



**Influencia de la configuración urbana sobre la dispersión del PM_{2.5} en el
cañón urbano de la Avenida Oriental en la ciudad de Medellín**

Juan David Ramírez Cadavid

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería Ambiental

Directora

Ángela María Rendón Pérez, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita

(Ramírez Cadavid, 2024)

Referencia

Ramírez Cadavid, J. D. (2024). *Influencia de la configuración urbana sobre la dispersión del PM_{2.5} en el cañón urbano de la Avenida Oriental en la ciudad de Medellín, 2024* [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Estilo APA 7 (2020)



Maestría en Ingeniería Ambiental, Cohorte XXVII.

Grupo de Investigación Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA).

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
I. Agradecimientos	VIII
II. Abreviaturas y Simbología	IX
III. Resumen.....	XI
IV. Abstract	XII
1. Introducción	1
2. Revisión del estado del arte.....	4
2.1 Características generales de la dispersión de contaminantes en cañones urbanos 4	
2.2 Efectos de las condiciones de movimiento.....	6
2.2.1 Efectos de flujo.....	6
2.2.1.1 Velocidad del viento	6
2.2.1.2 Variación temporal del viento	7
2.2.1.3 Fluctuaciones del flujo turbulento.....	8
2.2.2 Dirección del viento	9
2.3 Efectos térmicos	10
2.3.1 Estratificación térmica.....	10
2.3.2 Posición termal.....	12
2.4 Efectos de la morfología urbana	13
2.5 Modelo CFD	13
2.6 Exposición e inmisión en cañones urbanos	15
3. Metodología.....	16
3.1 Enfoque metodológico	16
3.2 Selección del caso de estudio	16
3.3 Variables meteorológicas y de calidad del aire	21
3.4 Selección del modelo numérico	24
3.5 Escenarios de Análisis Propuestos	26

4.	Resultados y Discusión	27
4.1	Selección del área de estudio	27
4.2	Análisis de las condiciones locales meteorológicas y de calidad del aire	33
4.2.1	Análisis estadístico y exploratorio de los datos	33
4.2.2	Distribución temporal	41
4.2.3	Distribución espacial	49
4.3	Descripción de las características del cañón urbano	52
4.4	Condiciones para el modelo CFD y tasa de emisión	53
4.4.1	Condiciones Iniciales y de frontera	53
4.4.2	Tasa de Emisión del Contaminante	54
4.5	Dominio computacional y modelo geométrico	55
4.5.1	Suposiciones del Modelo	55
4.5.2	Dominio del modelo	56
4.5.3	Modelo geométrico	58
4.5.4	Generación del mallado y análisis de sensibilidad	60
4.6	Modelación CFD de los casos de estudio	62
4.6.1	Escenario 1: condiciones meteorológicas promedio y morfología urbana actual sin vía preferencial del Metroplús	63
4.6.2	Escenario 2: condiciones meteorológicas promedio y calidad del aire variable	66
4.6.3	Escenario 3: condiciones meteorológicas promedio y morfología urbana actual con vía preferencial del Metroplús	70
4.6.4	Escenario 4: condiciones meteorológicas desfavorables, calidad del aire promedio y morfología urbana actual con vía preferencial del Metroplús	74
4.6.5	Análisis de Estabilidad Atmosférica	76
5.	Recomendaciones	77
6.	Conclusiones	81
7.	Bibliografía	83

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Descripción de los factores y aspectos condicionantes para la matriz de resistencia.	17
Tabla 2. Clasificación de las variables condicionantes para la matriz de resistencia.	18
Tabla 3. Resultados de pesos y consistencia para la categorización de la matriz de resistencia.	27
Tabla 4. Características de los potenciales cañones urbanos.	28
Tabla 5. Estaciones de monitoreo de calidad del aire y meteorológicas seleccionadas. ...	21
Tabla 6. Delimitación de vértices para la zona de estudio.	29
Tabla 7. Características representativas de las edificaciones y las vías ubicadas en el cañón urbano de la Avenida Oriental.	30
Tabla 8. Estado de la información de las estaciones meteorológicas y de calidad del aire usadas en el estudio.	34
Tabla 9. Resultados de prueba de Homogeneidad y tendencia para las estaciones meteorológicas y de calidad del aire.	35
Tabla 10. Identificación de valores atípicos 1 y 2 para las variables en las estaciones meteorológicas y de calidad del aire.	40
Tabla 11. Resumen estadístico de las variables meteorológicas y de calidad del aire para cada estación.	41
Tabla 12. Estadísticos de error para selección de métodos de interpolación.	49
Tabla 13. Características de morfología urbana en el cañón urbano de la Avenida Oriental.	52
Tabla 14. Condiciones ambientales iniciales para el modelo.	53
Tabla 15. Condiciones iniciales, de frontera y numéricas del modelo CFD.	58
Tabla 16. Comparación de la concentración promedio de PM _{2.5} en los escenarios de control.	70

