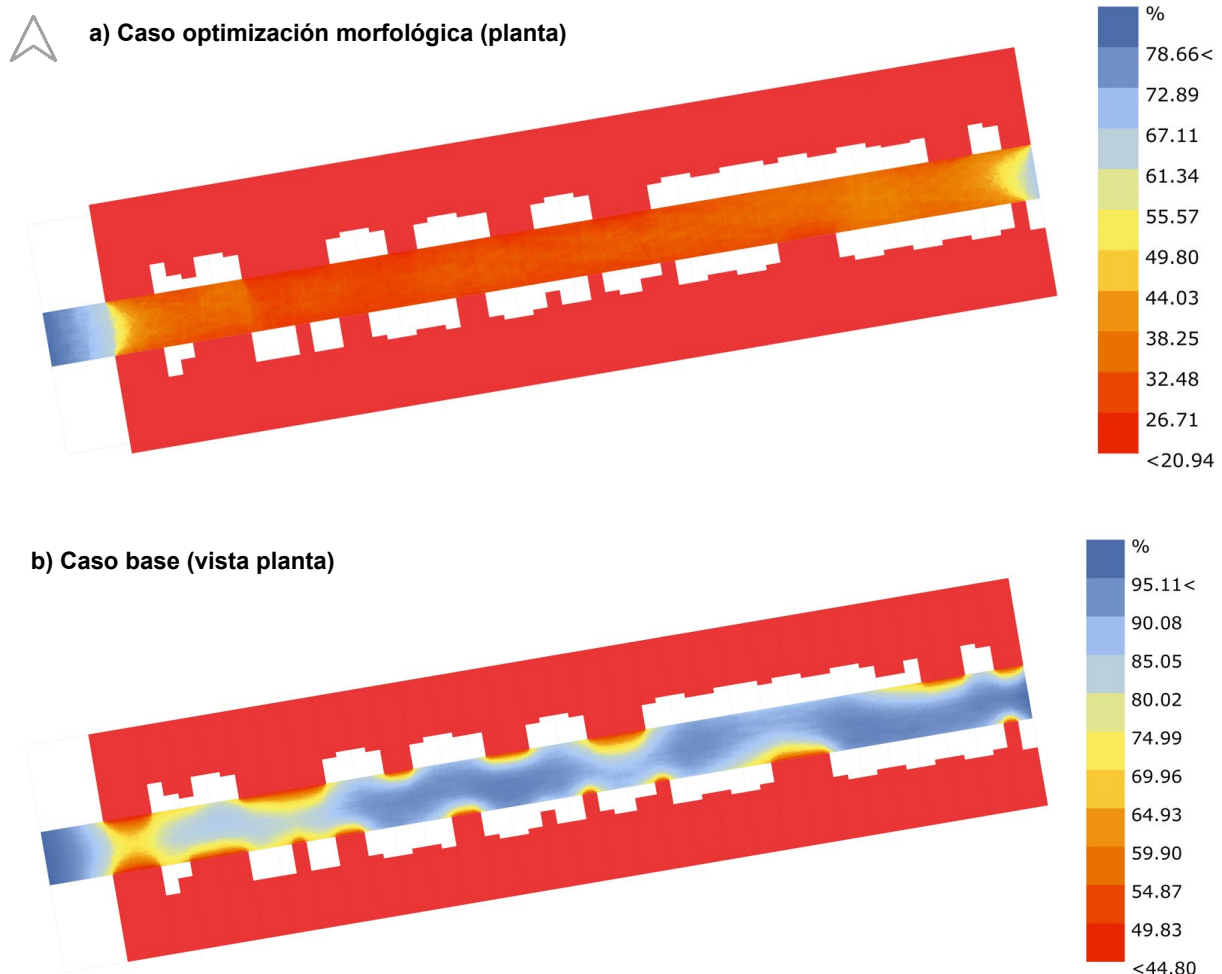


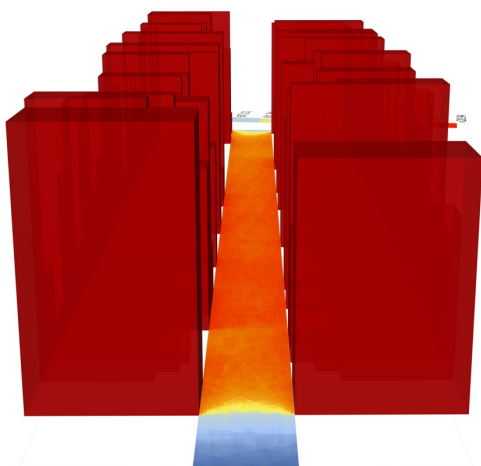
Figura 74 se presenta el análisis de factor de cielo visible, como era de esperar, el SVF se ve afectado por los edificios más altos, por lo que la tasa de obstrucción al centro del cañón aumenta hasta un 40 % (figura a). Esto puede resultar en noches más cálidas prolongadas, debido al período más largo necesario para que el calor absorbido se disipe en la atmósfera. Un factor de cielo visible menor conlleva a una pérdida de calor menos eficiente por enfriamiento radiativo. En la figura “b” se muestra en SVF para el caso base, este se encuentra en un rango de entre 60 a 95 % de visibilidad dentro del cañón urbano lo que permite que el calor se disipe más rápido por las noches, a diferencia del caso de optimización morfológica figura “a” que se ubica en un rango de 30 a 55 % de visibilidad.

Figura 74.

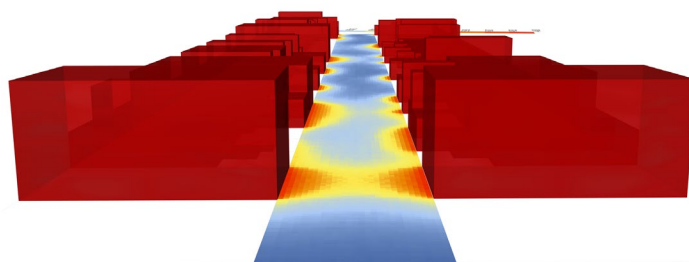
Análisis de factor de cielo visible (% de visibilidad), caso optimización morfológica vista en planta y lateral (a) vs caso base vista en planta y lateral (b)



a) Caso optimización (vista oeste lateral)



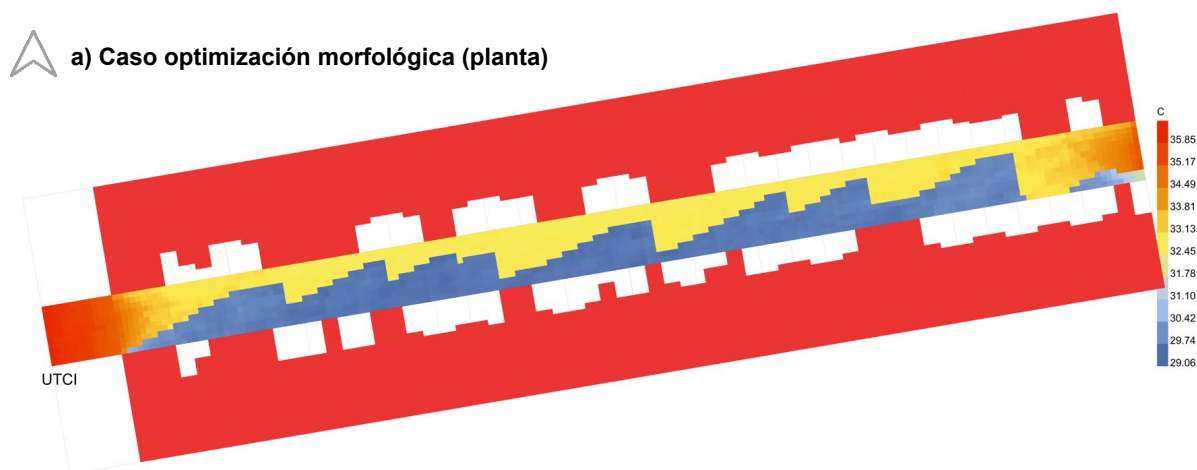
b) Caso base (vista oeste lateral)



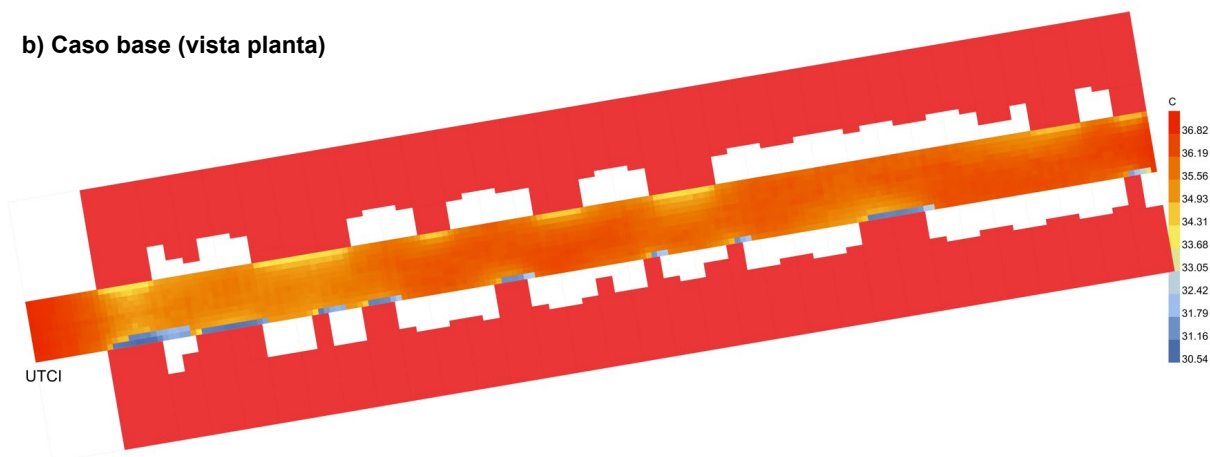
En la Figura 75 se ilustra el análisis del microclima urbano, en la figura “a” se muestra el caso de optimización morfológica, en general la distribución de temperaturas se encuentra en un rango de 29.06 y 35.85 °C, se aprecia que durante la mayor parte del día el cañón presenta una temperatura máxima de 33 °C a diferencia del caso base figura “b” en donde se registra una temperatura superior a los 35 °C la mayor parte del día y una distribución de 30.54 °C y 36.82 °C la mayor parte del cañón. Se observa una disminución del UTCI promedio de hasta 2 °C, lo que proporciona entornos urbanos térmicamente más cómodos durante los calurosos días de verano.

