

Análisis de contaminantes atmosféricos y condiciones térmicas a través de los índices PMV (Predicted Mean Vote) y PET (Physiological Equivalent Temperature).



Evaluación de contaminación y confort del peatón en Tecsup mediante mediciones en campo y modelamiento numérico con ENVI-met

Assessment of Pollution and Pedestrian Comfort at Tecsup using Field Measurements and Numerical Modeling with ENVI-met

RESUMEN

Este estudio evalúa la calidad del aire y el confort térmico en el campus de Tecsup mediante modelado numérico en ENVI-met, con el objetivo de identificar zonas críticas y proponer medidas de mejora. Se analizaron contaminantes atmosféricos (SO_2 , NO , O_3 y $\text{PM}_{2,5}$) y condiciones térmicas a través de los índices PMV (Predicted Mean Vote) y PET (Physiological Equivalent Temperature), los cuales permiten evaluar la percepción térmica del peatón considerando variables como temperatura, humedad, radiación y viento.

Los resultados mostraron que las concentraciones de PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ superaron los límites diarios establecidos por el ECA para aire, con valores máximos registrados de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $126,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, frente a los límites de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En cambio, las concentraciones de O_3 ($55 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y CO ($2,500 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se mantuvieron dentro de los valores establecidos por el ECA. La velocidad del viento varió entre $0,14 \text{ m/s}$ y $1,30 \text{ m/s}$, condicionando la dispersión de contaminantes, especialmente en las avenidas Huarochirí y Cascanueces, donde se registraron los niveles más altos debido al tráfico vehicular. En términos de confort térmico, los valores de PMV oscilaron entre $1,47$ y $2,48$ y los de PET entre 36°C y 56°C , lo que evidencia un estrés térmico moderado a severo en gran parte del campus, con zonas de confort únicamente bajo cobertura vegetal.

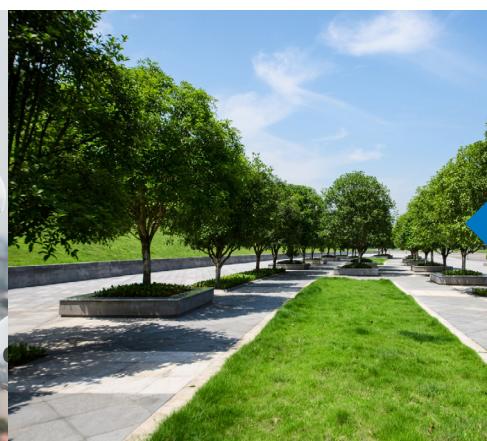
Se concluye que la incorporación de vegetación adicional y estructuras de sombra, junto con una reorganización del flujo vehicular, permitiría reducir tanto las concentraciones de contaminantes como las temperaturas percibidas, mejorando la calidad ambiental del campus.

ABSTRACT

This study evaluates air quality and thermal comfort on the Tecsup campus using numerical modeling in ENVI-met, with the aim of identifying critical areas and proposing improvement measures. Air pollutants (SO_2 , NO , O_3 , and $\text{PM}_{2,5}$) and thermal conditions were analyzed using the Predicted Mean Vote (PMV) and Physiological Equivalent Temperature (PET) indices, which allow the evaluation of pedestrian thermal perception by considering variables such as temperature, humidity, radiation, and wind.

The results showed that PM_{10} and $\text{PM}_{2,5}$ concentrations exceeded the daily limits established by the Environmental Quality Standards (ECA), with maximum recorded values of $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $126,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively, compared to the limits of $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In contrast, O_3 ($55 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and CO ($2,500 \mu\text{g}/\text{m}^3$) concentrations remained within the established regulatory values. Wind speeds varied between $0,14 \text{ m/s}$ and $1,30 \text{ m/s}$, influencing the dispersion of pollutants, especially on Huarochirí and Cascanueces avenues, where the highest levels were recorded due to vehicular traffic. In terms of thermal comfort, PMV values ranged between $1,47$ and $2,48$, and PET values between 36°C and 56°C , demonstrating moderate to severe thermal stress across much of the campus, with comfort zones found only under vegetation cover.

The study concludes that the incorporation of additional vegetation and shading structures, along with reorganizing vehicular flow, would reduce both pollutant concentrations and perceived temperatures, thereby improving the campus's environmental quality.



Palabras Claves

Contaminación atmosférica, $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} , confort térmico, PMV, PET, modelado numérico, ENVI-met, dispersión de contaminantes, tráfico vehicular, isla de calor urbana, infraestructura verde.

Key words

Air pollution, $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} , thermal comfort, PMV, PET, numerical modeling, ENVI-met, pollutant dispersion, vehicular traffic, urban heat island, green infrastructure.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire y el aumento de las temperaturas son problemas ambientales críticos a nivel global y local. Las emisiones provenientes del tráfico vehicular y de la actividad industrial han deteriorado la calidad del aire y agravado el estrés térmico en muchas ciudades [9]. En Lima Metropolitana, la alta densidad poblacional y la limitada regulación de emisiones generan niveles alarmantes de contaminación y calor urbano, afectando la salud y la calidad de vida de sus habitantes [5].

En este contexto, se planteó un proyecto académico de diseño entre la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC) y Tecsup para analizar los niveles de contaminación atmosférica y de comodidad del peatón en el campus de Tecsup, ubicado en el distrito de Santa Anita, Lima. El distrito de Santa Anita presenta condiciones ambientales preocupantes. La zona de estudio abarca aproximadamente 132 300 m², con un perímetro de 1500 m, delimitado por la avenida Huarochirí, la avenida Cascanueces, la avenida Santa Ana y la calle 6, ubicada en las coordenadas 12° 02' 43,2" S y 76° 57' 09,6" W.

Estudios previos han evidenciado un incremento en la concentración de contaminantes como PM₁₀, PM_{2,5}, CO y NO₂, especialmente en horas de alta congestión vehicular. Estos niveles, registrados mediante conteos de tráfico y análisis históricos, superan en algunos casos los límites normativos. Además, se ha observado un aumento de la temperatura, lo que afecta el bienestar de peatones y estudiantes [8].

Este estudio tiene como objetivo analizar la calidad del aire y el confort térmico en el campus de Tecsup mediante mediciones en campo y simulaciones numéricas con ENVI-met. Se evaluarán las condiciones actuales de contaminación y temperatura para obtener datos precisos sobre la situación ambiental. Paralelamente, se modelará la dispersión de contaminantes y las variaciones térmicas con ENVI-met, lo que permitirá identificar patrones críticos. Finalmente, se compararán los resultados obtenidos para determinar las zonas con mayores impactos ambientales, proporcionando información clave para la gestión ambiental en la comunidad de Tecsup.