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Cañón urbano limitado por una vía, un viaducto y cobertura vegetal (izquierda) y viaducto limitado por edificaciones en sus laterales (derecha). Tomado de Cai et al., (2020).	4
Figura 2. Cambios en los perfiles de velocidad del viento en relación al número de Reynolds - intensidad de la turbulencia - concentración de contaminantes. Tomado de Li et al., (2020).	7
Figura 3. Relación entre la velocidad y dirección del viento y la concentración de contaminante para cañones urbanos cortos. Tomado de Hao et al., (2019).	10
Figura 4. Diferentes estratificaciones termales para un aspecto H/W=1. Tomado de Li et al., (2020).	11
Figura 5. Esquema del enfoque metodológico.	16
Figura 6. Descripción de la ruta metodológica para la selección del tramo de cañón urbano.	17
Figura 7. Procesamiento espacial de las variables para la construcción de la matriz de resistencia.	20
Figura 8. Matriz de resistencia espacial para selección del cañón urbano.	21
Figura 9. Selección del cañón urbano de la Avenida Oriental a través de la evaluación de la matriz de resistencia.	27
Figura 10. Ubicación del tramo de cañón urbano con respecto a las estaciones de monitoreo.....	23
Figura 11. Ruta de procesamiento de los datos de las estaciones de monitoreo.	24
Figura 12. Selección del tramo de cañón urbano de la Avenida Oriental para el área de estudio.....	30
Figura 13. Detalle del cañón urbano de la Avenida Oriental.....	32
Figura 14. Elementos que componen la configuración urbana del cañón urbano de la Avenida Oriental en la ciudad de Medellín.	33
Figura 15. Análisis de homogeneidad para valores horarios de las estaciones de calidad de aire para el parámetro de evaluación P.M. _{2.5} . De Izquierda a Derecha: COD12, COD80 y COD100.....	37
Figura 16. Análisis de homogeneidad para valores horarios de las estaciones meteorológicas para la temperatura (datos sin tratamiento). De Izquierda a Derecha: COD68, COD202, COD478, COD203, COD419, COD360 y COD367.....	38
Figura 17. Análisis de homogeneidad para valores horarios de las estaciones meteorológicas para la velocidad del viento (datos sin tratamiento). De Izquierda a Derecha: COD68, COD202, COD478, COD203, COD419, COD360 y COD367.	40
Figura 18. Ciclo anual y diario de las estaciones meteorológicas para el parámetro de temperatura. De arriba hacia abajo: COD68, COD202, COD478, COD203, COD419, COD360 y COD367.	44

