

Optimización morfológica de cañones urbanos con diseño evolutivo para mitigar la isla urbana de calor

Morphological optimization of urban canyons with evolutionary design to mitigate the urban heat island

DOI: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i13.224>

NAYELI MONTSERRAT CASTREJÓN ESPARZA

Universidad Autónoma de Baja California, México. ORCID: 0000-0001-7243-0999.

Correo electrónico: nayeli.castrejon@uabc.edu.mx

MARCOS EDUARDO GONZÁLEZ TREVIZO

Universidad Autónoma de Baja California, México. ORCID: 0000-0002-7382-2641.

Correo electrónico: eduardo.gonzalez35@uabc.edu.mx

JORGE ARMANDO OJEDA SÁNCHEZ

Universidad de Colima, México. ORCID: 0000-0002-5026-5459.

Correo electrónico: jojeda1@ucol.mx

Recepción: 20 de junio de 2022. Aceptación: 07 de octubre de 2022.

RESUMEN

En el presente estudio se analiza a nivel microescala y bajo un enfoque cuantitativo, la optimización morfológica de un cañón urbano a razón de su relación geométrica de aspecto como estrategia de mitigación de la isla de calor urbano, esto a través de técnicas algorítmicas de diseño evolutivo. En las etapas iniciales del estudio se recurrió al uso de información climática interpolada, lo que permitió modelar un año meteorológico típico para un microclima templado seco. Los resultados obtenidos muestran un potencial significativo de obstrucción al acceso solar debido a una mayor relación de aspecto ($H/W > 2$) como resultado de la densificación vertical, lo que promovió la disminución del índice universal de confort térmico (UTCI) de hasta 2°C : de 35°C a 33°C al centro del cañón 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 de 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 cuatro horas menos de luz solar directa al centro del cañón, proporcionando entornos urbanos térmicamente más frescos. Sin embargo, es importante mencionar que se deben realizar estudios a lo largo de un año que permitan analizar el efecto de una relación de aspecto mayor sobre la temperatura en la superficie del suelo durante los días fríos de la ciudad, así como llevar a cabo análisis de mecánica de fluidos en los diferentes escenarios de composición morfológica, dado que se espera que los edificios con mayor altura afecten los patrones de viento en el área.

Palabras clave: algoritmos evolutivos, sobrecalentamiento urbano, isla de calor urbana, cañón urbano, estrategias de mitigación.

ABSTRACT

This study analyzes at the microscale level and under a quantitative approach, the morphological optimization of an urban canyon based on its

geometric aspect ratio as a mitigation strategy for an urban heat island, through evolutionary design algorithmic techniques. In the initial stages of the study, the use of interpolated climatic information was used, which allowed the modeling of a typical meteorological year for a dry temperate microclimate. The results obtained show a significant potential for obstruction to solar access due to a higher aspect ratio ($H/W > 2$) as a result of vertical densification, which promoted a decrease in the Universal Thermal Comfort Index (UTCI) of up to 2°C : from 35°C to 33°C to the center of the 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/m^2 , which represents a decrease of 2.3 kWh/m^2 and the hours of available sunlight decreased from 11:00 hours to 7:00 hours, which represents up to four hours less direct sunlight to the center of the canyon, providing thermally cooler urban environments. However, it is important to mention that studies must be carried out over a year to analyze the effect of a higher aspect ratio on the surface temperature of the ground during cold days in the city; likewise, carry out fluid mechanics analysis in the different morphological composition scenarios given that taller buildings are expected to affect wind patterns in the area.

Keywords: evolutionary algorithms, urban overheating, urban heat island, urban canyon, mitigation strategies.

INTRODUCCIÓN

El incremento de temperatura es el factor climático que más destaca porque 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 (Sakar, 2018).

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 (ICU), 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 y Yun, 2020; Santamouris, 2020). 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).

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 las zonas urbanas; elevan la concentración de CO_2 , provocan estrés por calor, aumento en los niveles de mortalidad y morbilidad e incrementan la demanda energética para efectos de climatización (Perini *et al.*, 2017; Santamouris, 2016; Schinasi *et al.*, 2018). Los aumentos en la demanda de enfriamiento causados por las ICU causarán un aumento de hasta 500% en las emisiones de CO_2 para el año 2050 para los edificios en los centros de las ciudades, en relación con los valores del año 2000 (Emmanuel y Krüger, 2012; Moonen *et al.*, 2012; Santamouris *et al.*, 2017).

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 prevé que las temperaturas medias anuales aumenten 1°C en los próximos 20 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 50 años la temperatura media anual incremente hasta 2.5° C (Arriaga y Cavazos, 2010).

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; asimismo, 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 y Yun, 2020; Semadet, 2006). Por ejemplo, México presentó en el año 2020 un total de 1,200 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 (Díaz Caravantes *et al.*, 2014).

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 en 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). Dado que la composición geométrica de los cañones urbanos ejerce 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 en hasta 3° C (Nouri *et al.*, 2018; Pisello *et al.*, 2018).

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 y Santamouris, 2019). 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.

Por otro lado, 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 en 19.8% por grado de caída de temperatura. 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. Carniello 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.

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 computacionales 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 y Haghghat, 2010); por ejemplo, el empleo de modelos evolutivos a través de algoritmos genéticos; estos modelos algorítmicos fueron aprobados y adoptados por diferentes autores en las últimas décadas y en diversas ramas como la ingeniería, la arquitectura, las matemáticas, la biología, entre otras. Los algoritmos evolutivos de optimización multiobjetivo permiten parametrizar soluciones óptimas en la estructura del tejido urbano a través de la manipulación de diferentes escenarios (Davis, 2013; Fink *et al.*, 2018; Karssenbergh *et al.*, 2018). Suyoto *et al.* (2015) describen 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).

Por ejemplo, Showkatbakhsh y Makki (2020), en su investigación titulada *Application of homeostatic principles within evolutionary design*

processes: Adaptive urban tissues mencionan que “las soluciones de diseño generativo asociadas con características morfológicas y climáticas responden de manera eficiente a las condiciones ambientales que impulsan al algoritmo” (p. 01). De igual manera Navarro-Mateu *et al.* (2018) hacen referencia en que “a partir del uso de la computación evolutiva es posible desarrollar un diseño bajo un solo modelo que aborde múltiples objetivos en conflicto” (p. 01).

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 evolutivo multiobjetivo 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.

En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo optimizar la morfología de un cañón urbano para que sea capaz de alcanzar proporciones geométricas de compacidad orientadas a mitigar el efecto de sobrecalentamiento derivado de la isla de calor a nivel microescala, esto a través de un principio evolutivo de elitismos, el cual garantiza que sólo serán seleccionados uno o un grupo de individuos o soluciones más aptas para la siguiente generación. 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 de estudio; finalmente se selecciona la solución óptima y es evaluada climáticamente. Los objetivos de aptitud definidos son: maximizar la densi-

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

METODOLOGÍA

Con el presente trabajo se busca optimizar a través de técnicas algorítmicas de diseño evolutivo, la morfología de un cañón urbano como estrategia de mitigación de la isla de calor a microescala. El diseño de la investigación es de tipo cuantitativo experimental, clasificada como una investigación cuasi-experimental. En cuanto al 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, se pretende explicar la correlación que existe entre: a) la configuración