Aunque diversos estudios previos han empleado modelos como WRF-CHEM y OpenFOAM para analizar la calidad del aire y el microclima urbano, estos enfoques presentan limitaciones en la resolución espacial y en la representación detallada de variables microclimáticas a escala local [2], [6]. Por ejemplo, WRF-CHEM se utiliza principalmente para modelar procesos atmosféricos a escala regional o de ciudad, mientras que OpenFOAM es eficaz para la dinámica de fluidos, pero requiere gran capacidad computacional y configuraciones complejas para simular interacciones entre vegetación, radiación y entorno construido. Esto significa que OpenFOAM no resulta adecuado para simular procesos de la dinámica de la capa límite atmosférica, como la transferencia de calor entre materiales y atmósfera o los procesos de absorción y adsorción de la vegetación, entre otros.

En contraste, ENVI-met se seleccionó por su capacidad para representar con precisión el microclima urbano mediante

simulaciones tridimensionales de alta resolución (0,5 a 10 m), integrando los efectos de radiación, viento, materiales, vegetación y geometría urbana [3], [7]. Estas características permiten evaluar con mayor detalle la influencia de la vegetación, las superficies pavimentadas y las estructuras de sombra sobre la temperatura y la dispersión de contaminantes. Además, ENVI-met ha demostrado ser una herramienta eficiente para proyectos de diseño urbano y planificación ambiental a pequeña escala, proporcionando resultados prácticos y visuales útiles para la toma de decisiones.

Por tanto, este estudio aplica un modelo microclimático con enfoque de diseño, con el fin de identificar zonas críticas dentro del campus de Tecsup y proponer soluciones basadas en vegetación y sombra que contribuyan a mejorar las condiciones de confort térmico y la calidad del aire.

FUNDAMENTOS

En los últimos años, el uso de modelos numéricos ha sido fundamental para estudiar y comprender los procesos atmosféricos a diferentes escalas. A continuación, se presenta una revisión de la literatura que destaca cómo se han empleado estos modelos en diversos estudios.

Los modelos CMAQ y WRF han sido ampliamente utilizados para estudiar la calidad del aire a escala regional o urbana. Un ejemplo destacado es el estudio titulado «Modelo regional de la calidad de aire utilizando el modelo WRF/CHEM: Implementación de datos globales y locales para Mendoza». Este trabajo muestra los primeros resultados obtenidos en el modelado de la calidad del aire regional en Mendoza mediante el modelo WRF/Chem. El modelo fue configurado para representar correctamente la orografía local y caracterizar los tipos y usos de suelo en la región. Los resultados indican que una configuración adecuada permite una descripción detallada de la evolución espacio-temporal de la pluma de contaminantes antropogénicos [2].

A microescala, los modelos OpenFOAM y ANSYS Fluent se han empleado para simular la dispersión de contaminantes en entornos urbanos. En el estudio titulado «Atmospheric Wind Field Modelling with OpenFOAM for Near-Ground Gas Dispersion», OpenFOAM se utilizó para desarrollar un modelo CFD que garantiza un flujo de capa límite atmosférica homogéneo, mejorando la precisión en la dispersión de gases cerca del suelo. Para ello, reemplazó el perfil logarítmico del viento por una ley de potencia, evitando velocidades negativas y mejorando la resolución en zonas cercanas a la superficie. El modelo fue validado con la directriz VDI 3783/9 y túneles de viento, demostrando una alta concordancia entre los valores simulados y medidos [6]. Otro estudio, «3D Computational Fluid Dynamics Modeling of Temperature and Humidity in a Humidified Greenhouse», utilizó ANSYS Fluent para simular la distribución de temperatura y humedad en un invernadero con humidificadores. La simulación CFD permitió analizar la ventilación y evaporación, optimizando el control climático para mejorar la eficiencia del sistema [4].

Además, ENVI-met ha demostrado ser una herramienta eficaz para simular el microclima urbano y evaluar el impacto de diferentes estrategias de vegetación y diseño urbano. En

el estudio «Urban microclimate improvement using ENVI-met climate model», se utilizó ENVI-met para modelar distintos escenarios bioclimáticos en un barrio residencial de Atenas, demostrando que la vegetación en calles es la estrategia más efectiva para mitigar el efecto de isla de calor urbana y mejorar la calidad ambiental [1]. Por último, «Evaluación del desempeño termoradiativo del modelo ENVI-met para tipologías de infraestructura verde: Experiencia en un clima subtropical» analiza la capacidad de ENVI-met para simular el desempeño térmico y radiativo de distintas infraestructuras verdes, como techos verdes, muros verdes y árboles urbanos. A través de mediciones de campo y pruebas de sensibilidad del modelo, el estudio evalúa la precisión de ENVI-met en la estimación del confort térmico y la interacción entre vegetación y entorno construido. Los resultados destacan la importancia de realizar ajustes locales en los parámetros del modelo y la validación con datos experimentales para mejorar su precisión en aplicaciones urbanas [3].

El presente estudio se centra en analizar la calidad del aire y la comodidad térmica del peatón en el campus de Tecsup mediante mediciones en campo y simulaciones numéricas con ENVI-met. Se utilizará este modelo para evaluar el impacto de diferentes estrategias de vegetación y diseño urbano en la calidad del aire y el confort térmico.

Las premisas del estudio se basan en la capacidad de los modelos numéricos para proporcionar una evaluación detallada y precisa de los efectos de distintas estrategias de diseño urbano. Estos modelos permiten simular la dispersión de contaminantes y las variaciones térmicas en entornos urbanos, lo que resulta crucial para comprender y mejorar la calidad del aire y el confort térmico en áreas específicas. No obstante, la precisión de los modelos depende en gran medida de la calidad y cantidad de datos disponibles. Las simulaciones pueden no captar todas las variables y dinámicas presentes en el entorno real, lo que representa una limitación significativa. Además, la implementación de estos modelos requiere una comprensión profunda de los procesos atmosféricos y la capacidad de interpretar los resultados de manera eficaz para tomar decisiones informadas sobre la gestión ambiental.

METODOLOGÍA

Se procesaron datos meteorológicos y de calidad del aire de la estación certificada Santa Anita del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) debido a su proximidad y a la disponibilidad de registros históricos. Estos se clasificaron en dos categorías: meteorológicos (temperatura, humedad, precipitación y viento) y contaminantes (CO, NO₂, O₃, PM_{2,5}, PM₁₀ y SO₂). Se generaron gráficas para describir tendencias y establecer condiciones iniciales para el modelado.