Figura 19. Ciclo anual y diurno de las estaciones meteorológicas para el parámetro de velocidad del viento. De arriba hacia abajo: COD68, COD202, COD478, COD203, COD419, COD360 y COD367.	45
Figura 20. Rosa de los vientos. De Izquierda a Derecha: COD68, COD202, COD478, COD203, COD419, COD360 y COD367.....	47
Figura 21. Ciclo anual y diurno de las estaciones de calidad de aire para el parámetro de evaluación P.M. _{2.5} . De arriba hacia abajo: COD12, COD80 y COD100.....	48
Figura 22. Distribución espacial de los campos promedios de concentración de PM _{2.5} , temperatura, velocidad y dirección del viento (respectivamente).	51
Figura 23. Área del dominio de simulación para la ubicación de la fuente de emisión en el interior del cañón urbano coincidente con las vías.....	55
Figura 24. Comportamiento de los perfiles de velocidad del viento (a), energía cinética turbulenta (b) y disipación de la energía cinética turbulenta (c), para $U_d=2.03$ m/s, $\alpha=0.22$, $H_d=2.0$ m, $C_\mu=0.09$, $\delta=1,000$ m, $\kappa=0.04$ y $U^*=0.26$	57
Figura 25. Configuración del cañón urbano y definición del sistema de malla.	59
Figura 26. Relación entre la concentración de PM _{2.5} y el tamaño de la malla expresada en metros.	60
Figura 27. Identificación de los cortes de las secciones transversales (X) del cañón urbano.	62
Figura 28. Campo de concentración de PM _{2.5} en el cañón urbano bajo condiciones de 2.0 metros sobre el nivel de la vía, velocidad del viento de 2.03 m/s, temperatura de 22.24°C, dirección del viento de 58.23° y sin vía preferencial del Metroplús.	63
Figura 29. Concentración de PM _{2.5} en el cañón urbano para las secciones transversales (X) y longitudinal (Y) para el escenario 1.	66
Figura 30. Campo de concentración de PM _{2.5} en el cañón urbano bajo condiciones de 2.0 metros sobre el nivel de la vía, velocidad del viento de 2.03 m/s, temperatura de 22.24°C, dirección del viento de 58.23° y concentración de 12.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	68
Figura 31. Campo de concentración de PM _{2.5} en el cañón urbano bajo condiciones de 2.0 metros sobre el nivel de la vía, velocidad del viento de 2.03 m/s, temperatura de 22.24°C, dirección del viento de 58.23° y concentración de 68.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	69
Figura 32. Campo de concentración de PM _{2.5} en el cañón urbano bajo condiciones de 2.0 metros sobre el nivel de la vía, velocidad del viento de 2.03 m/s, temperatura de 22.24°C, dirección del viento de 58.23° y con vía preferencial del Metroplús.	71
Figura 33. Concentración de PM _{2.5} en el cañón urbano para las secciones transversales (X) y longitudinal (Y) para el escenario 2.	73
Figura 34. Campo de concentración de PM _{2.5} en el cañón urbano bajo condiciones de 2.0 metros sobre el nivel de la vía, velocidad del viento de 0.467 m/s, temperatura de 22.24°C, dirección del viento de 238.23° y con vía preferencial del Metroplús.....	75
Figura 35. Concentración de PM _{2.5} en el cañón urbano para las secciones transversales (X) y longitudinal (Y) para el escenario 3.	76
Figura 36. Distribución de la estabilidad atmosférica en el cañón urbano para cada escenario objeto de estudio.	77

I. Agradecimientos

Expreso mis agradecimientos a todas las personas que estuvieron inmersas en este trabajo de investigación, porque sin ellas no hubiera sido posible culminar este proceso. De primera mano, agradezco a la vida y a Dios. Agradezco a la empresa BIOTECN INDUSTRIAS Y SERVICIOS S.A.S. y a su equipo de trabajo por haberme brindado los espacios para la culminación de este trabajo de investigación, además, por ponerme justo en el camino del ordenamiento territorial y análisis de datos, con ustedes ha sido una escuela de enseñanza sobre el tema ambiental desde el urbanismo. Debo también un agradecimiento muy especial a los profesores de la Facultad de Ingeniería del programa de la Maestría en Ingeniería Ambiental y la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Antioquia, por el apoyo en las asesorías y consultorías durante este proceso de investigación.

Agradezco especialmente, a mi directora del trabajo de investigación la profesora Ph.D Ángela María Rendón Pérez, por la paciencia, la dedicación y su conocimiento durante los diferentes espacios de asesoría para el desarrollo de este trabajo de investigación, el cual como lo planteamos inicialmente será una puerta para que futuras personas puedan estudiar y analizar los diferentes fenómenos de contaminación atmosférica en la ciudad de Medellín a través de modelos CFD.

Agradezco a mis amigos, colegas y familia, estos últimos un profundo agradecimiento por la paciencia y el apoyo, especialmente por el sacrificio de los tiempos en familia y que gracias a ustedes he culminado de su lado este proceso. Por último, agradezco al lector de este trabajo de investigación que se toma el tiempo de escudriñar y analizar la información que plasmo durante el proceso de investigación que realice durante casi dos años, estos son mis primeros pasos en la modelación física y CFD con el tema de contaminación atmosférica, esperando que sea una motivación para investigar esta área de la ingeniería, como lo ha sido para mí.