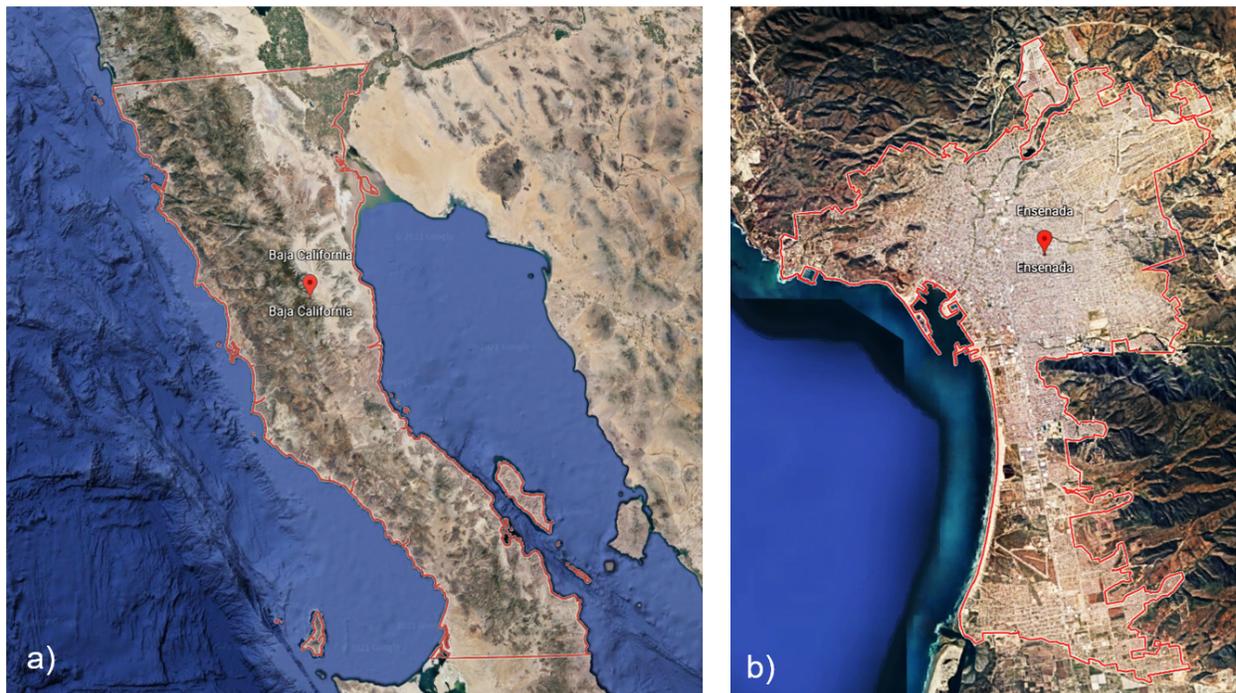
geométrica del cañón, y b) el microclima resultante en dicho cañón.

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 $28^{\circ} 00' 00''$ - $32^{\circ} 12' 10''$ de latitud norte y $116^{\circ} 53' 03''$ de longitud oeste, a 13 m sobre el nivel del mar (POEBC, 2014) (figura 1).

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 BSo 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 1

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



Fuente: elaborado a partir de Google Earth. Fecha de acceso 2021-04-05.

ÁREA DE ESTUDIO

La selección del área de estudio se llevó a cabo a través un análisis multicriterio, con el fin de identificar las zonas de mayor vulnerabilidad y bajos recursos que por sus características se vean gravemente afectados debido al 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, éstas son extensiones territoriales conformadas por un conjunto de manzanas o cuadras que subdividen a un municipio.

El objetivo consistió en 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). Los datos sociodemográficos de cada AGEB se obtuvieron por medio de la plataforma de Science 2020 del INEGI; posterior a ello se determinó la desviación respecto a la media de cada una de las variables mencionadas anteriormente, a través de la siguiente fórmula:

Ecuación 1. Desviación respecto a la media

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

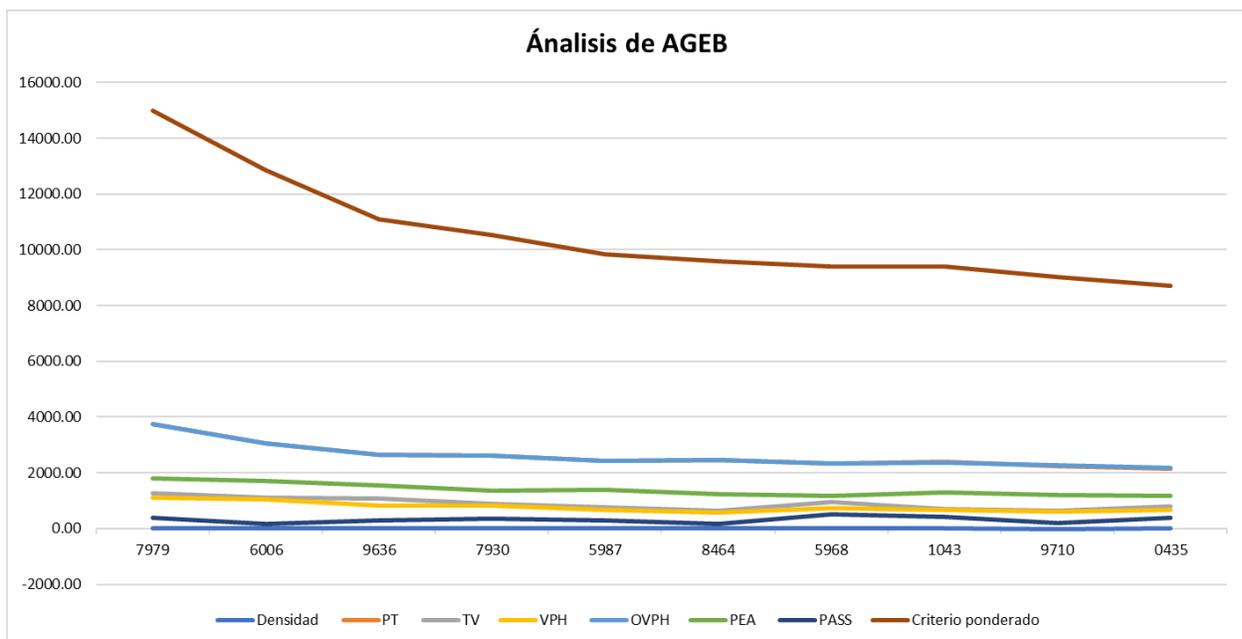
Donde:

xi: valor de la variable estadística.

\bar{x} : La media aritmética.

Dentro de este análisis se agregó una última variable denominada como “criterio ponderado”, ésta corresponde a la suma total de los datos

FIGURA 2
Gráfica de líneas



Nota: nomenclatura: PT (población total); TV (total de viviendas); VPH (viviendas particulares habitadas); OVPH (ocupantes en viviendas particulares habitadas); PEA (población de 12 y más económicamente activa), y PASS (población sin afiliación a servicios de salud).

Fuente: elaborada a partir de datos sociodemográficos obtenidos del Science 2020 del INEGI.

obtenidos de acuerdo con su medida de posicionamiento para identificar las AGEB críticas. Los datos obtenidos del análisis se presentan a través de una gráfica de líneas (figura 2). Esta gráfica es empleada para mostrar tendencias por categoría.

Las AGEB críticas encontradas en el análisis multicriterio (figura 2) se enlistan a continuación de manera descendente: 7979; 6006; 9636; 7930; 5987; 8464; 5968; 1043, 9710 y 0435. Posteriormente estas AGEB fueron comparadas con una imagen de satélite Landsat 8 que muestra la temperatura de la superficie terrestre (figura 3) 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 AGEB 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. En cuanto a la orientación, se identificaron cuatro tipos de orientaciones: N-S; E-W; NW-SE; y NE-SW. Según Abdollahzadeh y Biloría (2021), las orientaciones con más problemáticas son NW-SE y E-W.