La delimitación del área de estudio consideró la velocidad promedio del viento, factor clave en la dispersión de contaminantes. Se efectuó un conteo vehicular en puntos estratégicos de vías cercanas a Tecsup, diferenciando entre vehículos ligeros, pesados, motocicletas, transporte público, minibuses y particulares. Se registró la cantidad de cada tipo en distintos horarios y días para obtener un perfil del tráfico en la zona. Luego, se calcularon tasas de emisión por tipo de vehículo con valores de referencia provenientes de inventarios

de emisiones, lo que permitió estimar la contribución de cada fuente móvil a la contaminación en el área de estudio. Estos valores se integraron en ENVI-met para representar las emisiones del tráfico en la simulación.

El modelado se llevó a cabo en ENVI-met, utilizando un enfoque tridimensional a pequeña escala para obtener mayor precisión. La altura del modelo se fijó en 40 m con base en la velocidad del viento (1,6 m/s) y su ajuste vertical, asegurando que la simulación captara la influencia de las edificaciones sin exceder la capa límite atmosférica. Se realizaron pruebas de dependencia de malla con 240 configuraciones, variando el tamaño de celda (3 m, 5 m, 10 m y 15 m), la altura de las edificaciones y la presencia de vegetación tridimensional. A partir del análisis del tiempo de ejecución y de la precisión de los resultados, se seleccionó un tamaño de celda de 5 m, equilibrando el detalle geométrico y la eficiencia computacional.

El modelo se configuró en ENVI-Guide con datos meteorológicos reales del 1 de febrero de 2024, estableciendo un tiempo de simulación de una hora. Se validó comparando las variables de temperatura, humedad y contaminantes (NO₂, O₃ y PM_{2,5}) con datos recolectados in situ dentro de Tecsup. Se realizó una simulación adicional sin geometría para contrastar el perfil de temperatura con el modelo principal.

Los resultados se analizaron a 1,5 m de altura, generando mapas de distribución de contaminantes y de confort térmico (PMV, PET). Se incluyeron mapas de diferencias de velocidad del viento entre modelos y se identificaron zonas críticas con base en la intersección de los índices de calidad ambiental, lo que permitió proponer medidas de mejora para el campus.

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados del análisis de las series de tiempo de variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) y de contaminación (PM₁₀, PM_{2,5}, O₃, NO₂ y CO) obtenidas de la estación Santa Anita (STA). Este análisis incluye promedios horarios, diarios y mensuales.

Variables Meteorológicas

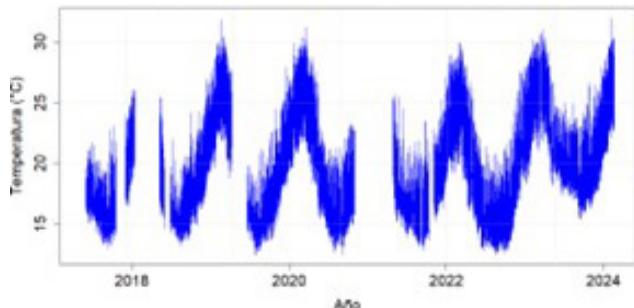


Figura 1. Serie diaria de PM10

Fuente: Elaboración propia.

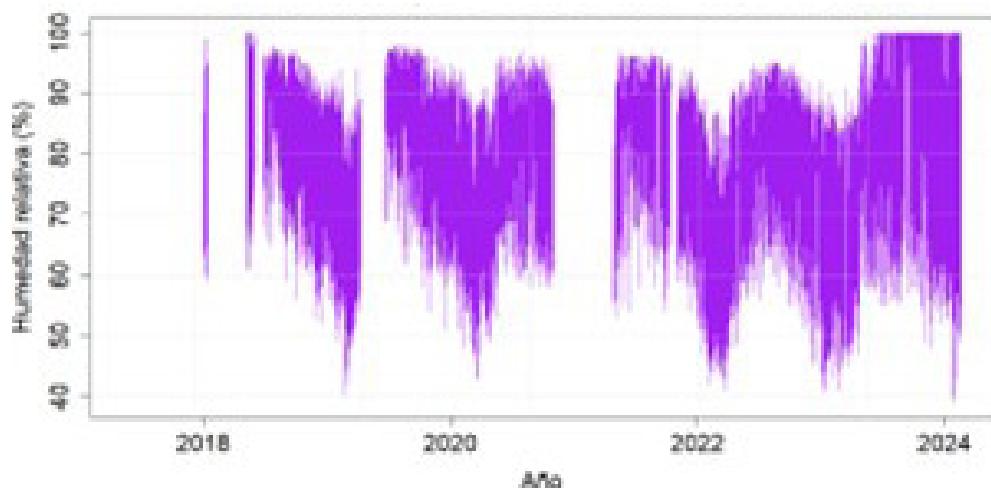


Figura 2. Serie mensual del ozono (O₃)

Fuente: Elaboración propia.

De la figura n.^o 1 se observa que la temperatura presenta estacionalidad, es decir, patrones recurrentes a lo largo del tiempo. En la figura n.^o 2, la humedad relativa muestra un comportamiento inverso al de la temperatura. Al analizar las series horarias, se aprecia que la temperatura alcanza sus valores más elevados a partir de las 9:00 horas, extendiéndose hasta aproximadamente las 15:00 horas. Este patrón tiene su punto culminante alrededor de las 14:00 horas, con picos que superan los 30 °C. Por otro lado, la humedad relativa, que suele ser inversamente proporcional a la temperatura, presenta un promedio cercano al 60 % durante las horas más cálidas. Este comportamiento evidencia la dinámica diaria típica de un clima predominantemente árido.

Variables contaminantes

En el análisis de las variables contaminantes, la serie de tiempo no mostró ninguna tendencia ni estacionalidad significativa. Por esta razón, el análisis estadístico se centró principalmente en estudiar la variación horaria de los contaminantes y en estimar si los niveles de contaminación atmosférica superan los estándares ambientales establecidos en la normativa nacional. Se incluyeron únicamente datos correspondientes a días laborales (de lunes a viernes). No obstante, debido a la presencia de vacíos en los registros, no se identificaron patrones estacionales en ninguna de las variables estudiadas.