II. Abreviaturas y Simbología

Símbolo o abreviatura	Significado o descripción
AHP	Análisis Jerárquico Ponderado (por sus siglas en inglés)
Σ	Sumatoria o “Sigma”
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional (por sus siglas en inglés)
PM_{2.5}	Material Particulado Fracción Fina Respirable de diámetro 2.5 μm
PM₁₀	Material Particulado Fracción de diámetro 10.0 μm
μ	“mu” descripción para micra o micro
DEM	Modelo Digital de Elevación (por sus siglas en inglés)
L	Largo del cañón urbano (por sus siglas en inglés)
H	Altura de las edificaciones (por sus siglas en inglés)
W	Ancho del cañón urbano (por sus siglas en inglés)
TPI	Índice de Posicionamiento Topográfico (por sus siglas en inglés)
ASE	Error Cuadrático Absoluto (por sus siglas en inglés)
RMSE	Raíz del error cuadrático medio (por sus siglas en inglés)
RMSS	Raíz Cuadrada de las Diferencias Sucesivas al Cuadrado (por sus siglas en inglés)
Modelo K-ϵ	Modelo de turbulencia asociado a la energía cinética (κ) y energía de disipación (ϵ)
Z_H	Altura del techo
Re	Número de Reynolds
θ	Dirección del viento “Theta”
ν	Viscosidad cinemática
U_{eff} o U_H	Velocidad del viento efectiva
T₀	Temperatura en el suelo
T_H	Temperatura en la parte superior del cañón urbano
R_i	Número de Richardson
g	Aceleración de la gravedad
TPT	Turbulencia producida por tráfico
TPF	Flujo producido por tráfico
iF	Fracción de inmisión
E_t	Exposición a contaminantes diarios
RANS	Ecuaciones promedias de Navier-Stokes (por sus siglas en inglés)
LES	Simulación de grandes remolinos (por sus siglas en inglés)
RNG	Grupo de renormalización (por sus siglas en inglés)
k_{eff}	Conductividad térmica efectiva
\bar{J}_j	Flujo de difusión

S_h	Fuente de energía externa
C_i	Concentración másica
ρ	Densidad
p	Presión
α_k	Es el valor de k del número de Prandtl efectivo inverso
α_ϵ	Es el valor de ϵ del número de Prandtl efectivo inverso
μ_{eff}	Viscosidad turbulenta efectiva
t	Tiempo
u_i	Componentes de las velocidades

III. Resumen

El trabajo de investigación presenta un estudio detallado sobre la distribución de la concentración de partículas finas (PM_{2.5}) en el cañón urbano de la Avenida Oriental en la ciudad de Medellín - Antioquia, utilizando la metodología CFD en el software COMSOL Multiphysics. Se proponen cinco escenarios de análisis, lo que permite una visión completa del comportamiento de la contaminación en el entorno estudiado.

En el escenario 1, con condiciones meteorológicas promedio y morfología urbana actual sin vía preferencial del Metroplús, se observa una variación en la distribución de la concentración de PM_{2.5} en los cortes transversales del cañón urbano. El flujo se ve influenciado por las estructuras de los edificios, generando zonas de estancamiento y formación de vórtices. La concentración es mayor en el interior del cañón urbano y en la zona de salida. La concentración disminuye a altitudes superiores. En el escenario 2A, con reducción de la concentración de PM_{2.5}, se evidencia una mejora significativa en la calidad del aire en todos los puntos de medición. En el escenario 2B, con aumento de la concentración, se observa un deterioro en la calidad del aire. A pesar del incremento en la concentración, la variación en el cañón urbano es limitada debido a la dispersión hacia zonas de baja concentración.

En el escenario 3, con la introducción de la estación del Metroplús, se observa una redistribución en la concentración de PM_{2.5}. La infraestructura afecta la dispersión y el flujo de contaminantes en un radio de hasta 65 metros alrededor de la estructura. En el escenario 4, con condiciones meteorológicas desfavorables y baja velocidad del viento, se generan fenómenos atmosféricos que conducen a la acumulación de contaminantes en el cañón urbano.