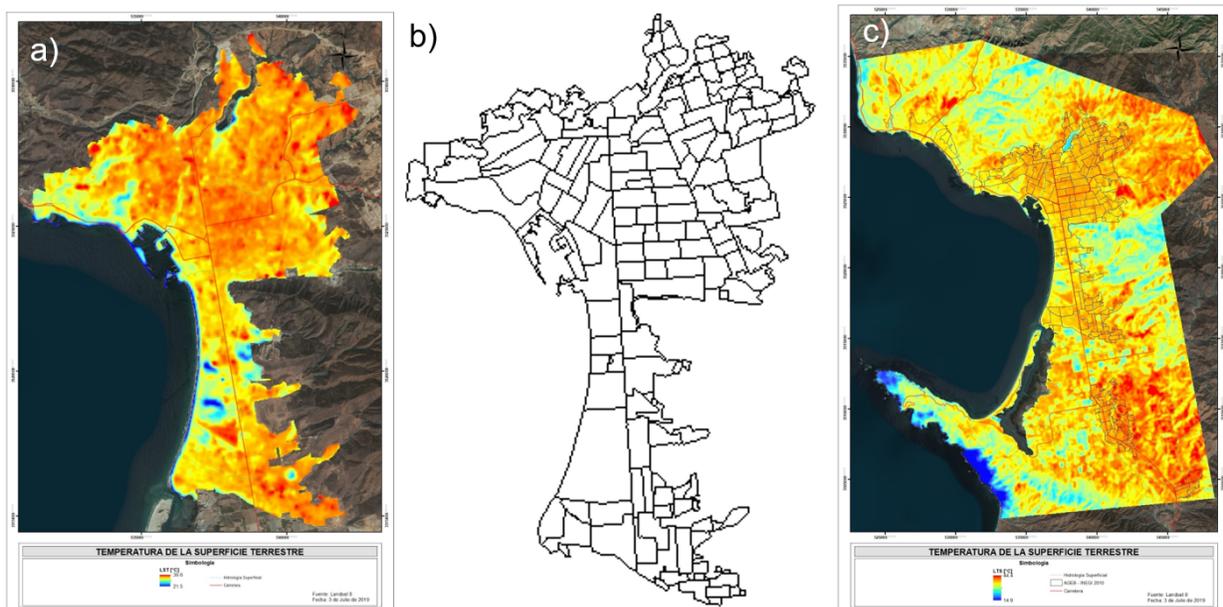
En la figura 4 se muestra la AGEB seleccionada para el área de estudio, que corresponde a la AGEB con clave 7979 (Fracc. Punta Banda I), debido a que fue la que presentó mayor vulnerabilidad sociodemográfica.

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 con base en 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. 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 y 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 coorde-

FIGURA 3

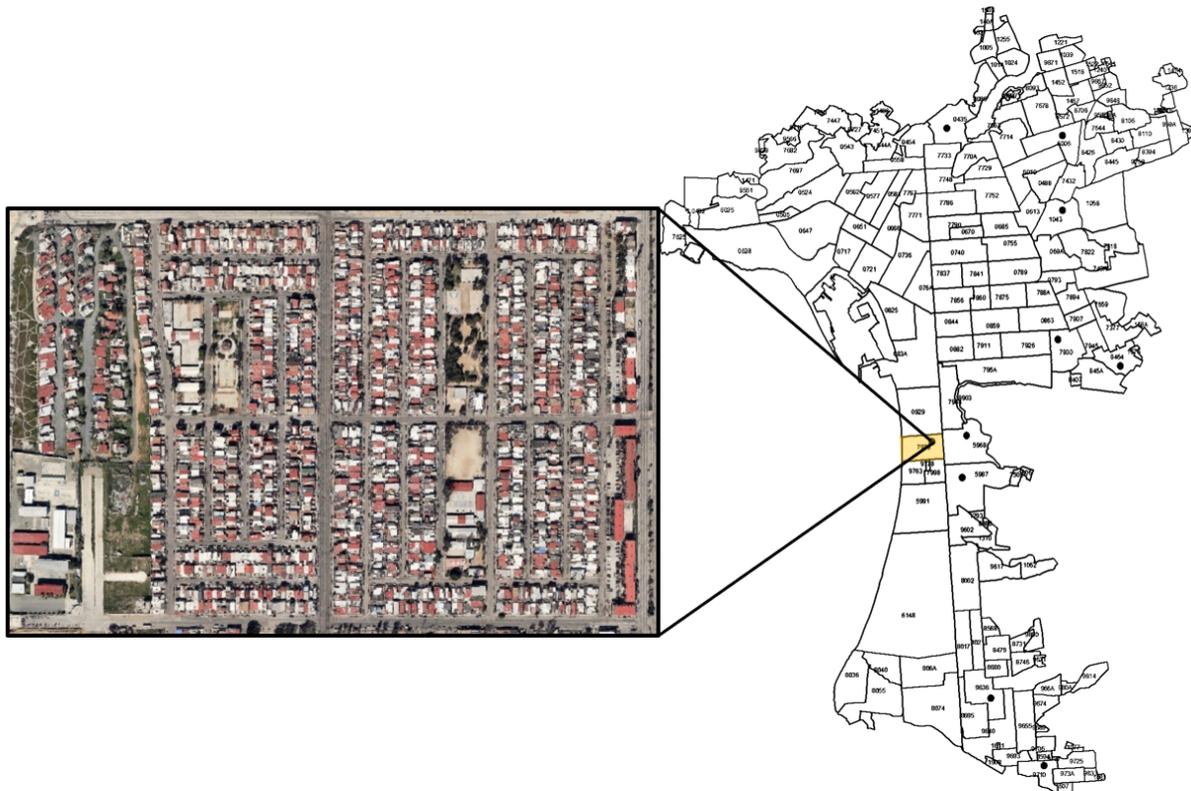
Mapa de LTS de la ciudad de Ensenada (a), (b) AGEB de la ciudad y (c) mapa de LTS



Fuente: obtenido con base en INEGI, Censo de Población y Vivienda 2020. Fecha de acceso 2021-11-05 y de Landsat 8 (2019-07-03).

FIGURA 4

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



Fuente: elaborado a partir de Google Earth. Fecha de acceso 2021-11-05.

nadas: latitud: 31° 49' 53" longitud: -116° 36' 23" en el Fracc. Punta Banda I, Ensenada, B. C. Los criterios de selección se enlistan a continuación:

Ubicación geográfica: se localiza dentro de la AGEB con mayor vulnerabilidad sociodemográfica conforme a la gráfica de líneas (figura 2).

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 y 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) señalan 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.

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 $H/W < 1$. Según Ng y Cheng (2012) y Abdollahzadeh y Biloría (2021), el valor óptimo para la relación H/W de los cañones puede variar en función de la orientación de la calle; en este sentido, para calles orientadas al W-E se considera una relación $H/W > 3$. 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 más larga del fraccionamiento.

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. Cabe mencionar que actualmente dentro del cañón se cuenta con viviendas unifamiliares y dos torres de condominios.

En la figura 5 en el inciso (a) se observa una vista aérea de la AGEB 7979, en color amarillo se resalta el cañón urbano seleccionado, éste también se muestra en el inciso (b), además se remarca la orientación del cañón (9.53°). En el inciso (c) se presenta una vista en 3D del cañón urbano.

DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACIÓN EXPERIMENTAL

Dado que el experimento tiene como objetivo optimizar bajo un principio evolutivo de elitismo, la morfología de un cañón urbano a razón de su relación geométrica de aspecto como estrategia de mitigación del sobrecalentamiento urbano derivado de la ICU a microescala, se definieron tres objetivos de aptitud para guiar el experimento hacia la formulación efectiva del problema de diseño. Los objetivos definidos son:

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.

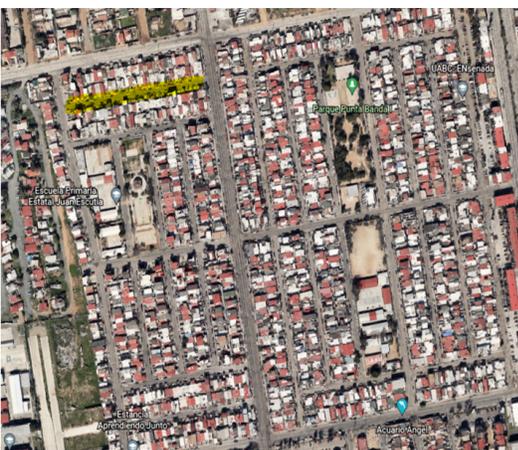
Maximizar la relación de aspecto (alto entre ancho H/W): al incrementar las alturas de las edificaciones, la relación de aspecto (H/W) que mantienen los edificios, respecto a los anchos de vialidad cambia. Un H/W mayor reduce el acceso solar al cañón y proporciona espacios más fríos. La literatura indica que dada la orientación este-oeste la relación de aspecto favorecedora es $H/W > 3$, actualmente el cañón cuenta con una relación $H/W < 1$.