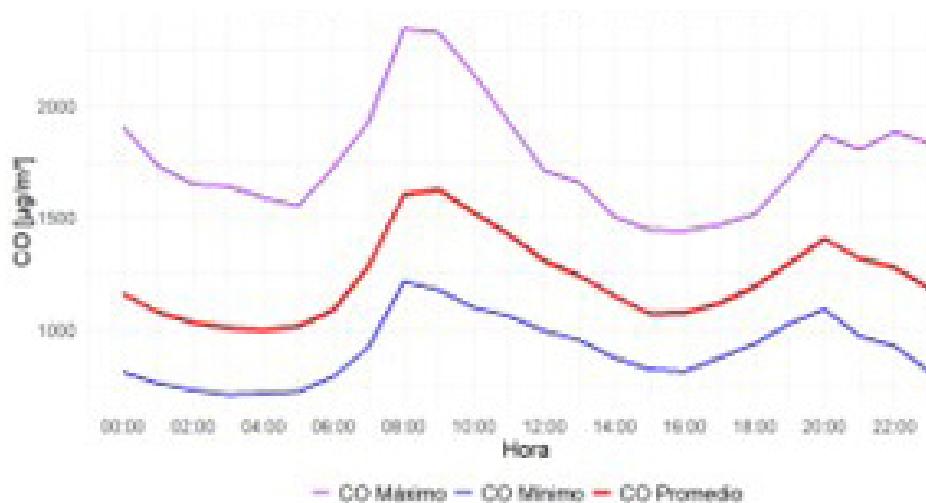


Figura 3. Serie horaria del monóxido de carbono

Fuente: Elaboración propia.

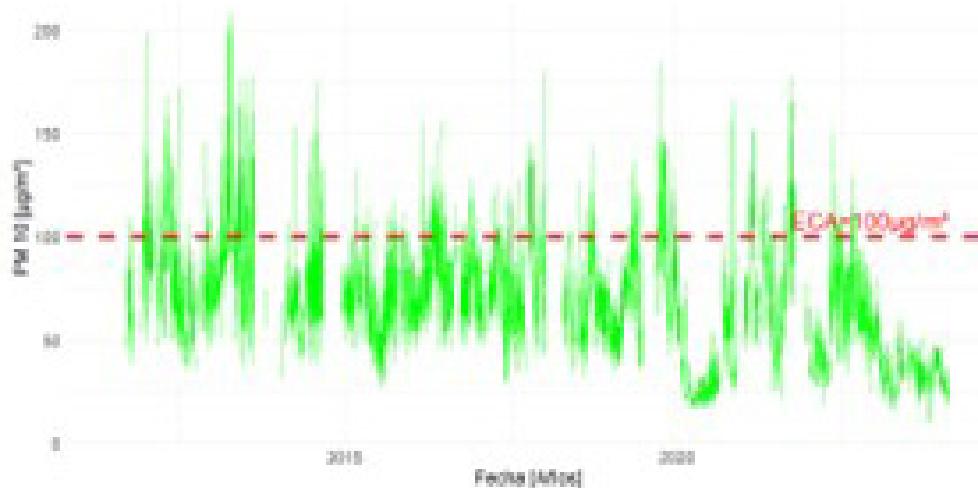


Figura 4. Serie diaria de PM₁₀

Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento horario de los contaminantes, como se muestra en la figura 3, refleja un patrón asociado con las actividades humanas y el tráfico vehicular. Excepto en el caso del ozono (O_3), los contaminantes presentan picos durante las horas de alta congestión, alcanzando valores máximos alrededor de las 8:00 y las 20:00 horas. Estos niveles disminuyen durante las horas de menor actividad, como el mediodía y la madrugada. En cambio, el O_3 , debido a su relación directa con la radiación solar, alcanza su máximo promedio a las 13:00 horas, con un valor de $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por su parte, las concentraciones de CO y NO_2 se mantuvieron

por debajo de los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA).

En la serie diaria, el material particulado PM₁₀ (figura 4) presentó valores promedio que superan el límite diario de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con máximos registrados en el rango de 25 a $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De manera similar, el PM_{2,5} mostró concentraciones que en ocasiones sobrepasaron el límite diario de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, alcanzando un máximo de $126,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos resultados evidencian la importancia de monitorear continuamente estas variables para evaluar los riesgos asociados con la calidad del aire.

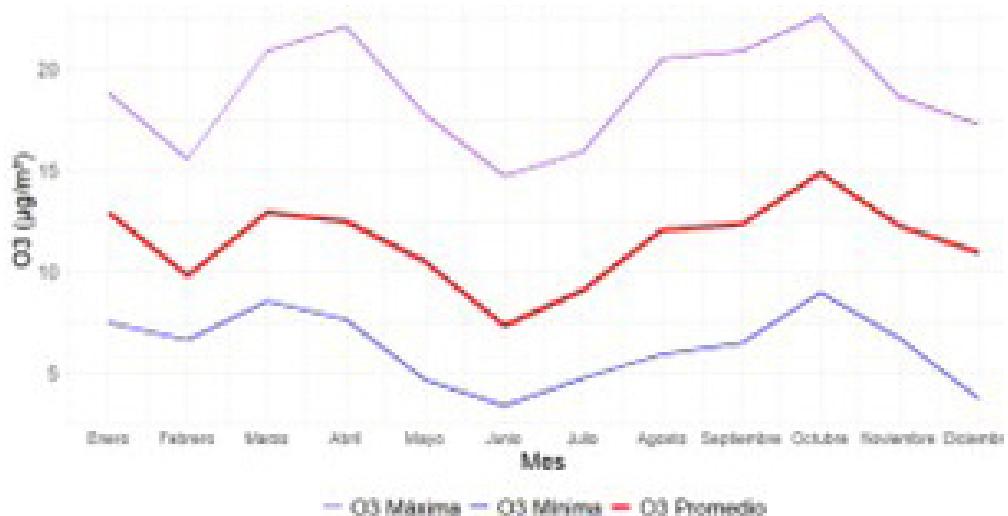


Figura 5. Serie mensual del ozono

Fuente: Elaboración propia.

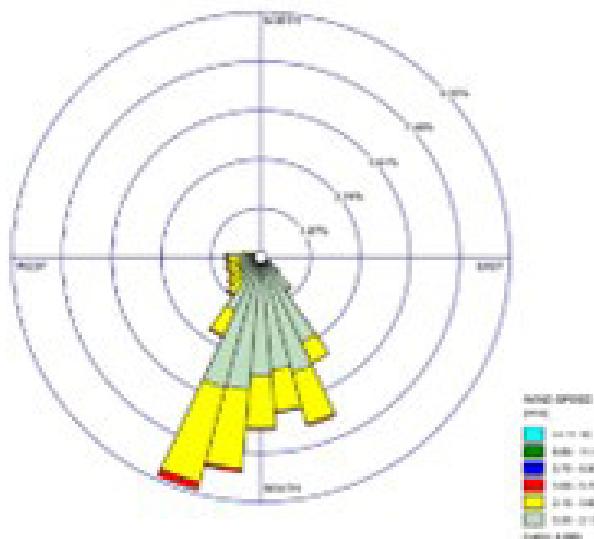


Figura 6. Rosa de viento de la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia.