Figura 75.

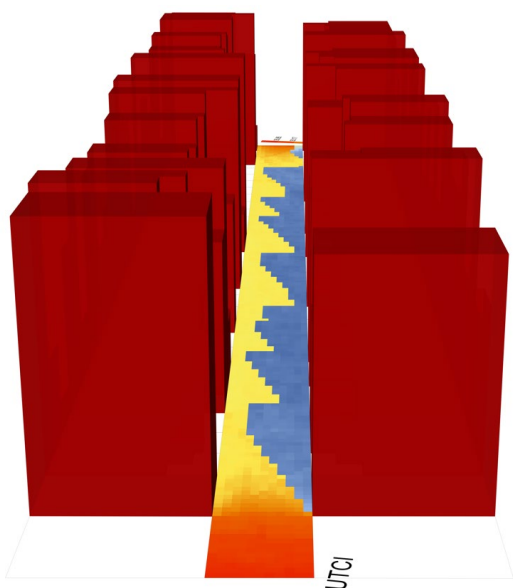
Análisis del microclima urbano a través del índice Universal de Confort Térmico para la hora cálida del día cálido extremo (°C), caso optimización morfológica vista en planta y lateral (a) vs caso base vista en planta y lateral (b)



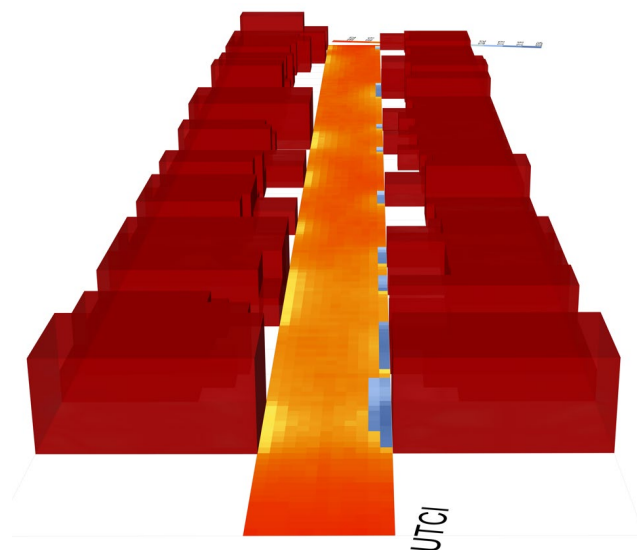
b) Caso base (vista planta)



a) Caso optimización (vista oeste lateral)



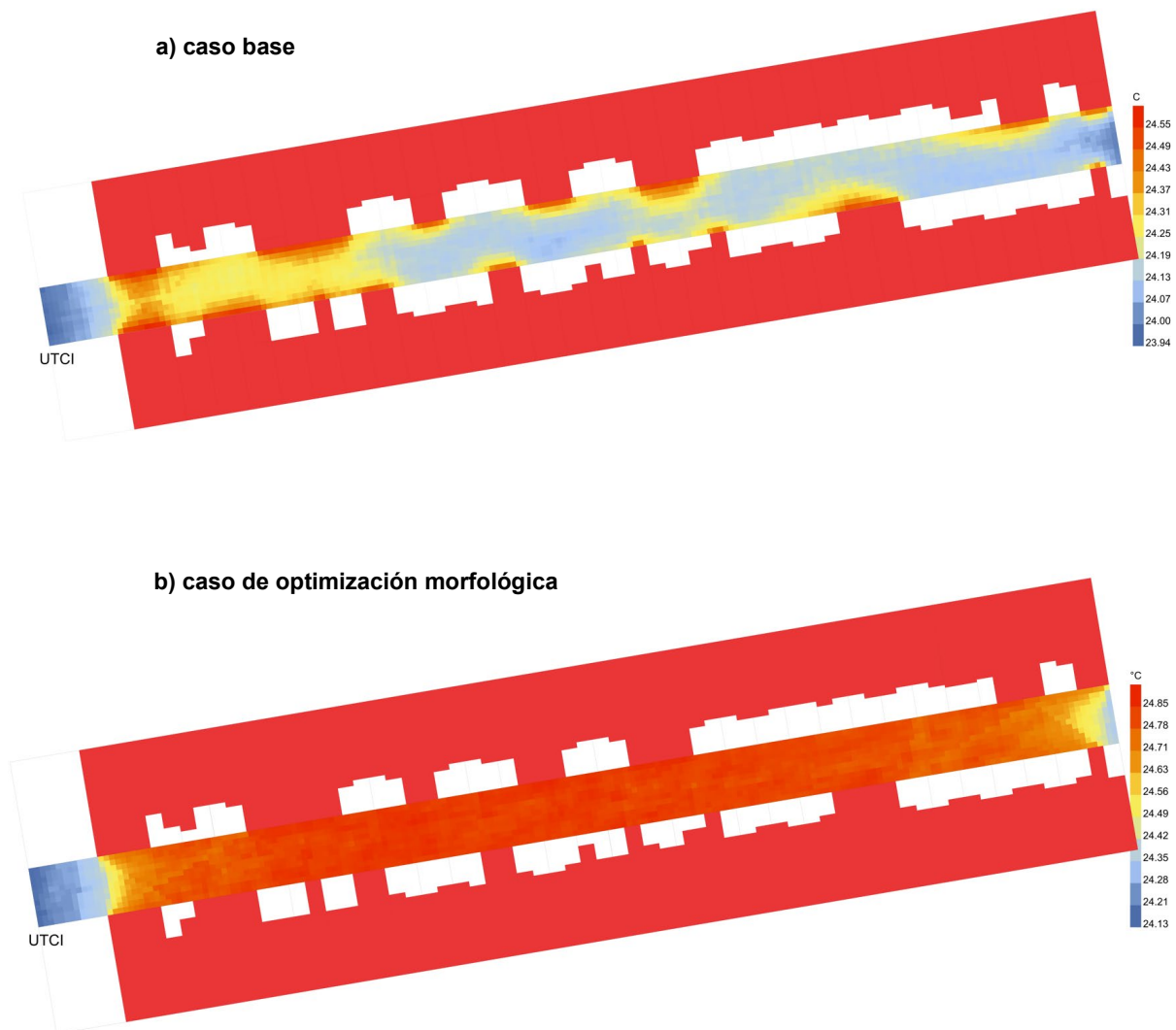
b) Caso base (vista oeste lateral)



El aumento de la densidad de la morfología urbana del caño puede afectar el potencial de enfriamiento nocturno del área debido a un menor SVF, por lo que se decidió realizar un análisis de microclima urbano para comparar ambos casos, la simulación se realizó para las 23 h 00 del día cálido extremo, como se aprecia en la Figura 76 (a) la diferencia de temperatura es menor a 1 °C. En la figura “b” se presenta el caso base el cual se encuentra en un rango de temperatura nocturno de 23.94–24.55 °C, mientras que el caso de optimización figura “a” presenta un rango de 24.13 a 24.85 °C.

Figura 76.

Análisis del microclima urbano a través del índice Universal de Confort Térmico a las 23 h 00 del día cálido extremo (°C), a) caso base y b) caso de optimización morfológica

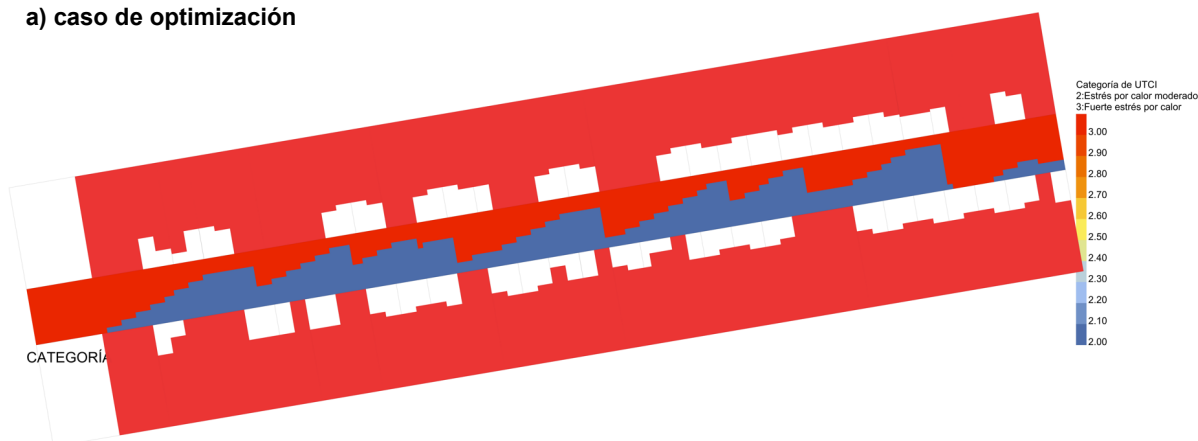


En cuanto a las categorías de estrés térmico y el estado térmico de un sujeto dentro del cañón urbano, no mostraron alteraciones, por consiguiente, el ambiente térmico dentro del cañón sigue presentando estrés por calor, sin embargo la percepción térmica insatisfactoria se presenta durante menos horas del día, por otro lado, se registró una variación en la distribución espacial de las condiciones de UTCI a diferencia del caso base Figura 77 (b) donde la mayor parte del cañón se localiza en una escala +3= fuerte estrés por calor ($32 \leq \text{UTCI} < 38$), en el caso de optimización morfológica se ubica en la escala +2= estrés por calor moderado ($28 \leq \text{UTCI} < 32$).