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.

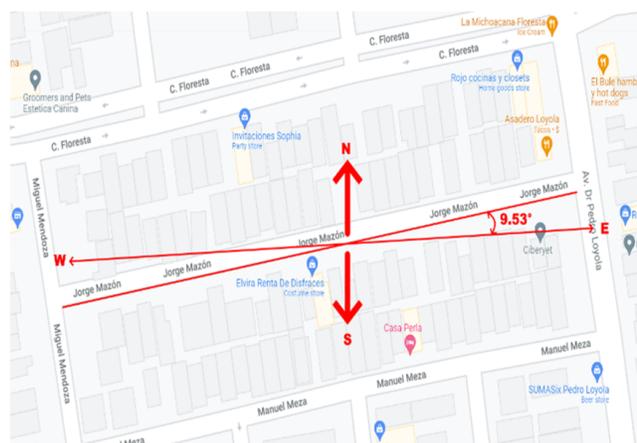
Los objetivos uno y dos están directamente relacionados con las variaciones morfológicas empleadas para construir la forma geométrica del cañón urbano; en el contexto del modelo evolutivo, estas variaciones de altura representan el “código genético” (genes) de las edificaciones.

FIGURA 5
Cañón urbano seleccionado con orientación W-E (punta banda I)

a) vista aérea de la AGEB 7979



b) vista aérea del cañón urbano seleccionado



Fuente: elaborado a partir de Google Earth. Fecha de acceso 2021-11-15.

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 del eje Z, lo que permite que las edificaciones crezcan y se desplacen. Las condiciones aplicadas al algoritmo para la ejecución de acciones se enlistan a continuación:

La altura de las edificaciones aumentará para maximizar el porcentaje 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 35 m conforme lo estipula el PDUCPE 2030.

Una vez aumentadas las alturas de las edificaciones y a través de una regla matemática establecida al algoritmo, se obtiene la altura media de éstas, la cual se divide entre el ancho del cañón urbano que corresponde a 11 m (8 m de vialidad y 3 m 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 en relación con los tres objetivos de aptitud establecidos en el algoritmo.

Al maximizar la relación H/W del cañón urbano, la densidad de éste 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.

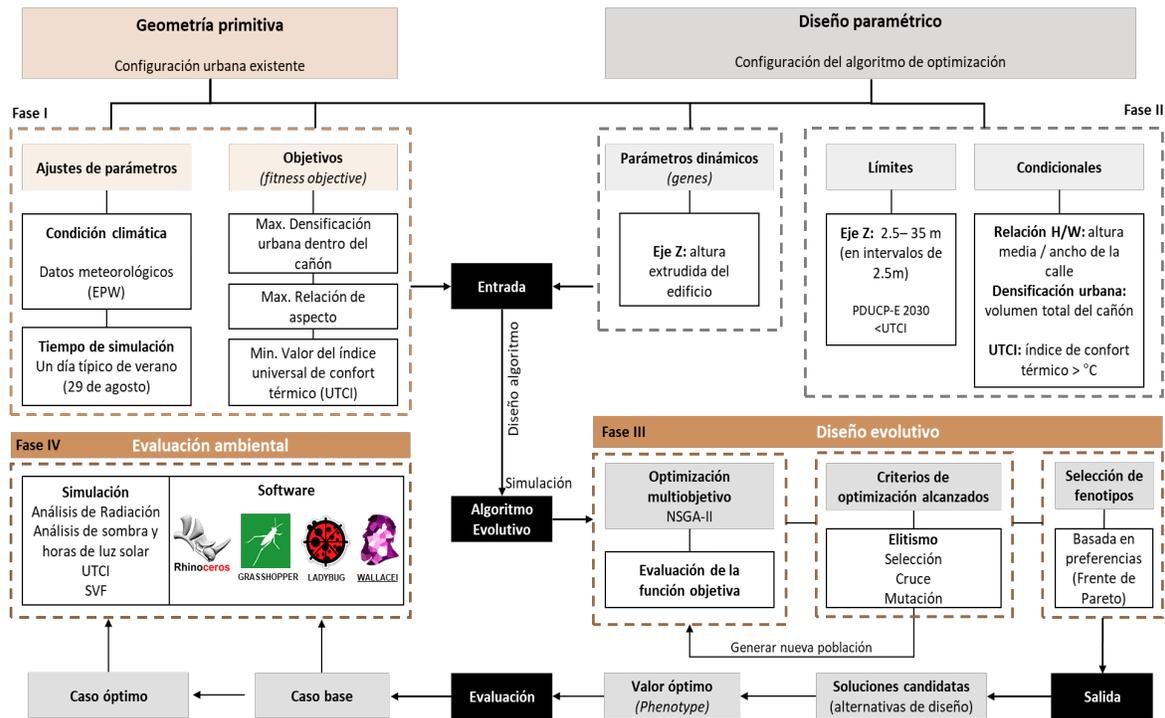
Para cada variación de altura o escenario resultante, se calcula el UTCI por medio de un componente de evaluación ambiental que integra un modelo de cálculo solar basado en el conocido “SolarCal” de Edward Arens (2015), que evalúa el efecto de la radiación solar sobre el confort exterior. El objetivo del motor evolutivo es minimizar el UTCI; para que el algoritmo pueda disminuir dicho índice, se localiza el valor más alto de temperatura ($^{\circ}$ 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.

PSEUDOCÓDIGO DEL EXPERIMENTO

La plataforma opera a través del algoritmo genético multiobjetivo de clasificación no dominado II (NSGA-II); en la figura 6 se describe el pseudocódigo del experimento, el esquema se divide en cuatro fases. Las fases 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 las 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; éstas 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.

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 con base en procesos de variación (selección, cruce y mutación). Las soluciones se evalúan a través de una medida de desempeño

FIGURA 6
Pseudocódigo del experimento



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).

El entorno computacional cumple 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 de los criterios de aptitud (establecidos anteriormente) y se prescribe un valor de aptitud. Se implementó un valor de elitismo (mecanismo de selección) 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 1 muestra los valores de la configuración de la interfaz.

TABLA 1
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 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 <i>et al.</i> recomiendan 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 $1/n$).	$1/n$
Índice de distribución 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%
Índice de distribución de mutación		80%
Semilla aleatoria	Descendencia aleatoria a partir de la cual se efectúan las operaciones de selección, recombinación y mutación.	1

RESULTADOS

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 de 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 respecto a un criterio, también pueden 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 urbano a través del UTCI. 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 7 se presenta un render

vista en planta de la última generación (número 19) que contiene 25 individuos.

Para la selección del caso de optimización morfológica se realizó un último análisis a través de la gráfica 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 8 se muestra a través de la gráfica de coordenadas paralelas la ubicación del caso óptimo (marcada con una línea negra).