En las series mensuales (figura 5) se evidenció que las concentraciones de O₃ están directamente relacionadas con las temperaturas más altas, alcanzando sus valores máximos en los meses de mayor radiación solar. Por otro lado, el PM₁₀ mostró picos significativos en los meses de abril y octubre, mientras que el PM_{2,5} presentó un incremento notable en junio, con un máximo de 64 µg/m³. Finalmente, las concentraciones de CO registraron un aumento extremo en febrero, superando los 2 500 µg/m³, lo que refleja la influencia de condiciones específicas en la dinámica de los contaminantes.

En cuanto a la dirección y velocidad del viento (figura 6), el análisis mensual mostró que los vientos predominan desde el suroeste hacia el noreste, con velocidades promedio de

1,47 m/s. En términos de intensidad, se identificaron rangos predominantes entre 0,5–2,1 m/s (39,7 %) y 2,1–3,6 m/s (24,8 %). A lo largo del año, estas características se mantuvieron consistentes, lo que indica una predominancia de vientos de baja a moderada intensidad en la estación STA.

Estos análisis constituyeron datos indispensables para la configuración del modelo computacional ENVI-met.

Zona de estudio

La zona de estudio se delimitó dentro del campus de Tecsup y su entorno inmediato, considerando un área de $464\text{ m} \times 277\text{ m}$ y una altura de 40 m, como se muestra en la figura 7.



Figura 7. Delimitación de la zona de estudio Tecsup

Fuente: Elaboración propia.

Tráfico medido e incorporación en ENVI-met

El conteo vehicular se realizó en las principales avenidas y calles adyacentes: avenida Huarochirí, avenida Cascanueces, avenida Santa Ana y calle 6. Los datos obtenidos clasificaron los vehículos en seis categorías: vehículos ligeros (LDV), vehículos

pesados (HDV), motocicletas, transporte público, coaches y vehículos particulares (PC). Posteriormente, estos resultados se extendieron a una escala temporal de 24 horas utilizando curvas estándar de tráfico predefinidas por ENVI-met. En este caso, se consideró que las calles y avenidas son consistentes con vías urbanas.

Tabla 1

Tabla de conteo del parque automotor en la zona de estudio

Tipo	Avenidas				Av. Cascanueces	Av. Huarochirí	%
	Av. Santa Ana	%	Calle 6	%			
Vehículos ligeros	134	7	9	8	87	12	108
Vehículos pesados	54	3	2	2	18	3	58
Motocicletas	850	44	76	63	204	29	390
Transporte público	410	24	12	10	160	22	380
Vehículos particulares	456	22	16	13	194	28	320
Coaches	0	0	5	4	39	6	54
Total	1904	100 %	120	100 %	702	100 %	1310
							100 %

Fuente: Elaboración propia.

El conteo se realizó durante una hora consecutiva (14:20–15:20 h) el jueves 25 de abril de 2024, considerando el flujo en ambos sentidos para avenidas de doble vía. Las categorías se definieron según la clasificación estándar de ENVI-met: LDV (vehículos ligeros), HDV (vehículos pesados), motocicletas (mototaxis y motos lineales), transporte público (buses y taxis), coaches (combis o minivans) y PC (vehículos particulares).

La tabla 1 indica que Santa Ana es la avenida con mayor tráfico, seguida por Huarochirí, Cascanueces y calle 6, en orden descendente. El gráfico muestra que en dichas vías el tráfico de motocicletas es predominante, alcanzando un máximo del 63 % en la calle 6. Se reconoce que las motocicletas, al ser considerablemente más contaminantes que los automóviles particulares o los taxis, constituyen la principal causa de contaminación ambiental en la zona debido a sus emisiones de gases nocivos. La siguiente categoría predominante es la del transporte público, con un máximo del 29 % en la avenida Huarochirí. La categoría de vehículos particulares supera el 20 % en las tres avenidas. No se identificaron coaches en la avenida Santa Ana, pero sí una proporción similar en la calle 6 y la avenida Huarochirí (4 %). La presencia de vehículos ligeros (camiones de carga medianos) y de vehículos pesados se atribuye a que la zona es semiindustrial.

Modelo base realizado en ENVI-met

A partir de la información recopilada, se generó un modelo tridimensional del campus de Tecsup con vistas en planta y en perspectiva que permiten observar la disposición espacial del área de estudio.

Para el modelado se consideraron las siguientes alturas: los pabellones 1, 2, 4, 6 y 8 tienen una altura de 3 metros; los pabellones 3 y 5, una altura de 6 metros; y los pabellones 7, 9 y 10, una altura de 4 metros.

Para las áreas verdes dentro y fuera de Tecsup se utilizaron diferentes modelos: «grass 25 cm aver» para el césped, «dense hedge dense 1 m» para árboles de 1 metro de altura y «02 ALDS Conic, large trunk, dense, small (5 m)» para árboles de 5 metros de altura.

En los alrededores de Tecsup, la mayoría de los edificios modelados tienen una altura de 6 metros; no obstante, también se incluyeron edificaciones de 3 y 9 metros, distribuidas equitativamente en toda la zona (figura 8).

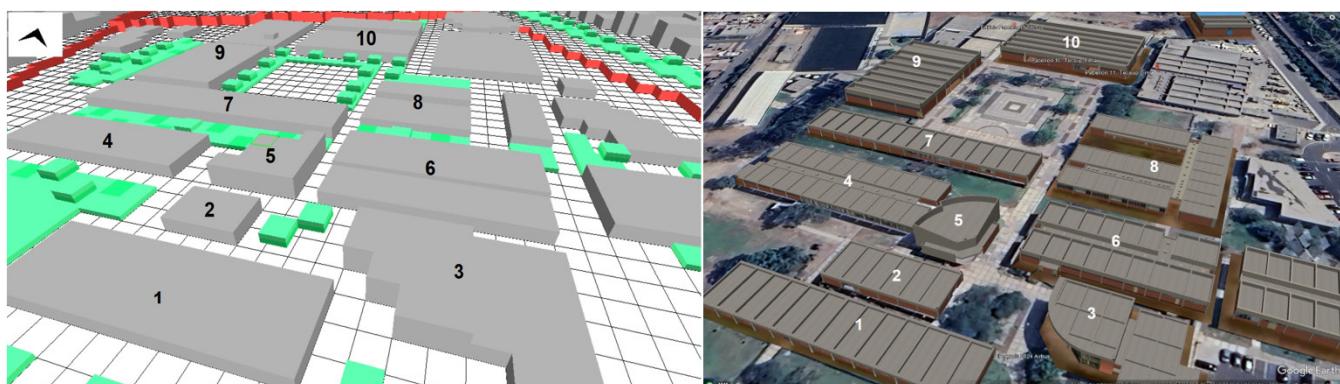


Figura 8. Vista en perspectiva de izquierda (modelo) y derecha (realidad).