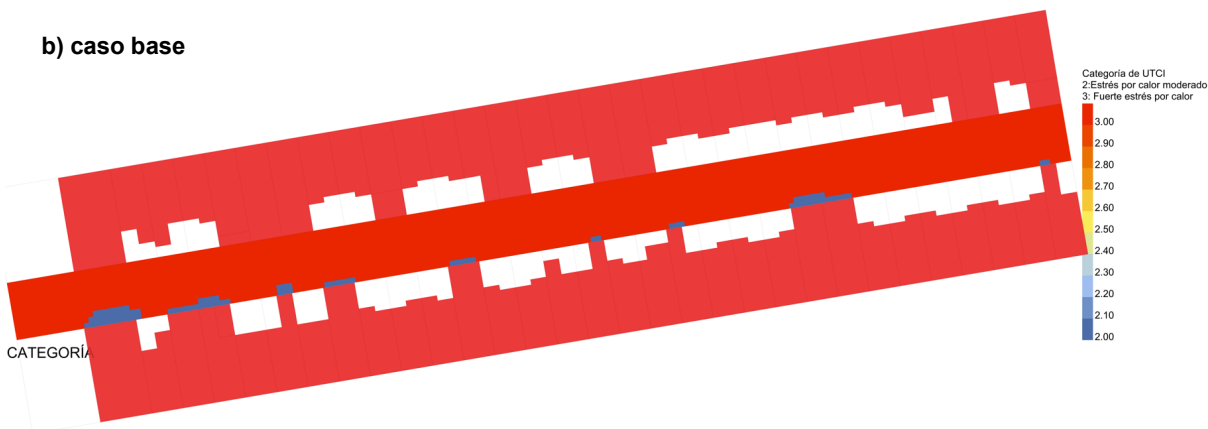
Figura 77.

Análisis por categoría de las condiciones de UTCI para la hora cálida del día cálido extremo (adimensional) a) caso base y b) caso de optimización morfológica

a) caso de optimización



b) caso base



Se elaboro una tabla síntesis con los valores obtenidos de los distintos análisis encontrados en el escenario base respecto al escenario de optimización morfológica (Tabla 25). Esta permite visualizar los rangos y diferencias en los valores de las variables analizadas.

Tabla 25.

Comparación de los valores obtenidos de los distintos análisis realizados en el caso de optimización morfológica respecto al caso base

Síntesis de los valores obtenidos de los distintos análisis realizados en el escenario base respecto al escenario de optimización morfológica				
Variable	Caso base		Caso de optimización morfológica	
Relación de aspecto	HW<1	0.54	HW>2	2.26
Variable	Rango	Centro del cañón	Rango	Centro del cañón
Radiación solar	1.15 – 6.39 kWh/m ²	6.39 kWh/m ²	1.14 – 5.76 kWh/m ²	4 kWh/m ²
Iluminación solar directa	2 h 00 – 13 h 00	11 h 00	1 h 00 – 11 h 00	7 h 00
Factor de cielo visible	60 – 95 %	85 %	30 – 78 %	45%
UTCI	30.54 – 36.82 °C	35 °C	39.06 – 35.85 °C	33 °C
Categoría UTCI	Estrés térmico			
Estado térmico	+1: Caliente		+1: Caliente	
Condiciones de UTCI	+2: Estés por calor moderado (28<=UTCI<32)	+3: Fuerte estrés por calor (32<=UTCI<38)	+2: Estés por calor moderado (28<=UTCI<32)	+2: Estés por calor moderado (28<=UTCI<32)
	+3: Fuerte estrés por calor (32<=UTCI<38)		+3: Fuerte estrés por calor (32<=UTCI<38)	

DISCUSIÓN

La composición geométrica de los cañones urbanos (como la relación de aspecto, el SVF, la orientación de la calle y los materiales de las superficies) juega un papel clave en el incremento del fenómeno ICU, esto aunado a las variables meteorológicas de la ciudad (radiación solar, humedad relativa, temperatura del aire, velocidad y dirección del viento) contribuye a la intensidad de las ICU (Rajagopalan et al., 2014). En este sentido, la variación del microclima urbano se encuentra estrechamente relacionada con la estructura morfológica de las ciudades, de modo que una mala relación de aspecto y disposición de los edificios altera el ambiente térmico dentro de los cañones urbanos, aumenta el consumo de energía y causa problemas graves de salud (He et al., 2020; Santamouris, 2015).

En cuanto, a los resultados obtenidos, estos muestran un potencial significativo de obstrucción al acceso solar dada una mayor relación de aspecto como resultado de la densificación vertical del caso de optimización morfológica. Los cañones urbanos con una relación de aspecto mayor están asociados con temperaturas generalmente inferiores durante el día y superiores por la noche, esto se debe a que al aumentar la relación de aspecto del cañón base $HW < 1$ a $HW > 2$ cañón de optimización morfológica, el SVF se ve afectado, la tasa de obstrucción aumentó hasta un 40 % de 85% a 45%, un SVF bajo indica menor fracción del cielo visible, por ende menor radiación directa sobre las superficies del cañón durante el día, aumento del porcentaje de sombras y reducción de las temperaturas superficiales y del aire, no obstante por las noches el flujo de calor en la superficie incrementa por la acumulación del calor por radiación de onda larga, es decir, el efecto de enfriamiento disminuye, sin embargo, el análisis de microclima realizado para comparar los niveles de temperatura del caso de optimización morfológica respecto al caso base a las 23 h 00 del día cálido extremo mostro que la diferencia de temperatura es menor a 0.70 °C.

En un estudio comparativo realizado por Williamson et al., (2009), se enfatizó aún más el papel de los cañones urbanos profundos en el desarrollo de las islas frías durante el día, debido a la sombra proyecta de los edificios que conforman al cañón y, en general, a la menor exposición radiante de la superficie del suelo. No obstante,

también expresaron su preocupación por posibles islas de calor intensas diurnas debido a un SVF más bajo.

Por otra parte, un estudio realizado por Andreou (2013), sobre el valor óptimo para la relación de aspecto de los cañones, menciona que este puede variar en función a la orientación de la calle, para calles orientadas al este-oeste, recomienda que se considere una relación de aspecto $HW > 3$, sin embargo, su estudio se realizó en la Isla de Tenos, Grecia, la cual presenta una temperatura superior al de la ciudad de Ensenada, de tal manera que requiere de una relación de aspecto mayor para enfriar el ambiente térmico de los cañones urbanos orientados al E-W. La ciudad de Ensenada con una relación de aspecto $HW > 2$ se logró reducir el índice UTCI hasta 2 °C de 35 °C a 33 °C al centro geométrico del cañón urbano.

Con relación a la mecánica de fluidos, los cañones urbanos modifican la velocidad y dirección de los vientos. Dado que el viento es oblicuo al cañón, se genera un flujo de viento que gira verticalmente con un vórtice primario centrado dentro del cañón (Lien et al., 2004). Al maximizar la relación de aspecto $HW > 2$ se crea mayor turbulencia en el viento, aumentando el potencial de enfriamiento de este, sin embargo, la velocidad el viento incrementa con la altura, pero a nivel de los techos de las edificaciones por lo que el flujo de aire cerca de la calle disminuye. En un estudio realizado por Oke (1987), sobre el flujo del viento en dirección oblicua y perpendicular para cañones urbanos con diferentes relación de aspecto, encontró que en cañones urbanos con una relación $HW > 1$ se crea un único movimiento turbulento al interior de este. No obstante, al centro del cañón registro una menor velocidad debido al roce de los muros.

Se está trabajando bajo una premisa de redensificación urbana en la que se da por hecho que las ciudades crecerán verticalmente, por lo que se está contemplando en relación al calentamiento global. Dado que los edificios crecerán se decidió estudiar este crecimiento de acuerdo con las limitantes propuestas por el PDUCP 2030. Sin embargo, se encontró que, si la política de redensificación o instrumentos de ordenamiento y planeación territorial de los centros urbanos opta por la contención de modelos dispersos de crecimiento urbano a través del desarrollo vertical de las

ciudades, tendrán que precisar las medidas que permitan la ocupación y usos de suelo con frentes y fondos de lotes habitacionales consecuentes con la tipología y régimen de propiedad condominal.