ANÁLISIS CLIMÁTICO

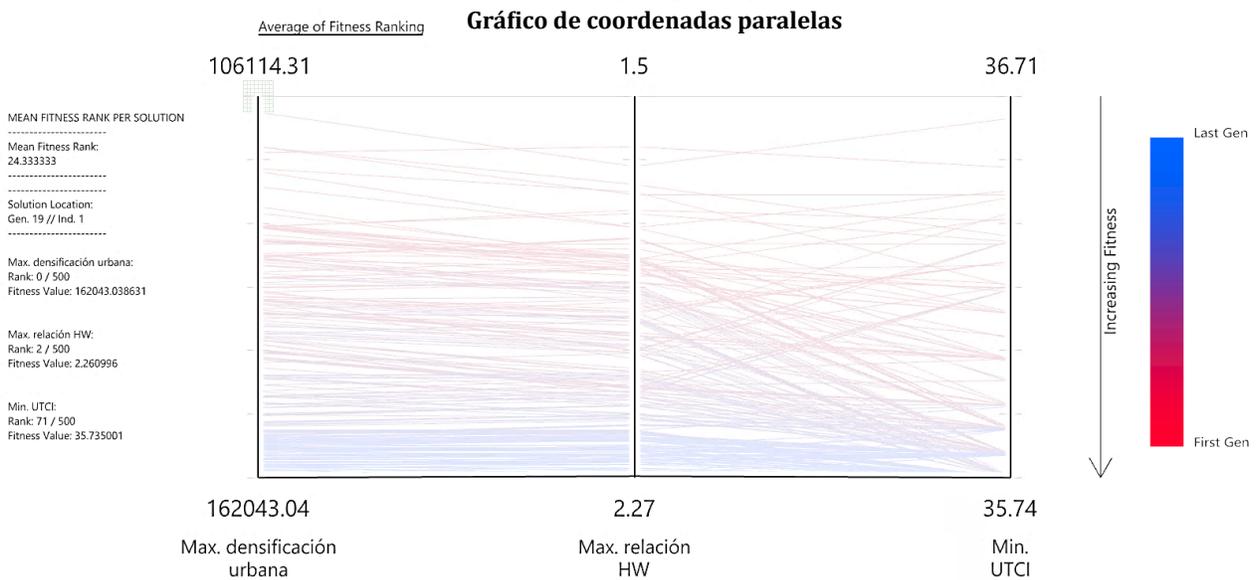
La solución óptima seleccionada corresponde a la generación 20 individuo 2, debido a que repre-

FIGURA 7
Render de la última generación (25 individuos) vista en planta



Number of exported solutions : 25 out of 500

FIGURA 8
Gráfica de coordenadas paralelas para la solución óptima



senta 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 urbano a través del UTCI. Una vez seleccionado el óptimo de Pareto, la solución se evaluó respecto al caso base. En la tabla 2 se presentan los valores calculados de los objetivos del caso de optimización morfológica respecto al caso base; como se puede observar, la relación de aspecto aumentó de $H/W < 1$ a $H/W > 2$, 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°C en el UTCI.

TABLA 2

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	H/w<1	0.54	30.5-36.8 $^{\circ} \text{C}$
Gen. 20, ind. 2	162 042.8 m^3	H/w>2	2.26	29.0-35.8 $^{\circ} \text{C}$

En la figura 9 se ilustra la radiación solar acumulada para el día cálido extremo, tanto para el escenario de caso base como para 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 con el caso base figura “b”, donde 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/m^2 ; sin embargo, la mayor parte del cañón urbano presenta una radiación máxima de 4.02 kWh/m^2 (figura a), a diferencia del caso base, donde la mayor parte del cañón presenta una radiación de 6.39 kWh/m^2 (figura b).

Conforme al estudio del análisis de horas de luz 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 10). 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 dos a siete horas de luz solar, a diferencia del caso base, donde 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”).

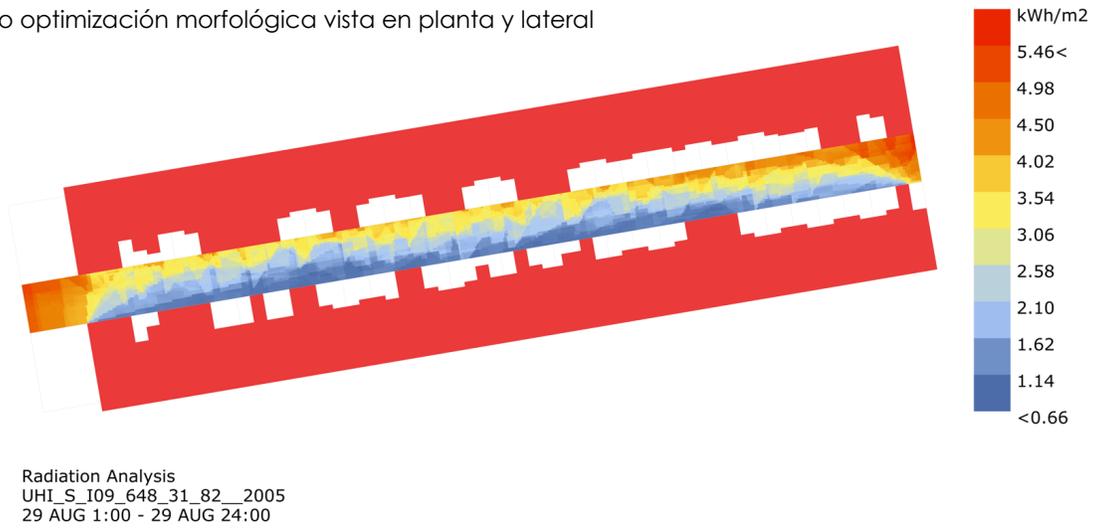
En la figura 11 se ilustra el análisis del microclima urbano, en la figura “a” se muestra el caso de optimización morfológica, en general la distribución de temperaturas se encuentra en un rango de 29.06 y 35.85°C , se aprecia que durante la mayor parte del día el cañón presenta una temperatura máxima 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 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.

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 12

FIGURA 9

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 vista en planta y lateral



b) Caso base vista en planta y lateral

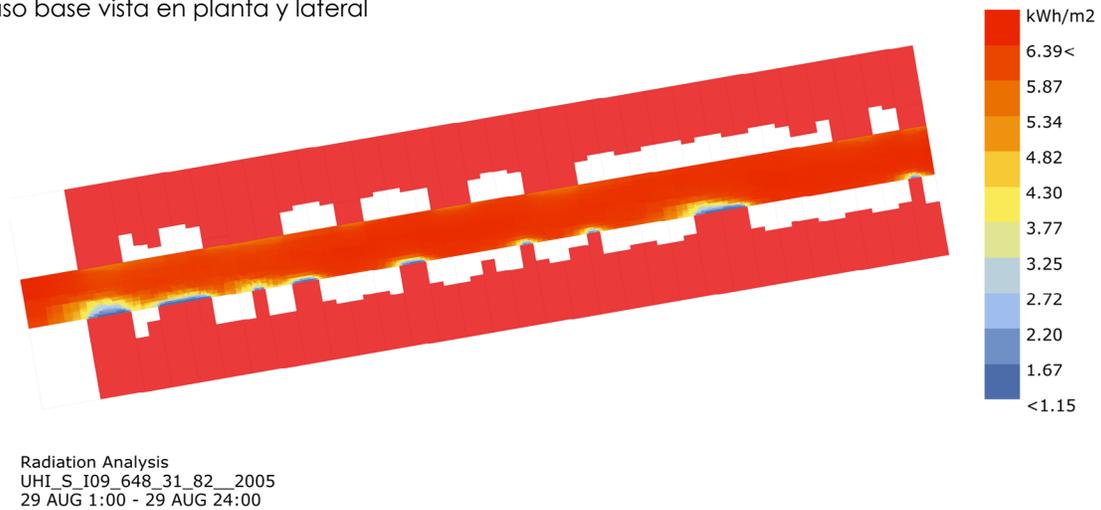
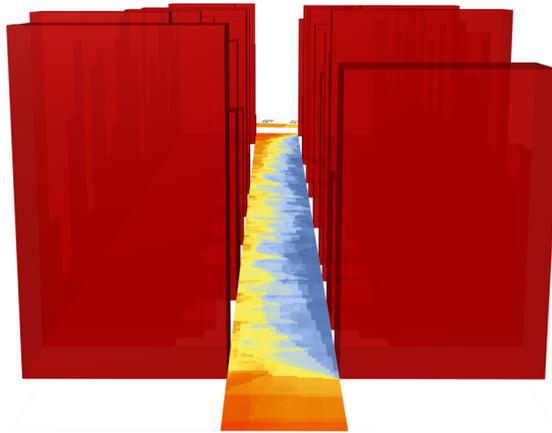


FIGURA 9 (CONTINUACIÓN)