Fuente: Elaboración propia.

Validación del modelo

La validación del modelo ENVI-met se realizó mediante la comparación entre los resultados simulados (celda de 5 m) y los datos registrados por dos estaciones de monitoreo de calidad del aire ubicadas dentro del campus de Tecsup. Se evaluaron variables meteorológicas (temperatura y

humedad relativa) y contaminantes atmosféricos (NO_2 , O_3 y $\text{PM}_{2,5}$). La configuración del modelo consideró la fecha del 10 de abril de 2024 a las 14:00 h, con dirección del viento de 210°, parámetros meteorológicos observados y concentraciones de fondo de contaminantes (NO , NO_2 , O_3 , PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ y SO_2).

Tabla 2.

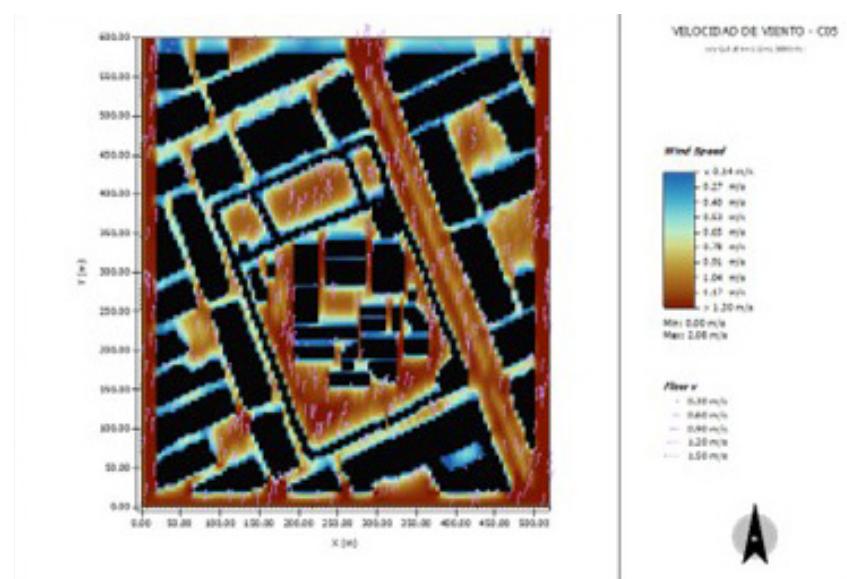
Tabla de comparación de resultados con datos de dos estaciones de monitoreo en Tecsup

Estación	Coordenadas Latitud – Longitud	Parámetro	Unidad	Medido	Simulado (5 m)
1	-12,0451129, -76,9526085	Temperatura	°C	31,27	30,77
		Humedad Relativa	%	46,57	52,33
		NO_2	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	63,66	6,24
		O_3	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	42,44	18,72
		$\text{PM}_{2,5}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	8,16	6,02
2	-12,0439210, -76,9533756	Temperatura	°C	29,03	30,91
		Humedad Relativa	%	53,58	51,78
		NO_2	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	76,30	14,76
		O_3	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	43,07	18,97
		$\text{PM}_{2,5}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	8,85	6,09

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la tabla 2 se evidencia una alta correspondencia en las variables meteorológicas, con diferencias menores al 15 %, lo que confirma la precisión del modelo en la reproducción de las condiciones térmicas y de humedad. En el caso de los contaminantes, las diferencias más amplias se explican por la ausencia de ciertas fuentes externas de emisión fuera del

dominio de simulación. La consistencia observada en la relación y magnitud de los contaminantes entre las estaciones, tanto en las simulaciones como en los datos reales, demuestra que el modelo captura correctamente las dinámicas de dispersión y concentración, resultando adecuado para representar las condiciones ambientales locales en el entorno de Tecsup.



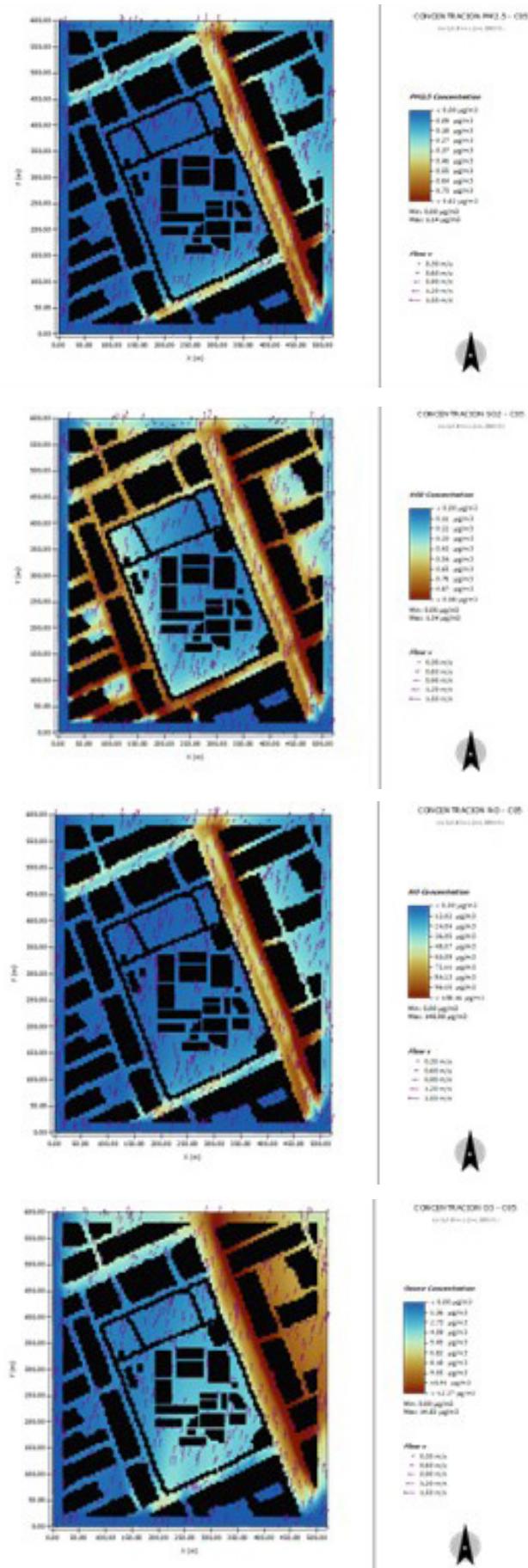


Figura 9. Mapas de velocidad de viento, PM2.5, SO2, NO y O3 con setup de la Estación Santa Anita

Fuente: Elaboración propia.