Por otro lado, Back, Hammel y Shwefel (1997) afirman que "la ventaja más significativa de usar la búsqueda evolutiva radica en la ganancia de flexibilidad y adaptabilidad a la tarea en cuestión", y mientras que la solución óptima para un problema de un solo objetivo está claramente definida, los problemas multiobjetivos requieren de "mecanismos de búsqueda robustos y poderosos" (p.13, Bäck et al., 1997) de los algoritmos evolutivos para encontrar las soluciones más aptas que tomen en consideración cada uno de los objetivos asignados de manera simultánea. El experimento resultó favorecedor al generar un conjunto diverso de soluciones a lo largo de las generaciones que se desempeñaron cada vez mejor con respecto a sus criterios de aptitud. Si bien, el tamaño de la población fue reducido, los resultados brindaron diversas soluciones óptimas en respuesta a los múltiples objetivos. Asimismo Navarro (2018) recomienda aumentar la tasa y probabilidad de mutación cuando se cuenta con una baja población, esto puede ayudar a aumentar la fuerza exploratoria, sin embargo, la simulación puede verse afectada en términos de tiempo.

CONCLUSIONES

En general, los resultados obtenidos de la presente investigación muestran que al aumentar la relación de aspecto del cañón urbano del caso base a un $HW > 2$, se reduce la cantidad total de radiación entrante que llega a la superficie del cañón. La radiación máxima alcanzada para el escenario base fue de 6.39 kWh/m^2 la cual se presentó al centro geométrico del cañón, mientras que la del escenario de optimización morfológica fue de 4 kWh/m^2 para la misma área, lo que representa una reducción de hasta 2.3 kWh/m^2 .

La iluminación solar directa también se vio afecta por la altura de las edificaciones, lo que ocasionó una disminución de hasta 4 h 00 en promedio dentro del cañón. El caso base presentó un total de 11 h 00 de luz solar disponible, mientras que el caso de optimización morfológico presentó un total de 7h 00. Del mismo modo, se observa

una disminución en el índice UTCI de hasta 2 °C, lo que proporcionó entornos urbanos térmicamente más frescos durante los calurosos días de verano, esto se debe a la tasa de obstrucción que aumentó un 40 %, lo que ocasionó un incremento en la proyección de sombra generadas por las edificaciones sobre la superficie del cañón urbano y por ende una exposición radiante menor de la superficie de la calle y aceras. No obstante, el efecto de enfriamiento por las noches se retrasa, lo que conlleva a un incremento 0.70 °C en los valores de UTCI para el escenario de optimización morfológica respecto al escenario base.

En cuanto a las categorías de estrés térmico y el estado térmico de un sujeto dentro del cañón urbano, no mostraron alteraciones, por consiguiente, el ambiente térmico dentro del cañón sigue presentando estrés por calor, sin embargo la percepción térmica insatisfactoria se presenta durante menos horas del día, por otro lado, se registró una variación en la distribución espacial de las condiciones de UTCI a diferencia del caso base, donde la mayor parte del cañón se localiza en una escala +3= fuerte estrés por calor ($32 \leq \text{UTCI} < 38$), en el caso de optimización morfológica se ubica en la escala +2= estrés por calor moderado ($28 \leq \text{UTCI} < 32$).

Respondiendo a la pregunta de investigación ¿Cómo la optimización morfológica de un cañón urbano a través de técnicas algorítmicas de diseño evolutivo podría ser útil en la mitigación de la isla de calor urbana a microescala? la optimización geométrica del tejido urbano por medio de la implementación del algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II permite analizar y evaluar multifactorialmente bajo un principio evolutivo de elitismo, un conjunto de escenarios morfológicos y sus implicaciones en el ambiente térmico a fin de mitigar el sobrecalentamiento del microclima derivado de la isla de calor en un cañón urbano, por lo que la hipótesis planteada fue comprobada.

En relación a los límites establecidos al algoritmo, estos se encuentran restringidos por la normatividad vigente de la Ciudad de Ensenada, así como las condiciones climáticas de esta. Básicamente este método se puede aplicar a otras condiciones con diferentes variables de diseño y diferentes objetivos de aptitud, pero se deberá de tomar en cuenta la influencia de las diferentes condiciones climáticas y normatividad en el diseño del algoritmo, también puede ser aplicado en diferentes escalas.

La aplicación de algoritmos evolutivos multiobjetivo (MOEA) como herramienta de optimización en problemas complejos con múltiples variables, han demostrado ser un enfoque ventajoso. Los MOEA son ideales para problemas que no tiene una única solución óptima, por ejemplo, en el diseño, muestran un potencial para la generación de alternativas de diseño candidatas que varían en diversidad morfológica en respuesta a los objetivos de aptitud que impulsan el algoritmo. A diferencia del proceso de diseño tradicional que perfecciona una única solución de diseño. Sin embargo, a medida que aumenta el nivel de complejidad del algoritmo, se requiere de mayor tiempo y capacidad de cómputo, por lo tanto, los procesos de simulación suelen ser largos, un tamaño de población (individuos y generaciones) más amplio genera una mayor diversidad morfológica y permite una mayor optimización de los objetivos de aptitud.

FUTURAS INVESTIGACIONES

Explorar otras vertientes de la problemática que tienen que ver con la energía, los consumos máximos de electricidad, la insuficiencia energética antes las condiciones de vulnerabilidad sociodemográfica; conceptos como el de penalidad energética (*energy penalty*) son cada vez más estudiados dentro de esta problemática.

El estudio presentado tiene un alcance limitado, el objetivo consistía en mitigar los efectos causados por la ICU a través de la optimización de un cañón urbano de estudio, por lo tanto, se estudiaron escenarios con diferentes composiciones morfológicas por medio de diseño evolutivo y para el día cálido extremos, sin embargo es importante mencionar que se deben realizar estudios a lo largo de un año, para analizar el efecto de una relación de aspecto mayor sobre la temperatura en la superficie del suelo durante los días fríos de la ciudad. También se recomienda llevar a cabo análisis de mecánica de fluidos en los diferentes escenarios de composición morfológica dado que también se espera que los edificios con mayor altura afecten los patrones de viento en el área.

REFERENCIAS

- 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., & Bioria, 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>
- Academia Mexicana de Computación, A. C. (2017). Computación Evolutiva. In L. A. Pineda Cortés (Ed.), *La computación en México por especialidades académicas* (Vol. 1, Issue 1997, pp. 67–82). <http://www.amexcomp.mx/files/libro/Cap 8.pdf>
- Acosta, J., Nebot, A., & Fuertes, J. M. (2006). *Método Multiobjetivo de Aprendizaje para Razonamiento Inductivo Difuso*. 38. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/86170/R06-35.pdf>
- Adolphe, L. (2001). A simplified model of urban morphology: Application to an analysis of the environmental performance of cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28(2), 183–200. <https://doi.org/10.1068/b2631>
- 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>
- Alchapar, N. L., Correa, E. N., & Cantón, M. A. (2013). Influencia del envejecimiento de los materiales en su desempeño térmico. El caso de revestimientos texturados para fachadas. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 33(2), 282–291. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522013000200014
- Aleksandrowicz, O., Vuckovic, M., Kiesel, K., & Mahdavi, A. (2017). Current trends in

- urban heat island mitigation research: Observations based on a comprehensive research repository. *Urban Climate*, 21(February), 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.04.002>
- Alvarado, C., Herazo, I., Ardila Castro, C., & Donoso Meisel, Y. (2005). Aplicación de NSGA-II y SPEA-II para la optimización multiobjetivo de redes multicast. *Ingeniería y Desarrollo: Revista de La División de Ingeniería de La Universidad Del Norte*, 17, 28–53.
- Andrades, M., & Muñoz, C. (2012). *Fundamentos de Climatología*. <https://www.studocu.com/es/document/uned/meteorologia-y-climatologia/fundamentos-de-climatologia/9037369>
- Andreou, E. (2013). Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate. *Renewable Energy*, 55, 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.040>
- Arens, E., Hoyt, T., Zhou, X., Huang, L., Zhang, H., & Schiavon, S. (2015). Modeling the comfort effects of short-wave solar radiation indoors. *Building and Environment*, 88, 3–9. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2014.09.004>
- Arlette, D., Devesa, C., & Cruz, V. M. (2018). Mapas de riesgo por temperaturas máximas. *Sistema Nacional de Protección Civil Centro Nacional de Prevención de Desastres*.
- Armendariz-Lopez, J. F., Luna-Leon, A., Gonzalez-Trevizo, M. E., Arena-Granados, A. P., & Bojorquez-Morales, G. (2016). Life cycle cost of photovoltaic technologies in commercial buildings in Baja California, Mexico. *Renewable Energy*, 87, 564–571. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.051>
- Arriaga, & Cavazos. (2010). *Qué puede suceder en el siglo XXI (en Ensenada y en el resto del planeta)*.
- Ayuntamiento Ensenada. (2007). *Reglamento de la Ley de Edificaciones para el municipio de Ensenada, Baja California*. 51, 1–94. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Estatal/wo19132.pdf>
- Bäck, T., Hammel, U., & Schwefel, H. P. (1997). Evolutionary computation: Comments