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 vista en planta y lateral



b) Caso base vista en planta y lateral

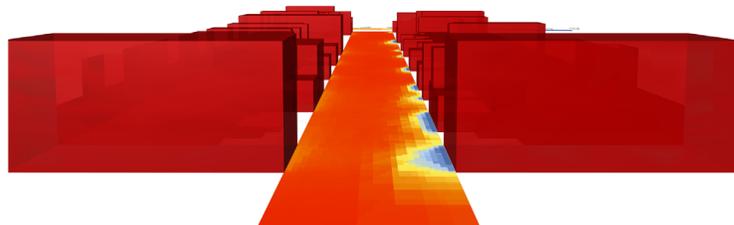
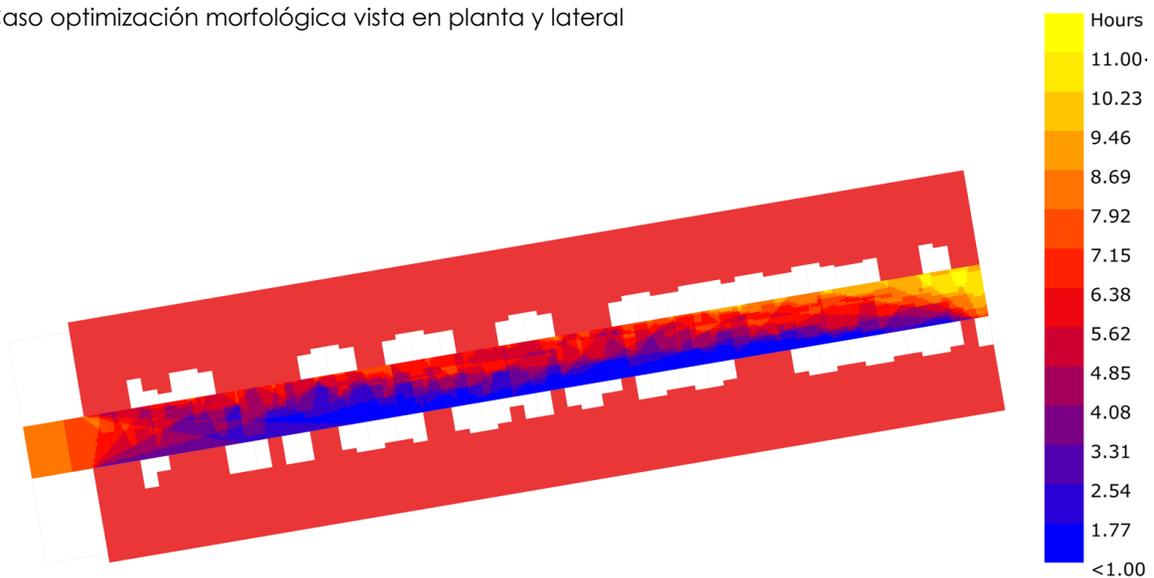


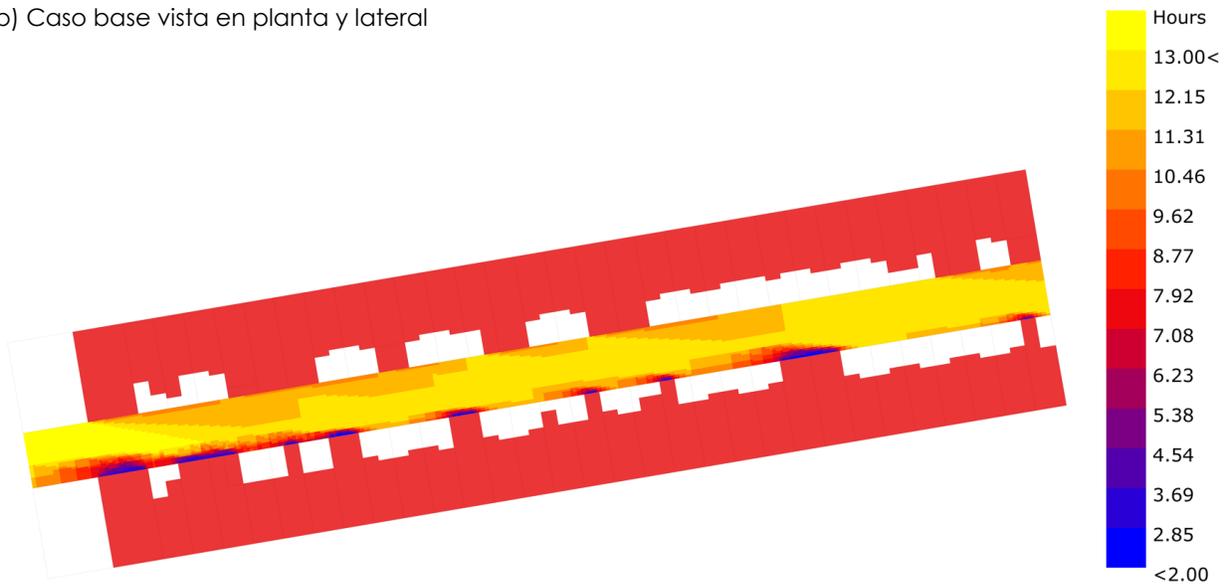
FIGURA 10

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

a) Caso optimización morfológica vista en planta y lateral

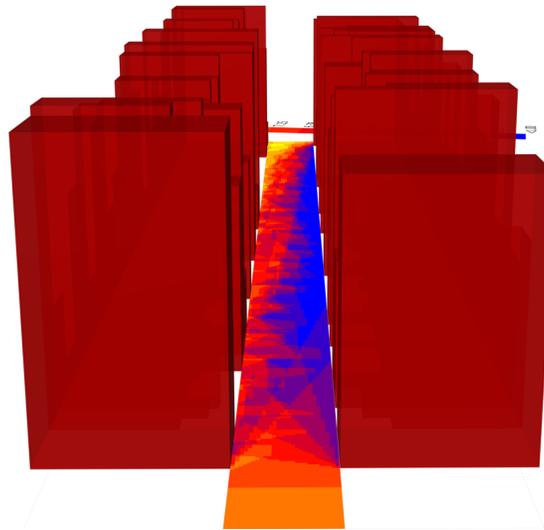


b) Caso base vista en planta y lateral



SunlightHours Analysis

a) Caso optimización morfológica vista en planta y lateral



b) Caso base vista en planta y lateral

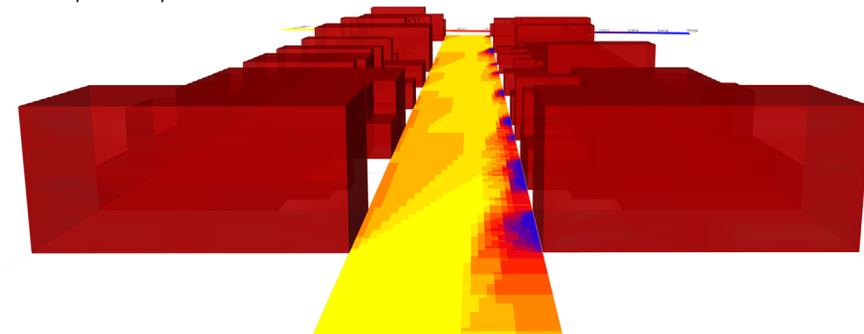
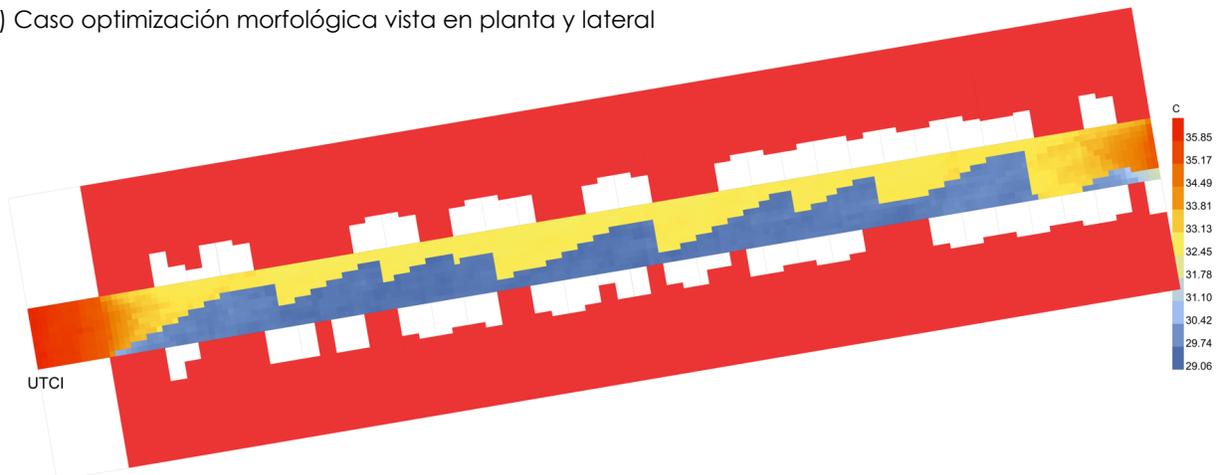