Tal como se muestra en la figura 9, la distribución de la velocidad del viento está influenciada por la configuración urbana y la presencia de edificaciones. Se observan variaciones significativas, con valores entre 0,14 m/s y 1,30 m/s. En las zonas interiores de Tecsup, entre edificaciones, la velocidad es menor (0,14–0,65 m/s) debido al efecto de obstrucción, mientras que en las zonas exteriores y en la avenida Huarochirí se registran las mayores velocidades (0,78–1,30 m/s) a causa de la dirección predominante del viento.

En cuanto a los valores registrados para los contaminantes, el ozono mostró concentraciones alrededor de 20 µg/m³ dentro del campus de Tecsup, aunque en los exteriores estos valores llegaron a duplicarse. En el caso del PM_{2,5} y del NO₂, las concentraciones simuladas se encuentran en el rango de 6 y 7 µg/m³ respectivamente, y, de igual manera, pueden duplicarse o triplicarse fuera del campus. Esto indica que los valores registrados dentro del campus pueden considerarse dentro de los niveles de contaminación «buena» o «moderada», mientras que en los exteriores pueden alcanzar niveles «insalubres para grupos sensibles» o «insalubres».

El PM_{2,5} sigue un patrón similar al del NO₂ y el NO, con las mayores concentraciones en la avenida Huarochirí (0,46–0,82 µg/m³) y un valor máximo de 1,14 µg/m³. Las avenidas Cascanueces y Santa Ana presentan niveles intermedios (0,18–0,46 µg/m³), mientras que dentro de Tecsup los valores son menores (0–0,18 µg/m³). Estos resultados evidencian la influencia de la estructura urbana en la dispersión de contaminantes y cómo la vegetación puede contribuir a mitigar sus concentraciones.

Descripción, con base en los resultados, de las zonas a mejorar

Para estimar la comodidad del peatón, se calcularon los parámetros de PMV (*Predicted Mean Vote*), cuyo valor varía entre –5 y 5. Los valores negativos indican que la persona experimenta sensación de frío, mientras que los positivos reflejan sensación de calor. Un valor de 0 representa una condición de confort térmico, en la que la persona se siente perfectamente cómoda.

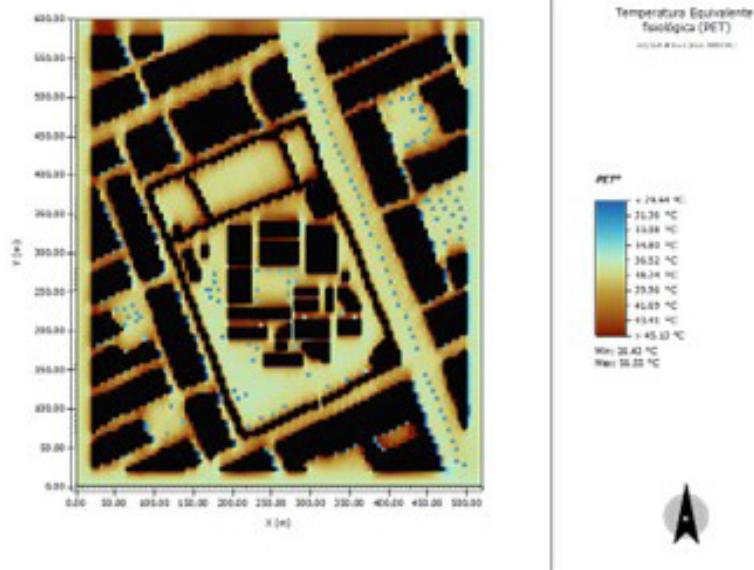


Figura 10. Mapa de PMV de la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia.

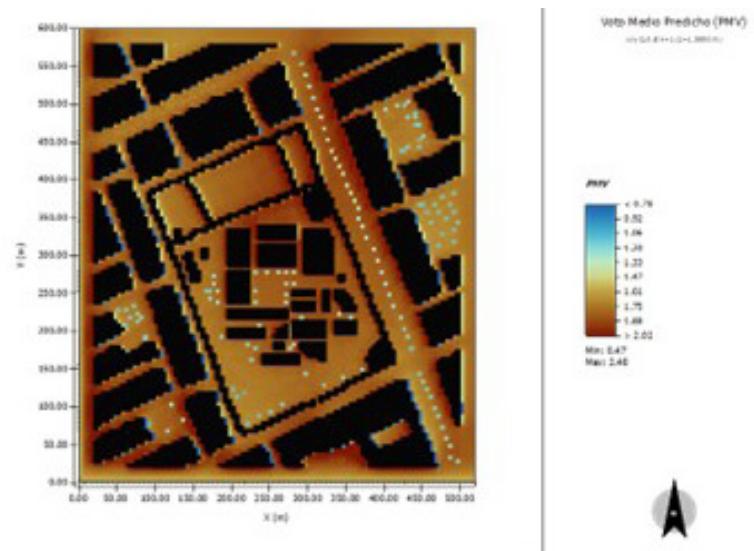


Figura 11. Mapa PET de la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia.

Para las instalaciones de Tecsup se observa, según la figura 10, que los valores de PMV (*Predicted Mean Vote*) varían entre 1,47 y 2,48, lo que indica que el peatón percibe un ambiente caluroso en todo el instituto, excepto en las zonas donde hay árboles. En cuanto a los valores de PET (*Physiological Equivalent Temperature*), mostrados en la figura n.^o 11, este índice evalúa la percepción humana del confort térmico en

extiores, considerando factores como la temperatura del aire, la humedad, la radiación solar y el viento. Los peatones perciben temperaturas entre 36,5 °C y 56,6 °C en todo Tecsup, salvo cuando se encuentran bajo un árbol o en las sombras proyectadas por los edificios. Cabe resaltar que, al tener edificaciones de un solo piso en su mayoría, Tecsup no genera sombras suficientes a las 14:00 horas.



Figura 12. Posibles zonas a mejorar

Fuente: Elaboración propia.