- on the history and current state. *Evolutionary Computation: The Fossil Record*, 1(1), 15–28. <https://doi.org/10.1109/9780470544600.ch1>
- Barrera, C. (2010). *Algoritmos Genéticos como Estrategia de Diseño en Arquitectura*. 258. <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>
- Bartesaghi-Koc, C., Haddad, S., Pignatta, G., Paolini, R., Prasad, D., & Santamouris, M. (2021). Can urban heat be mitigated in a single urban street? Monitoring, strategies, and performance results from a real scale redevelopment project. *Solar Energy*, 216(September 2020), 564–588. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.043>
- 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(March), 486–508. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.008>
- Battista, G., de Lieto Vollaro, R., & Zinzi, M. (2019). Assessment of urban overheating mitigation strategies in a square in Rome, Italy. *Solar Energy*, 180(January), 608–621. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.074>
- Berdahl, P., Chen, S. S., Destailats, H., Kirchstetter, T. W., Levinson, R. M., & Zalich, M. A. (2016). Fluorescent cooling of objects exposed to sunlight - The ruby example. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 157, 312–317. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.05.058>
- Blender, M. (2015). *Isla de calor urbana*. Arquitectura & Energía. <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/isla-de-calor-urbana/>
- Booker, L. B., Goldberg, D. E., & Holland, J. H. (1989). Classifier systems and genetic algorithms. *Artificial Intelligence*, 40(1–3), 235–282. [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(89\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0004-3702(89)90050-7)
- Campana, J. (2019). Ladybug Primer. *Natural Selections*, 1–1479. <https://doi.org/10.2307/j.ctt20q1tjm.33>
- Camporeale, P. (2017). *El uso de algoritmos genéticos aplicados al diseño ambiental paramétrico*. 295.

- Cardinali, M., Pisello, A. L., Piselli, C., Pigliautile, I., & Cotana, F. (2020). Microclimate mitigation for enhancing energy and environmental performance of Near Zero Energy Settlements in Italy. *Sustainable Cities and Society*, 53(March 2019), 101964. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101964>
- Carrasco, C., Palme, M., & Gálvez, M. A. (2016). *Factor de cielo visible y el efecto isla de calor en Valparaíso*.
- Chandler, T. J. (1961). Surface breeze effects of Leicester's heat island. *East. Midland Geogr. Nottingham*, 15, 32–38.
- Chatzidimitriou, A., & Yannas, S. (2017). Street canyon design and improvement potential for urban open spaces; the influence of canyon aspect ratio and orientation on microclimate and outdoor comfort. *Sustainable Cities and Society*, 33(February), 85–101. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.019>
- Chen. (2020). Investigation of outdoor thermal sensation and comfort evaluation methods in severe cold area. *Science of the Total Environment*, 749(66), 141520. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141520>
- Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., & He, Z. (2012a). Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: A GIS-based simulation approach. *International Journal of Climatology*, 32(1), 121–136. <https://doi.org/10.1002/joc.2243>
- Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., & He, Z. (2012b). Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach. *International Journal of Climatology*, 32(1), 121–136. <https://doi.org/10.1002/joc.2243>
- Chokhachian, A., Perini, K., Giulini, S., & Auer, T. (2017). Mathematical Generative Approach on Performance Based Urban Form Design. *International Conference on Urban Comfort and Environmental Quality*, September, 1–5.
- COPLADE. (2017). Ensenada. *Investigación y Ciencia*, 484, 98.

- Correa, C., Bolaños, R., & Molina, A. (2008). Algoritmo Multiobjetivo Nsga-ii Aplicado Al Problema De La Mochila. *Scientia Et Technica*, XIV(39), 206–211. <https://doi.org/10.22517/23447214.3205>
- 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>
- Davis, D. (2013). *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*. February. https://ap-st01.ext.exlibrisgroup.com/61RMIT_INST/storage/alma/C8/88/54/E6/31/F8/FD/A8/2F/59/9A/E5/3A/C3/A9/9C/Davis.pdf?Expires=1626069818&Signature=KrvUCqJIKvw63LST-5HcPZvGMLuUT4En5~83O~KnNhGs3p8Cpi5Akr~UWNXKA~5B5L3~z0ARB3dC~QeA2YIkY3gFu4fBIWKDJuOmafPw-
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- 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, 101966. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101966>
- Díaz Caravantes, R., Castro Luque, A., & Aranda Gallegos, P. (2014). Mortalidad por calor natural excesivo en el noroeste de México: Condicionantes sociales asociados a esta causa de muerte. *Mortalidad Por Calor Natural Excesivo En El Noroeste de México: Condicionantes Sociales Asociados a Esta Causa de Muerte*, 26(52), 155–177. <https://doi.org/10.17428/rfn.v26i52.107>
- Diccionario de Arquitectura y Construcción. (2021). *Temperatura radiante media*. <https://www.parro.com.ar/definicion-de-temperatura+radiante+media+%28TRM%29>
- Dirksen, M., Ronda, R. J., Theeuwes, N. E., & Pagani, G. A. (2019a). Sky view factor

- calculations and its application in urban heat island studies. *Urban Climate*, 30(May), 100498. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100498>
- Dirksen, M., Ronda, R. J., Theeuwes, N. E., & Pagani, G. A. (2019b). Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. *Urban Climate*, 30(July), 100498. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100498>
- Du, Y., Mak, C. M., & Li, Y. (2019). A multi-stage optimization of pedestrian level wind environment and thermal comfort with lift-up design in ideal urban canyons. *Sustainable Cities and Society*, 46(October 2018), 101424. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101424>
- Emmanuel, R., & Krüger, E. (2012). Urban heat island and its impact on climate change resilience in a shrinking city: The case of Glasgow, UK. *Building and Environment*, 53, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.020>
- Ene, S., Küçükoğlu, İ., Aksoy, A., & Öztürk, N. (2016). A genetic algorithm for minimizing energy consumption in warehouses. *Energy*, 114, 973–980. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.045>
- Evans, J. M. (2007). *The Comfort Triangles: A New Tool for Bioclimatic Design*. September, 315.
- Evola, G., Costanzo, V., Magrì, C., Margani, G., Marletta, L., & Naboni, E. (2020). A novel comprehensive workflow for modelling outdoor thermal comfort and energy demand in urban canyons: Results and critical issues. *Energy and Buildings*, 216, 109946. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109946>
- Ferretti, M., & Arreola, M. (2012). Del tejido urbano al tejido social: análisis de las propiedades morfológicas y funcionales. *Revista Electrónica Nova Scientia*, 5, 98–126. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052013000100008
- Fink, T., Koenig, R., & Weimar, U. (2018). *Integrated Parametric Urban Design in Grasshopper / Rhinoceros 3D Demonstrated on a Master Plan in Vienna*. 3(Feng 2009), 313–322.
- Fiorito, F., Cannavale, A., & Santamouris, M. (2020). Development, testing and

- evaluation of energy savings potentials of photovoltachromic windows in office buildings. A perspective study for Australian climates. *Solar Energy*, 205(February), 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.080>
- Franco, B. (2016). Variables climatológicas y los elementos constructivos y paisajísticos. *Departamento de Investigación*. <https://www.columbia.edu.py/presencial/arquitectura/revista-cientifica/articulos-de-investigacion/224-variables-climatologicas-y-los-elementos-constructivos-y-paisajisticos>
- Frazer, J. (1995). *An Evolutionary Architecture* (P. Johnston (ed.)). Architectural Association Publications. <http://www.johnfrazer.com/author.html>
- Gál, T., Rzepa, M., Gromek, B., & Unger, J. (2007). *Comparison between Sky View Factor values computed by two different methods in an urban environment*. 17–26.
- Garcia, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificacion climatica de Köppen* (Universidad Nacional Autonoma de Mexico (ed.); 5ta Edicio). Universidad Nacional Autonoma de Mexico.
- Garshasbi, S., & Santamouris, M. (2019). Using advanced thermochromic technologies in the built environment: Recent development and potential to decrease the energy consumption and fight urban overheating. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 191(October 2018), 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.10.023>
- 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 (GOCl). In *Building and Environment* (Vol. 130). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.021>
- Guattari, C., Evangelisti, L., & Balaras, C. A. (2018). On the assessment of urban heat island phenomenon and its effects on building energy performance : A case study of Rome (Italy). *Energy & Buildings*, 158, 605–615. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.050>
- Hamdan, D. M. A., & de Oliveira, F. L. (2019). The impact of urban design elements on

- microclimate in hot arid climatic conditions: Al Ain City, UAE. *Energy and Buildings*, 200, 86–103. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.028>
- Hamdi, R., & Schayes, G. (2009). Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics. *International Journal of Climatology*, 28(7), 973–982. <https://doi.org/10.1002/joc.1598>
- He, B. J., Ding, L., & Prasad, D. (2020). Relationships among local-scale urban morphology, urban ventilation, urban heat island and outdoor thermal comfort under sea breeze influence. *Sustainable Cities and Society*, 60(November 2019), 102289. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102289>
- Hernández, J. (2022). *Viento*.
- Hernández, R., Fernandez, C., & Baptista, M. del P. (2014). *Metodologia de la investigacion* (McGraw-Hill (ed.); 6ta ed.).
- Hernandez, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación. In *Journal of Materials Processing Technology* (6th ed., Vol. 1, Issue 1).
- Hu, Y., White, M., & Ding, W. (2016). An Urban Form Experiment on Urban Heat Island Effect in High Density Area. *4th International Conference on Countermeasure to Urban Heat Island*, 169, 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.020>
- Huang, K. T., & Li, Y. J. (2017). Impact of street canyon typology on building's peak cooling energy demand: A parametric analysis using orthogonal experiment. *Energy and Buildings*, 154, 448–464. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.054>
- Hudson, R. (2010). Strategies for parametric design in architecture: An application of practice led research. *Ph.D Thesis*, 274.
- IMIPENS. (2010). *Programa de desarrollo urbano de centro de población de Ensenada 2008-2030*. <http://imipens.org/wp-content/uploads/2012/04/PDUCP-E-2030-Ene-2009.pdf>
- INEGI. (2001). Sistema de Informacion geografica del Estado de Baja California. In Instituto Nacional de Estadistica Geografica e Informatica (Ed.), *Sistema de*

Informacion geografica del Estado de Baja California: Vol. 1er Volume. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática.