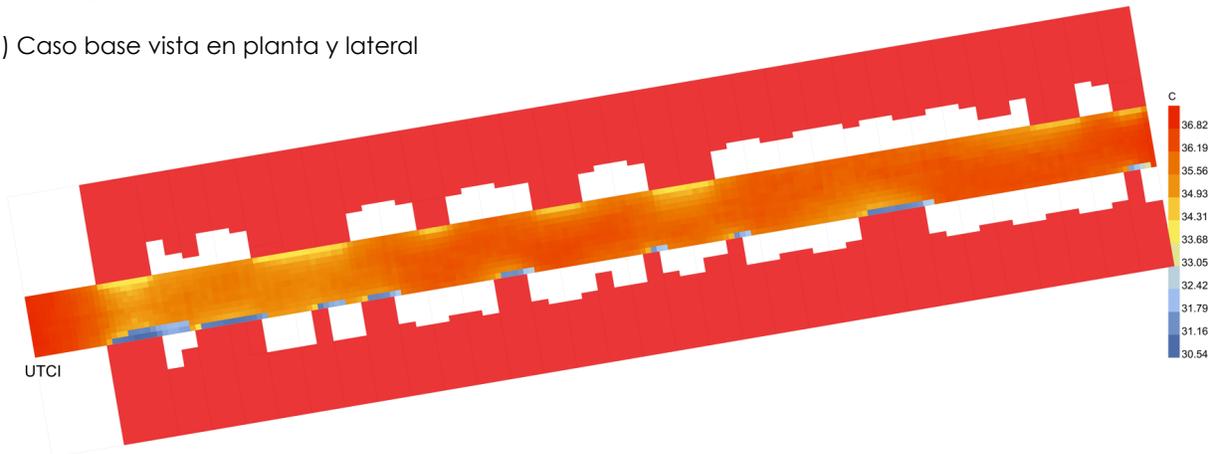
FIGURA 11

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)

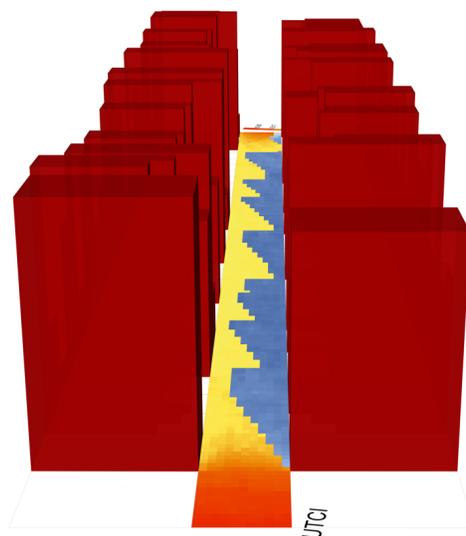
a) Caso optimización morfológica vista en planta y lateral



b) Caso base vista en planta y lateral



a) Caso optimización morfológica vista en planta y lateral



b) Caso base vista en planta y lateral

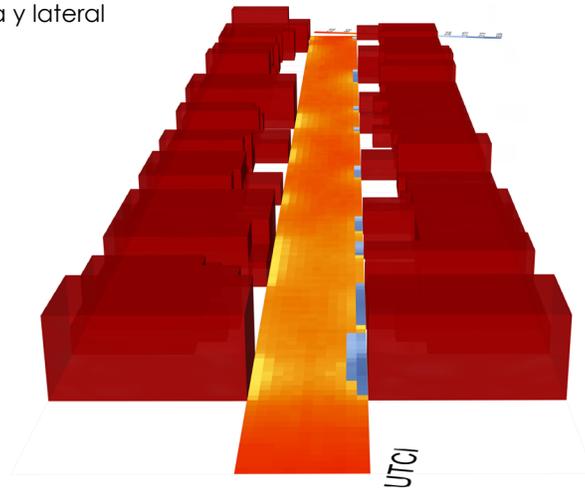


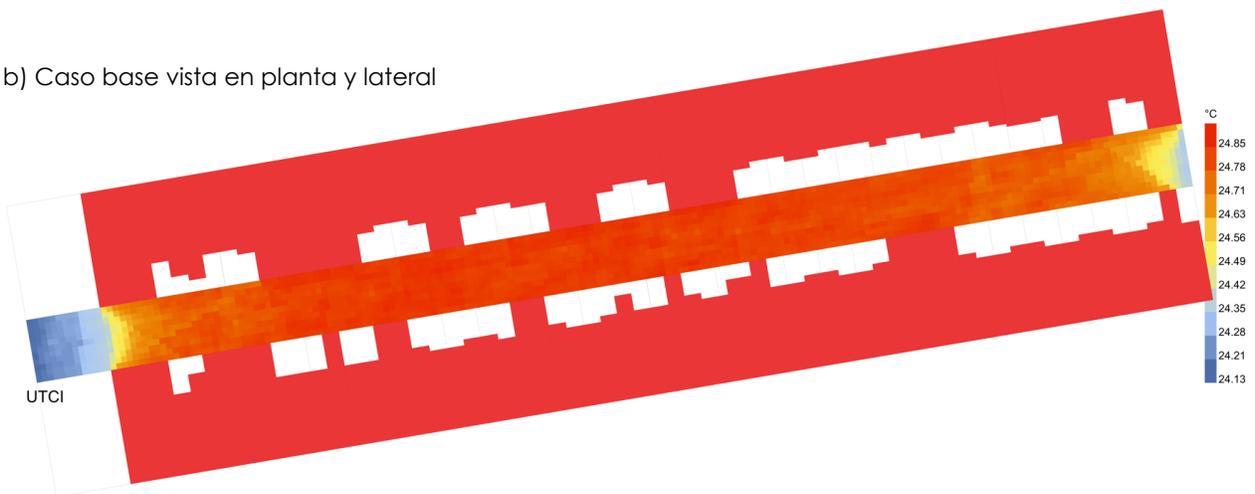
FIGURA 12

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

a) Caso optimización morfológica vista en planta y lateral



b) Caso base vista en planta y lateral



(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 a 24.55° C, mientras que el caso de optimización figura “a” presenta un rango de 24.13 a 24.85° C.

Se elaboró una tabla síntesis con los valores obtenidos de los distintos análisis encontrados en el escenario base respecto al escenario de optimización morfológica (tabla 3). Ésta permite visualizar los rangos y diferencias en los valores de las variables analizadas.