Con base en los resultados obtenidos, se observó que el campus de Tecsup debería implementar estrategias orientadas a mejorar la calidad del aire y la comodidad del peatón, ya que los resultados actuales no son favorables. No obstante, es prioritario intervenir en las áreas donde los peatones transitán con mayor frecuencia, dado que se identificó que los niveles más elevados de contaminación se concentran de manera significativa en la entrada de Tecsup, específicamente en las cercanías de la avenida Cascanueces.

En la figura n.^o 12, las zonas sombreadas con borde verde representan áreas donde podrían incorporarse árboles que contribuyan a disminuir la concentración de contaminantes en el aire. Las zonas sombreadas con borde amarillo corresponden a espacios en los que podrían implementarse árboles altos, toldos, quinchos o estructuras que generen sombra. La plaza central es un espacio con alto potencial de mejora, ya que constituye un área amplia de uso común entre la comunidad de Tecsup. Del mismo modo, los pasillos que dividen los pabellones de los edificios aledaños se identifican como zonas críticas de alta contaminación, lo que las convierte en puntos prioritarios para la implementación de medidas destinadas a mejorar la calidad del aire.

CONCLUSIONES

El modelado microclimático y de calidad del aire en el campus de Tecsup permitió identificar con precisión las zonas más críticas de contaminación y de estrés térmico. Los resultados mostraron que las concentraciones de material particulado superaron los límites establecidos por el ECA para aire, alcanzando valores máximos de $PM_{10} = 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $PM_{2,5} = 126,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$, frente a los límites de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. En cambio, el O_3 (55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y el CO (2 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) se mantuvieron dentro de los valores permitidos. Estas concentraciones más elevadas se localizaron principalmente en las avenidas Huarochirí y Cascanueces, coincidiendo con los mayores flujos vehiculares.

En términos microclimáticos, las velocidades del viento oscilaron entre 0,14 m/s y 1,30 m/s, lo que condicionó la dispersión de contaminantes. Los índices de confort térmico evidenciaron un estrés térmico moderado a severo, con valores de PMV entre 1,47 y 2,48 y de PET entre 36 °C y 56 °C, superando los umbrales de confort establecidos para ambientes urbanos. Las zonas bajo cobertura vegetal fueron las únicas que mantuvieron condiciones cercanas al confort térmico.

Estos resultados demuestran la validez y aplicabilidad del modelo ENVI-met para representar las dinámicas locales de dispersión de contaminantes y temperatura en entornos urbanos. No obstante, se reconoce como limitación la ausencia de fuentes de emisión externas al dominio y la simulación de corto plazo, lo que podría generar diferencias respecto de mediciones continuas.

Se recomienda priorizar la implementación de infraestructura verde (árboles de copa amplia, jardines lineales y techos vegetales) y estructuras de sombra en zonas de alta exposición térmica, junto con una gestión del tráfico interno y perimetral que reduzca la emisión de contaminantes. Asimismo, los futuros estudios deberían incorporar simulaciones multitemporales y escenarios de mitigación para evaluar la efectividad de estas medidas a largo plazo.

REFERENCIAS

- [1] Chatzinikolaou, E., Chalkias, C., & Dimopoulou, E. (2018). *Urban microclimate improvement using ENVI-met climate model*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4, 69–76. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-69-2018>
- [2] Fernández, R., Allende, D. G., Castro, F., Cremades, P., & Puliafito, S. E. (2010). Modelado regional de la calidad de aire utilizando el modelo WRF/Chem: Implementación de datos globales y locales para Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14, 43–50. Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (ASADES). ISSN 0329-5184.
- [3] Ouyang, W., Sinsel, T., Simon, H., Morakinyo, T., Liu, H., & Ng, E. (2021). Evaluating the thermal-radiative performance of ENVI-met model for green infrastructure typologies: Experience from a subtropical climate. *Building and Environment*, 207, 108427. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108427>
- [4] Pérez-Vega, C., Ramírez-Arias, J. A., López-Cruz, I. L., Arteaga-Ramírez, R., & Cervantes-Osornio, R. (2021). 3D computational fluid dynamics modeling of temperature and humidity in a humidified greenhouse. *Revista Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 13(1). <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2020.10.060>
- [5] Pinedo-Jáuregui, E., Gamarra, D., & Quispe, L. J. (2020). Análisis del control de emisiones atmosféricas vehiculares en Lima Metropolitana. *South Sustainability*, 1(1), 11–22. <https://doi.org/10.21142/SS-0101-2020-005>
- [6] Schalau, S., Habib, A., & Michel, S. (2021). Atmospheric wind field modelling with OpenFOAM for near-ground gas dispersion. *Atmosphere*, 12(8), 933. <https://doi.org/10.3390/atmos12080933>

- [7] Schneider, M., Tötzer, T., Bügelmayer-Blaschek, M., & Berg, R. (2023). Pitfalls and potentials of microclimate simulations in urban planning. *Journal of Urban Planning and Development*, 149(4), 04023002. <https://doi.org/10.1061/JUPDDM. UPENG-450>

- [8] Senamhi. (2014). *Informe de calidad del aire en Lima Metropolitana*. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03201SENA-141.pdf>

- [9] Zhao, M., Vicedo-Cabrera, A. M., Guo, Y., Tong, S., Coelho, M., Saldiva, P., & others. (2023). Joint effect of heat and air pollution on mortality in 620 cities of 36 countries. *Environment International*, 181, 108258. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108258>

ACERCA DEL AUTOR

Lourdes Diaz Espinoza

(2002, Lima, Perú) es estudiante de Ingeniería Ambiental en la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC). Actualmente, cursa el noveno ciclo de su carrera. Posee formación en gestión ambiental, normativa ambiental y evaluación de impactos, con experiencia en monitoreo de componentes físicos y biológicos. Ha desarrollado investigaciones sobre calidad del aire, gestión ambiental y sostenibilidad, áreas en las que busca generar un impacto positivo a través de soluciones prácticas e innovadoras.

@ lourdes.diaz@utec.edu.pe

Daniel Vicente Horna Muñoz

(1988, Lima, Perú) es el director del departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC). Obtuvo su PhD de la Universidad de Iowa y MSc de Stanford University, ambos en ingeniería civil. Ha desarrollado investigaciones sobre la dinámica de fluidos computacional aplicada a fluidos ambientales en temas relacionados con contaminación ambiental, inundaciones y contaminación atmosférica.

@ dhorna@utec.edu.pe

Enviado: 29-04-2025

Revisado: 15-09-2025

Aceptado: 17-10-2025



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.