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (n.d.). *Radiación solar*. Retrieved May 23, 2022, from <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta>

IPCC. (2013). Cambio climático. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf

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, E., Rajagopalan, P., Seyedmahmoudian, M., & Jamei, Y. (2016). Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1002–1017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.104>

Johnson, G. T., Oke, T. R., Lyons, T. J., Steyn, D. G., Watson, I. D., & Voogt, J. A. (1991). Simulation of surface urban heat islands under “IDEAL” conditions at night part 1: Theory and tests against field data. *Boundary-Layer Meteorology*, 56(3), 275–294. <https://doi.org/10.1007/BF00120424>

Karssenberg, Laven, J., Glaser, M., & Van't Hoff, M. (2018). *The city at eye level* (M. G. & M. van 't H. Hans Karssenberg, Jeroen Laven (ed.); Eburon). https://thecityateyelevel.files.wordpress.com/2016/02/ebook_the-city-at-eye-level_english.pdf

Khan, H. S., Santamouris, M., Paolini, R., Caccetta, P., & Kassomenos, P. (2021). Analyzing the local and climatic conditions affecting the urban overheating magnitude during the Heatwaves (HWs) in a coastal city: A case study of the greater Sydney region. *Science of the Total Environment*, 755, 142515.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142515>

- Kim, H., Gu, D., & Kim, H. Y. (2018). Effects of Urban Heat Island mitigation in various climate zones in the United States. *Sustainable Cities and Society*, 41(January), 841–852. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.021>
- Kwinter, S. (2011). *Requiem for the city at the End of the Millennium*. 96–97.
- Lai, D., 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. (1981). *The urban climate* (Vol. 28). International Geophysics. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845719>
- Lau, K. K., Thorsson, S., Lindberg, F., Holmer, B., & Ka-, K. (2014). Street Geometry Design and its Effect on Mean Radiant Temperature : A Parametric Study based on Numerical Modelling. *9th International Conference on Urban Climate Jointly 12 Th Symposium on the Urban Environment*, 0–5.
- Lee, D. (1975). Rural atmospheric stability and the intensity of London's heat island. *Weather*, 30(4), 102–109. <https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1975.tb03342.x>
- Lien, F. S., Yee, E., & Cheng, Y. (2004). Simulation of mean flow and turbulence over a 2D building array using high-resolution CFD and a distributed drag force approach. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92(2), 117–158. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2003.10.005>
- 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>
- Luke, S. (2015). Essentials of metaheuristics. In *Morrisville: Vol. 2nd ed.* (Issue 3). <https://doi.org/10.1007/s10710-011-9139-0>
- Lutyens, D. (2019). *Mitigar el calentamiento urbano*. <http://www.rocagallery.com/es/mitigating-urban-heat->

islands?fbclid=IwAR0K8gWnFFZkabocklwSwlKvaUluBtJlvQVN8AaNlksTyH_kqc
D5Y-YFyF4

- Makki, M., Farzaneh, A., & Navarro, D. (2015). The Evolutionary Adaptation of Urban Tissues through Computational Analysis. *Ecaade 2015: Real Time - Extending the Reach of Computation*, 2, 563–571.
- Makki, M., Showkatbakhsh, M., Tabony, A., & Weinstock, M. (2019). Evolutionary algorithms for generating urban morphology: Variations and multiple objectives. *International Journal of Architectural Computing*, 17(1), 5–35. <https://doi.org/10.1177/1478077118777236>
- Manni, M., Bonamente, E., Lobaccaro, G., Goia, F., Nicolini, A., Bozonnet, E., & Rossi, F. (2020). Development and validation of a Monte Carlo-based numerical model for solar analyses in urban canyon configurations. *Building and Environment*, 170(November 2019), 106638. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106638>
- Manni, M., Lobaccaro, G., Goia, F., Nicolini, A., & Rossi, F. (2019). Exploiting selective angular properties of retro-reflective coatings to mitigate solar irradiation within the urban canyon. *Solar Energy*, 189(April), 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.045>
- Mateos, A. (2015). Algoritmos Evolutivos y Genéticos. *Inteligencia Artificial*, 3, 45. <http://www.it.uc3m.es/~jvillena/irc/practicas/estudios/aeag>
- 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). NoModelling 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>
- Middel, A., 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>
- Middel, A., Lukasczyk, J., Maciejewski, R., Demuzere, M., & Roth, M. (2018a). Sky

- View Factor footprints for urban climate modeling. *Urban Climate*, 25(February), 120–134. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.05.004>
- Middel, A., Lukasczyk, J., Maciejewski, R., Demuzere, M., & Roth, M. (2018b). Urban Climate Sky View Factor footprints for urban climate modeling. *Urban Climate*, 25(April), 120–134. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.05.004>
- Mirzaei, P. A. (2015). Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 19, 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.04.001>
- Mirzaei, P. A., & Haghighat, F. (2010). Approaches to study Urban Heat Island e Abilities and limitations. *Building and Environment*, 45(10), 2192–2201. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.001>
- Moonen, P., Defraeye, T., Dorer, V., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2012). Urban Physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand. *Frontiers of Architectural Research*, 1(3), 197–228. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2012.05.002>
- 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>
- Naboni, E., Natanian, J., Brizzi, G., Florio, P., Chokhachian, A., Galanos, T., & Rastogi, P. (2019). A digital workflow to quantify regenerative urban design in the context of a changing climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113(June), 109255. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109255>
- Nakata-Osaki, C. M., De Souza, L. C. L., & Rodrigues, D. S. (2015). A GIS extension model to calculate urban heat island intensity based on urban geometry. *CUPUM 2015 - 14th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management*.
- Nakata-Osaki, C. M., Souza, L. C. L., & Rodrigues, D. S. (2018). THIS – Tool for Heat Island Simulation: A GIS extension model to calculate urban heat island intensity based on urban geometry. *Computers, Environment and Urban Systems*, 67(July 2016), 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.09.007>

- Naranjo, J. (2014). Comparación de modelos físicos y perceptuales para determinar el confort térmico en distintos cañones urbanos de la ciudad de Concepción. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(1), 2071–2079. <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2013.06.007>
- Navarro-Mateu, D., Makki, M., & Cocho-Bermejo, A. (2018). Urban-tissue optimization through evolutionary computation. *Mathematics*, 6(10). <https://doi.org/10.3390/math6100189>
- Ng, E., & Cheng, V. (2012). Urban human thermal comfort in hot and humid Hong Kong. *Energy and Buildings*, 55, 51–65. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.025>
- Niachou, K. Ā., Livada, I., & Santamouris, M. (2008). *Experimental study of temperature and airflow distribution inside an urban street canyon during hot summer weather conditions . Part II: Airflow analysis*. 43, 1393–1403. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.040>
- Nouri, A. S., Costa, J. P., Santamouris, M., & Matzarakis, A. (2018). Approaches to outdoor thermal comfort thresholds through public space design: A review. *Atmosphere*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/atmos9030108>
- Novoa-Hernández, P. (2015). Optimización evolutiva multi-objetivo en la planificación de controles a clase en la educación superior cubana. *Computación y Sistemas*, 19(2), 321–335. <https://doi.org/10.13053/cys-19-2-2008>
- NU. CEPAL. (2013). Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina. *Respuestas Urbanas Al Cambio Climático En América Latina*, 160. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36622/S2013813_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- 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>
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates* (second).
- Oke, T. R. (1988a). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11(1–3), 103–113. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)

- Oke, T. R. (1988b). *Street Design and Urban Canopy Layer Climate*. 11, 103–113.
- ONU. (2001). *Implementing the Habitat Agenda - The 1996-2001 Experience* (Issue June). [https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/Implementing the Habitat Agenda - The 1996 - 2001 Experience.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/Implementing%20the%20Habitat%20Agenda%20-%20The%201996%20-%202001%20Experience.pdf)
- Park, C. Y., Yoon, E. J., Lee, D. K., & Thorne, J. H. (2020). Integrating four radiant heat load mitigation strategies is an efficient intervention to improve human health in urban environments. *Science of the Total Environment*, 698, 134259. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134259>
- Perini, K., Chokhachian, A., Dong, S., & Auer, T. (2017). Modeling and simulating urban outdoor comfort: Coupling ENVI-Met and TRNSYS by grasshopper. *Energy and Buildings*, 152, 373–384. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.061>
- Pisello, A. L., Saliari, M., Vasilakopoulou, K., Hadad, S., & Santamouris, M. (2018). Facing the urban overheating: Recent developments. Mitigation potential and sensitivity of the main technologies. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 7(4), 1–25. <https://doi.org/10.1002/wene.294>
- POEBC. (2014). Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Baja California. *Consejo Estatal de Protección Al Ambiente Del Estado de Baja California*, 34, 1–434. <http://www.spabc.gob.mx/wp-content/uploads/2018/04/DOCUMENTO-COMPLETO-POEBC-2014.pdf>
- Predictia. (2021). *Índice Climático: UTCI*. <https://predictia.es/es/news/UTCI-abc-climate-indices>
- Rajagopalan, P., Lim, K. C., & Jamei, E. (2014). Urban heat island and wind flow characteristics of a tropical city. *Solar Energy*, 107, 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.042>
- Rincón, J. (2019). *Confort térmico en interiores: Estimación con los enfoques adaptativo y predictivo* (Universidad Autónoma de Baja California (ed.); Coronel Ly).
- Rincón, J., & Fuentes, V. (2014). An alternative to facilitate and streamline preliminary studies. *Energy Procedia*, 57(55), 1374–1382.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.128>

Rotach, M. W., & Calanca, P. (2003). *Microclimate Street Canyon*. 26.