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, éstos muestran un potencial significativo de obstrucción al acceso solar, dada una mayor relación

TABLA 3

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	H/W<1	0.54	H/W>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: Estrés por calor moderado (28<=UTCI<32) +3: Fuerte estrés por calor (32<=UTCI<38)	+3: Fuerte estrés por calor (32<=UTCI<38)	+2: Estrés por calor moderado (28<=UTCI<32) +3: Fuerte estrés por calor (32<=UTCI<38)	+2: Estrés por calor moderado (28<=UTCI<32)

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) cumple 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

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 H/W<1 a H/W>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 mostró 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 proyectada 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 éste puede variar en función de la orientación de la calle; para calles orientadas al este-oeste, recomienda que se considere una relación de aspecto $H/W > 3$; sin embargo, su estudio se realizó en la Isla de Tenos, Grecia, la cual presenta una temperatura superior a la 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. En la ciudad de Ensenada, con una relación de aspecto $H/W > 2$ se logró reducir el índice UTCI hasta 2°C , de 35 a 33°C al centro geométrico del cañón urbano.

En cuanto 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 $H/W > 2$ se crea mayor turbulencia en el viento, aumentando el potencial de

enfriamiento de éste; sin embargo, la velocidad del 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 diferente relación de aspecto, encontró que en cañones urbanos con una relación $H/W > 1$ se crea un único movimiento turbulento al interior de éste. No obstante, al centro del cañón se registró 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 con el 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 multiobjetivo requieren de “mecanismos de búsqueda robustos y poderosos” (Bäck *et al.*, 1997: 13) 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 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.

CONCLUSIÓN

El objetivo consistió 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 para días cálidos 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, debido a que también se espera que los edificios con mayor altura afecten los patrones de viento en el área.

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 $H/W > 2$, 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 .

Las horas de luz solar directa también se vieron afectadas 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 morfológica presentó un total de 7 h 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 en 40%, lo que ocasionó un incremento en la proyección de sombra generada 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 de 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 ($28 \leq \text{UTCI} < 32$).

En relación con los límites establecidos al algoritmo, éstos se encuentran restringidos por la normatividad vigente en la ciudad de Ensenada, así como por las condiciones climáticas de ésta. Básicamente este método se puede aplicar a otras condiciones con diferentes variables de diseño y distintos 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 diversas escalas.

La aplicación de algoritmos evolutivos multiobjetivo (MOEA) como herramienta de optimización en problemas complejos con múltiples variables, ha demostrado ser un enfoque ventajoso. Los MOEA son ideales para problemas que no tienen 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.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Autónoma de Baja California y al Conacyt por el apoyo económico para llevar a cabo esta investigación. Así como al Ing. Randy Martinez y el “Instituto Metropolitano de Investigación y Planeación de Ensenada”, el Dr. J. Sandoval Felix, M.I Juan C Ramírez y el Ing. David Pineda por su valiosa orientación en las etapas de desarrollo de Información Geográfica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdollahzadeh, N., y Biloría, 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>
- Barrera, C. (2010). *Algoritmos genéticos como estrategia de diseño en arquitectura* (p. 258). <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>
- Battista, G., de Lieto Vollaro, R., y Zinzi, M. (2019). Assessment of urban overheating mitigation strategies in a square in Rome, Italy. *Solar Energy*, núm. 180, enero, pp. 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., y Zalich, M. A. (2016). Fluorescent cooling of objects exposed to sunlight: The ruby example. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, núm. 157, pp. 312-317. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.05.058>
- Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., y He, Z. (2012). 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>
- Davis, D. (2013, febrero). *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*. https://ap-sto1.ext.exlibris-group.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=krvucq-jikvw631st-5hcpzvgmluut4en5-830-knnhgs3p-8cpi5akr-uwnxka-5b5l3-zoarb3dc-qeazylyky3g-fu4fblwkdjuomafpw-
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., y 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., y Wong, N. H. (2020). Impact of urban canyon geometries on outdoor thermal comfort in central business districts. *Sustainable Cities and Society*, núm. 53, pp. 101-966. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101966>
- Emmanuel, R., y 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*, núm. 53, pp. 137-149. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.020>
- Fink, T., Koenig, R., y Weimar, U. (2018). *Integrated Parametric Urban Design in Grasshopper / Rhinoceros 3D Demonstrated on a Master Plan in Vienna*, núm. 3, pp. 313-322.
- Fiorito, F., Cannavale, A., y Santamouris, M. (2020). Development, testing and evaluation of energy savings potentials of photovoltaic windows in office buildings. A perspective study for Australian climates. *Solar Energy*, núm. 205, febrero, pp. 358-371. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.080>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5ª edición). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Garshasbi, S., y 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*, núm. 191, octubre, pp. 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.10.023>
- INEGI. (2001). *Sistema de información geográfica del estado de Baja California*, vol. I. México: INEGI.
- IPCC. (2013). Cambio climático. *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
- Karssenber, Laven, J., Glaser, M., y Van't Hoff, M. (2018). *The city at eye level*. (M. G. y M. van 't H. Hans Karssenber, Jeroen Laven; Eburon). https://thecityateyelevel.files.wordpress.com/2016/02/ebook_the-city-at-eye-level_english.pdf
- Luke, S. (2015). Essentials of metaheuristics. *Morrisville*, 2(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=iwarok8gwnffzkabock-iwswlkvaulubtjivqvn8aanikstyh_kqcd5y-yfyf4
- Makki, M., Showkatbakhsh, M., Tabony, A., y 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., y Rossi, F. (2020). Development and validation of a Monte Carlo-based numerical model for solar analyses in urban canyon configurations. *Building and Environment*, núm. 170, noviembre, pp. 106-638. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106638>
- Manni, M., Lobaccaro, G., Goia, F., Nicolini, A., y Rossi, F. (2019). Exploiting selective angular properties of retro-reflective coatings to mitigate solar irradiation within the urban canyon. *Solar Energy*, núm. 189, abril, pp. 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.045>
- Navarro-Mateu, D., Makki, M., y Cocho-Bermejo, A. (2018). Urban-tissue optimization through evolutionary computation. *Mathematics*, 6(10). <https://doi.org/10.3390/math6100189>
- Ng, E., y Cheng, V. (2012). Urban human thermal comfort in hot and humid Hong Kong. *Energy and Buildings*, núm. 55, pp. 51-65. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.025>
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. (2ª edición).
- . (1988). *Street Design and Urban Canopy Layer Climate*, núm. 11, pp. 103-113.
- Park, C. Y., Yoon, E. J., Lee, D. K., y 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*, núm. 698, pp. 134-259. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134259>
- POEBC. (2014). Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Baja California. *Consejo Estatal de Protección al Ambiente del Estado de Baja California*, núm. 34, pp. 1-434. <http://www.spabc.gob.mx/wp-content/uploads/2018/04/documento-completo-poebc-2014.pdf>
- Sakar, B. (2018). *Parametric Modelling for the Mitigation of Urban Heat*, agosto.
- Santamouris, M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of the Total Environment*, núm. 512-513, pp. 582-598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.060>
- Santamouris, M., Ding, L., Fiorito, F., Oldfield, P., Osmond, P., Paolini, R., Prasad, D., y 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*, núm. 154, pp. 14-33. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.006>
- Santamouris, M., y Fiorito, F. (2021). On the impact of modified urban albedo on ambient temperature and heat related mortality. *Solar Energy*, núm. 216, enero, pp. 493-507. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.031>
- Santamouris, M., y Yun, G. Y. (2020). Recent development and research priorities on cool and super cool materials to mitigate urban heat island. *Renewable Energy*, núm. 161, pp. 792-807. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.109>
- Semadet, J. (2006). Cambio climático. *Adv. Mater.*, núm. 4, p. 116. https://semadet.jalisco.gob.mx/sites/semadet.jalisco.gob.mx/files/cambio_climatico.pdf

- Showkatbakhsh, M., y 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., y Baredar, P. (2017). Recent advancement in BIPV product technologies: A review. *Energy and Buildings*, núm. 140, pp. 188-195. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.015>
- Suyoto, W., Indraprastha, A., y 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*, núm. 184, agosto, pp. 328-337. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.05.098>
- Tsoka, S., Tsikaloudaki, K., y Theodosiou, T. (2020). *Investigation Methods and Mitigation*.
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K., Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K., y Modelling, N. G. (2014). *Modelling air quality in street canyons: A review*.