Roudsari, M. (2021). *Ladybug Primer*. 479.
<https://www.gitbook.com/book/mostapharoudsari/ladybug-primer/details>

Sakar, B. (2018). *Parametric Modelling for the Mitigation of Urban Heat* (Issue August).

Santamouris, M. (2015a). 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>

Santamouris, M. (2015b). 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>

Santamouris, M. (2016a). Innovating to zero the building sector in Europe: Minimising the energy consumption, eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change. *Solar Energy*, 128, 61–94.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.021>

Santamouris, M. (2016b). Innovating to zero the building sector in Europe: Minimising the energy consumption, eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change. *Solar Energy*, 128, 61–94.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.021>

Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>

Santamouris, M., Ding, L., Fiorito, F., Oldfield, P., Osmond, P., Paolini, R., Prasad, D., & Synnefa, A. (2017). Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy*, 154, 14–33.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.006>

- Santamouris, M., & Fiorito, F. (2021). On the impact of modified urban albedo on ambient temperature and heat related mortality. *Solar Energy*, 216(January), 493–507. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.031>
- Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85(12), 3085–3102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>
- Santamouris, M., & Yun, G. Y. (2020a). Recent development and research priorities on cool and super cool materials to mitigate urban heat island. *Renewable Energy*, 161, 792–807. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.109>
- Santamouris, M., & Yun, G. Y. (2020b). Recent development and research priorities on cool and super cool materials to mitigate urban heat island. *Renewable Energy*, 161, 792–807. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.109>
- Schinasi, L. H., Benmarhnia, T., & De Roos, A. J. (2018). Modification of the association between high ambient temperature and health by urban microclimate indicators: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Research*, 161(September 2017), 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.004>
- Scoin. (2019). *Humedad Relativa*. <https://www.secoin.com.uy/blog/humedad-relativa-qué-es-y-por-qué-es-importante-controlarla>
- Secretaría de Desarrollo Agrario, T. y U. (2016). *Redensificación vertical de las ciudades para detonar el desarrollo, propone la SEDATU*. <https://www.gob.mx/sedatu/prensa/redensificacion-vertical-de-las-ciudades-para-detonar-el-desarrollo-propone-la-sedatu>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Definición y objetivo de la evaluación del impacto ambiental*. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/definicion-y-objetivo-de-la-evaluacion-del-impacto-ambiental>
- Semadet, J. (2006). Cambio climático. *Adv. Mater.*, 4, 116. https://semadet.jalisco.gob.mx/sites/semadet.jalisco.gob.mx/files/cambio_climatico.pdf

- Shashua-Bar, L., Tsiros, I. X., & Hoffman, M. (2012). Passive cooling design options to ameliorate thermal comfort in urban streets of a Mediterranean climate (Athens) under hot summer conditions. *Building and Environment*, 57, 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.019>
- Sheikh, M., & Gerber, D. J. (2011). Building skin intelligence: A parametric and algorithmic tool for daylighting performance design integration. *Integration Through Computation - Proceedings of the 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, ACADIA 2011, June*, 170–177.
- Showkatbakhsh, M., & Makki, M. (2020). Application of homeostatic principles within evolutionary design processes: adaptive urban tissues. *Journal of Computational Design and Engineering*, 7(1), 1–17. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa002>
- Shukla, A. K., Sudhakar, K., & Baredar, P. (2017). Recent advancement in BIPV product technologies: A review. *Energy and Buildings*, 140, 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.015>
- 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.jobbe.2020.101262>
- Suyoto, W., Indraprastha, A., & Purbo, H. W. (2015). Parametric Approach as a Tool for Decision-making in Planning and Design Process . Case study : Office Tower in Kebayoran Lama. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 184(August 2014), 328–337. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.05.098>
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25(2), 99–103. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(96\)00999-1](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(96)00999-1)
- Takkanon, P. (2016). A study of height to width ratios and Urban Heat Island Intensity of Bangkok. *4th International Conference on Countermeasure to Urban Heat Island*, May.

https://www.researchgate.net/profile/Pattaranan_Takkanon/publication/304023198_A_study_of_height_to_width_ratios_and_Urban_Heat_Island_Intensity_of_Bangkok/links/5763ba7d08ae570d6e15cac5/A-study-of-height-to-width-ratios-and-Urban-Heat-Island-Intensity-of

Terzidis, K. (2009). Algorithms for visual design: Using the processing language. In *Wiley Publishing, Inc* (Vol. 66). https://doc.lagout.org/science/0_Computer Science/2_Algorithms/Algorithms for Visual Design.pdf

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., Tsikaloudaki, K., & Theodosiou, T. (2020). *Investigation Methods and Mitigation*.

Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K., Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K., & Modelling, N. G. (2014). *Modelling air quality in street canyons : a review*.

Villela, Lucia maria aversa. (2013). Programa estatal de acción ante el cambio climático de Baja California. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

Vuckovic, M., Loibl, W., Tötzer, T., & Stollnberger, R. (2019). Potential of urban densification to mitigate the effects of heat island in Vienna, Austria. *Environments - MDPI*, 6(7). <https://doi.org/10.3390/environments6070082>

Wang, W., Liu, K., Zhang, M., Shen, Y., Jing, R., & Xu, X. (2021). From simulation to data-driven approach: A framework of integrating urban morphology to low-energy urban design. *Renewable Energy*, 179, 2016–2035. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.024>

Wang, Y., & Akbari, H. (2016). The effects of street tree planting on Urban Heat Island mitigation in Montreal. *Sustainable Cities and Society*, 27(2016), 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.04.013>

- Williamson, T. J., Erell, E., & Soebarto, V. (2009). Assessing the error from failure to account for urban microclimate in computer simulation of building energy performance. *IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009*, 497–504.
- Woodbury, R., Williamson, S., & Beesley, P. (2017). Parametric Modelling As a Design Representation in Architecture: a Process Account. *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association*, 1(July). <https://doi.org/10.24908/pceea.v0i0.3827>
- Xu, L., Wang, J., Xiao, F., El-Badawy, S., & Awed, A. (2021). Potential strategies to mitigate the heat island impacts of highway pavement on megacities with considerations of energy uses. *Applied Energy*, 281(April 2020), 116077. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116077>
- Yang, J., Yang, Y., Sun, D., Jin, C., & Xiao, X. (2021). Influence of urban morphological characteristics on thermal environment. *Sustainable Cities and Society*, 72(May), 103045. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103045>

APÉNDICE

Apéndice 1. Pseudocódigo del algoritmo NSGA-II

Algoritmo NSGA-II (variante elitista controlada)

```

1:  $P \leftarrow \{x_1, x_2, \dots, x_\mu\}$  Generar aleatoriamente  $\mu$  individuos (población inicial)
2: Evaluar en la función objetivo, los individuos de  $P$ 
3:  $R \leftarrow \{R_1, R_2, \dots\}$  Determinar los conjuntos Pareto a partir de los rangos (posición) de  $P$ 
4: Calcular la distancia de separación de los individuos por cada conjunto  $R_i$ 
5:  $F_{mejor} \leftarrow$  conjunto de Pareto de  $P$ , esto es,  $R_1$ 
6:  $G \leftarrow 0$  contador del número de generaciones (iteraciones)
7: mientras  $G \leq G_{max}$  y  $F_{mejor}$  no es el deseado hacer
8:      $Q \leftarrow \text{generarHijos}(P)$  mediante Selección, Cruzamiento y Mutación
9:     Evaluar en la función objetivo a los individuos de  $Q$ 
10:     $Q \leftarrow Q \cup P$ 
11:     $P \leftarrow \emptyset$ 
12:     $R \leftarrow \{R_1, R_2, \dots\}$  Determinar los conjuntos Pareto a partir de los rangos (posición) de  $Q$ 
13:     $F_{mejor} \leftarrow$  Conjunto de Pareto de  $Q$ 
14:    por cada conjunto de Pareto  $R_i \in R$  hacer
15:        Calcular la distancia de separación de los individuos de  $R_i$ 
16:        si  $\|P\| + \|R_i\| \geq \mu$  entonces
17:            Añadir a  $P$ , los  $m - \|P\|$  individuos de  $R_i$  más diferentes (según distancia)
18:            salir del ciclo
19:        si no
20:             $P \leftarrow P \cup R_i$ 
21:     $G \leftarrow G + 1$ 
22: retornar  $F_{mejor}$ 

```

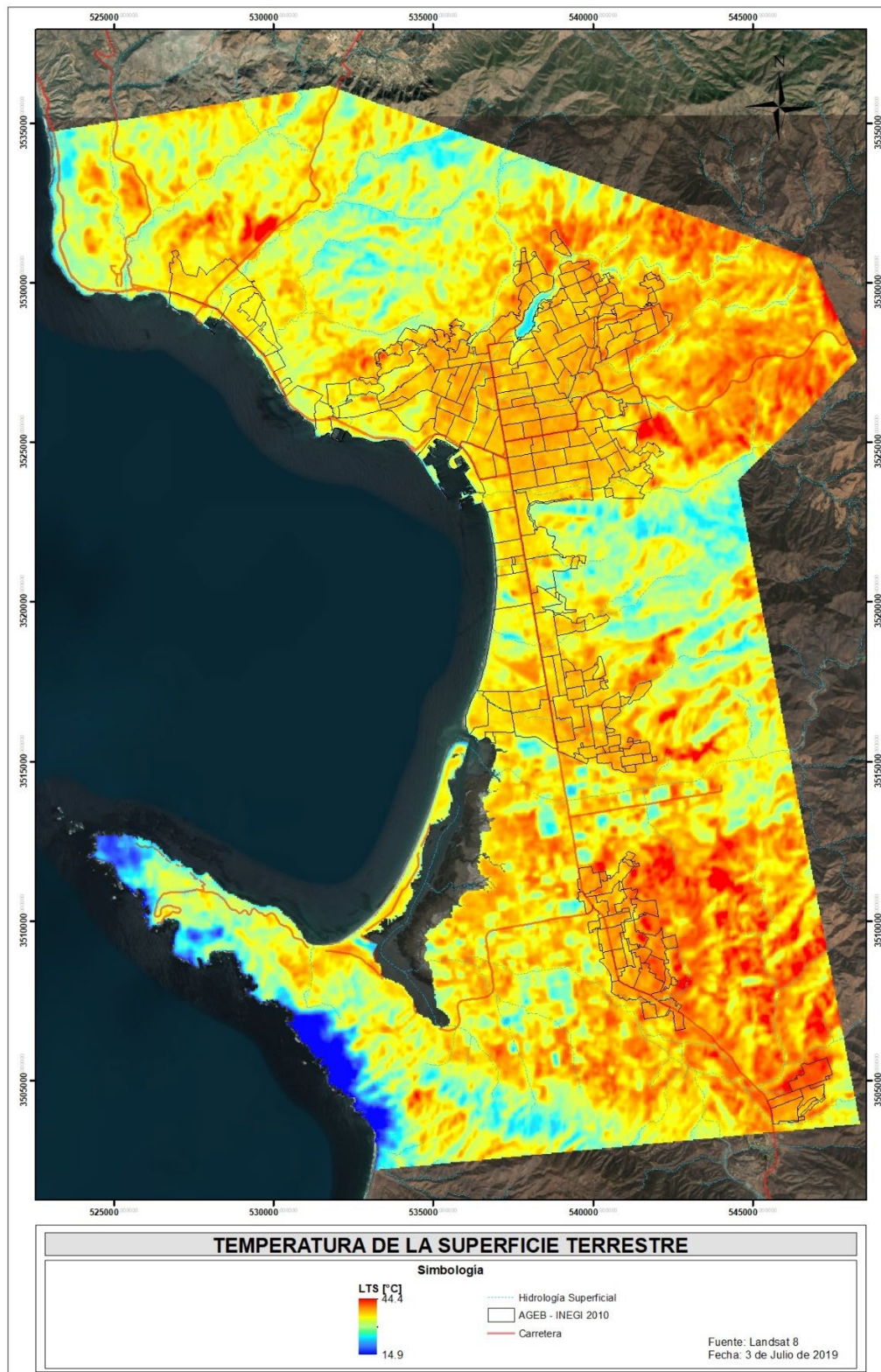
Obtenido a partir de “Optimización evolutiva multi-objetivo en la planificación de controles a clase en la educación superior cubana”, por Pavel Novoa Hernández. *Computación y Sistemas*, Vol. 19, No. 2, 2015, pp. 321–335doi: 10.13053/CyS-19-2-200

Apéndice 2. Análisis de AGEB y desviación respecto a la media

[illegible]

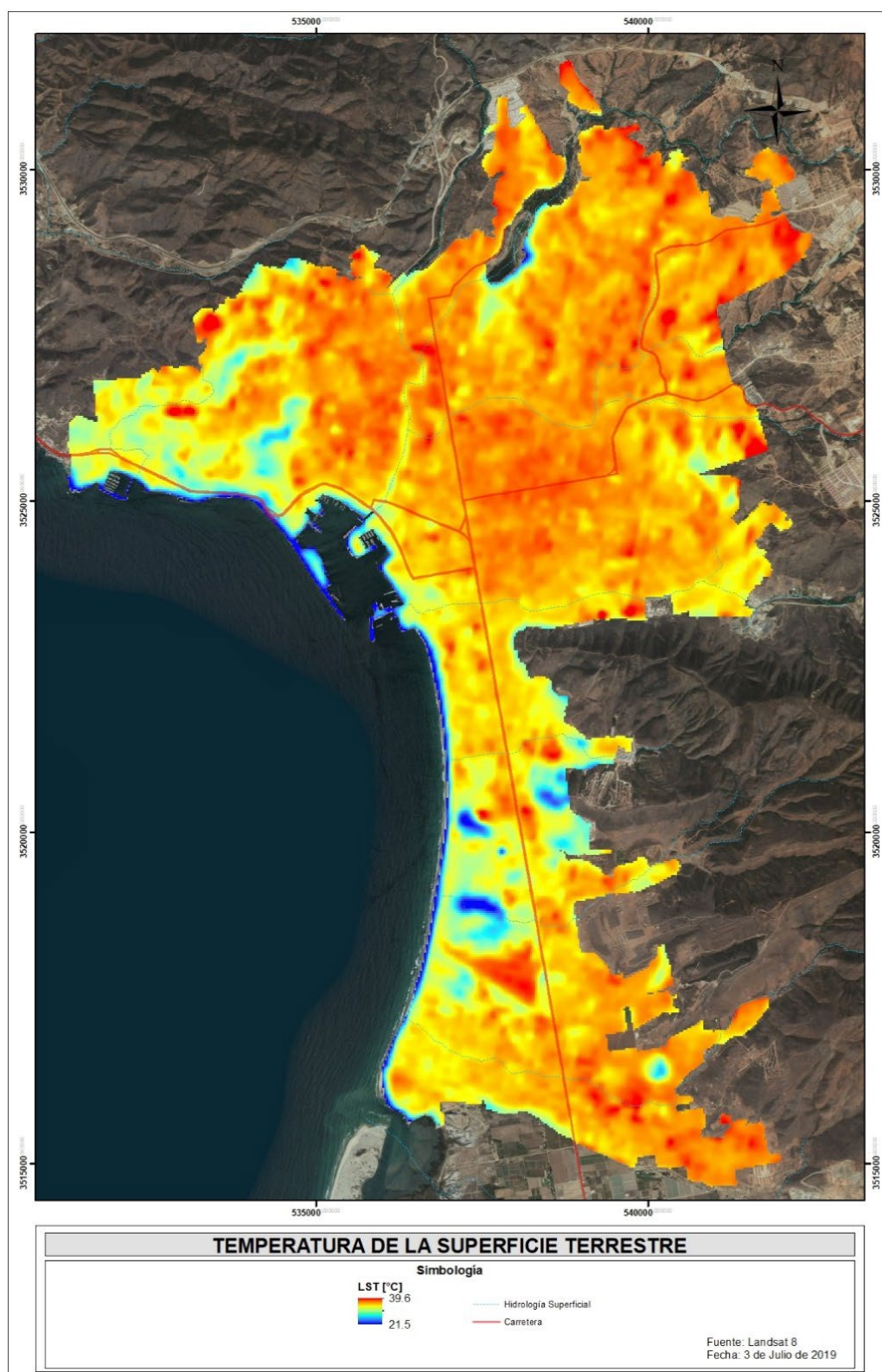
Elaboración a partir de datos obtenidos del SCIENCE 2020 del INEGI

Apéndice 3. Mapa de temperatura de la superficie terrestre con AGEB de Ensenada, B.C.



Obtenido a partir de Landsat 8

Apéndice 4. Mapa de temperatura de la superficie terrestre de Ensenada, B.C.



Obtenido a partir de Landsat 8

Apéndice 5. Render de la última generación (25 individuos) vista en isométrico



ANEXO

Anexo 1.

Reporte de análisis antiplagio

Optimización morfológica de cañones urbanos a través de diseño evolutivo como estrategia de mitigación de la isla urbana de calor

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorioinstitucional.uabc.mx Internet	747 palabras — 2%
2	www.cartaceleste.com.br Internet	179 palabras — < 1%
3	sidof.segob.gob.mx Internet	151 palabras — < 1%
4	es.scribd.com Internet	129 palabras — < 1%
5	imipens.org Internet	63 palabras — < 1%
6	revistascientificas.cuc.edu.co Internet	61 palabras — < 1%
7	oa.upm.es Internet	56 palabras — < 1%
8	hdl.handle.net Internet	49 palabras — < 1%

Nota: obtenido a partir de la herramienta iThenticate el 17/06/2022