Se concluye que la concentración de PM_{2.5} está fuertemente influenciada por factores como la geometría urbana, la velocidad y dirección del viento, así como la presencia de estructuras. Estos hallazgos subrayan la necesidad de considerar estos factores en la evaluación y mitigación de la contaminación en entornos urbanos, desde el punto de vista del parque automotor y la planificación urbana del territorio.

IV. Abstract

The research work presents a detailed study of the distribution of fine particulate matter (PM_{2.5}) concentration in the urban canyon of Avenida Oriental in the city of Medellín, Antioquia, using the Computational Fluid Dynamics (CFD) methodology in the COMSOL Multiphysics software. Five analysis scenarios are proposed, allowing for a comprehensive understanding of pollution behavior in the studied environment.

In scenario 1, with average meteorological conditions and the current urban morphology without the preferential Metroplus route, a variation in the distribution of PM_{2.5} concentration is observed in the cross-sections of the urban canyon. The flow is influenced by the building structures, generating stagnant zones and vortex formation. The concentration is higher inside the urban canyon and at the outlet area. The concentration decreases at higher altitudes. In scenario 2A, with a reduction in PM_{2.5} concentration, a significant improvement in air quality is evident at all measurement points. In scenario 2B, with an increase in concentration, a deterioration in air quality is observed. Despite the concentration increase, the variation in the urban canyon is limited due to dispersion towards low concentration areas.

In scenario 3, with the introduction of the Metroplus station, a redistribution of PM_{2.5} concentration is observed. The infrastructure affects the dispersion and flow of pollutants in a radius of up to 65 meters around the structure. In scenario 4, with unfavorable meteorological conditions and low wind speed, atmospheric phenomena are generated leading to the accumulation of pollutants in the urban canyon.

It is concluded that the PM_{2.5} concentration is strongly influenced by factors such as urban geometry, wind speed and direction, as well as the presence of structures. These findings highlight the need to consider these factors in the assessment and mitigation of pollution in urban environments, from both the perspective of the automotive fleet and urban planning of the territory.

1. Introducción

Actualmente más del 50% de la población global habita en las ciudades y se espera que este número crezca hasta el 60% en 2030 y aproximadamente hasta el 70% en 2050 (Ysebaert et al., 2021; Reiminger et al., 2020). Este acelerado crecimiento poblacional ha significado retos para aspectos del hábitat social y la movilidad, incrementando el número de vehículos y la demanda de construcción de edificios densamente poblados en vías estrechas (He et al., 2017). En este sentido, el crecimiento de la presión demográfica aumenta y agudiza la problemática de calidad del aire en los ambientes urbanos, dando lugar a múltiples implicaciones tanto ambientales como para la salud humana (Ysebaert et al., 2021; Reiminger et al., 2020; Li et al., 2020).

De manera similar, el crecimiento de la población urbana impulsa la oferta y demanda económica, pero también impone retos en aspectos de vivienda, permitiendo construcciones de grandes urbes en áreas pequeñas (Li et al., 2020; Li et al., 2021). Este tipo de construcción tiene consecuencias sobre la dispersión en el aire de los contaminantes, a través del efecto denominado “cañón urbano” o “capa de dosel urbano”, que se entiende como el espacio o volumen de atmósfera contenido entre las edificaciones, en el cual la ventilación se ve considerablemente limitada, dando lugar a una mala calidad del aire en la escala local y la microescala (He et al., 2017; Li et al., 2021 & Ming et al., 2021). Estas zonas de alta densidad se caracterizan por infraestructuras elevadas, y altos niveles de flujo de peatones, densidad habitacional y flujo vehicular (Hang et al., 2016).

Las emisiones vehiculares son las principales fuentes de contaminantes del aire en las ciudades (Hagler et al., 2011). Entre los principales contaminantes de origen urbano están el material particulado (MP), el monóxido de carbono (CO), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) (He et al., 2017; Wang & Wang, 2021; Reiminger et al., 2020). Contaminantes como el PM_{2.5} (material particulado de tamaño igual a 2.5 μm) afecta la salud a través de múltiples enfermedades respiratorias y cardiovasculares, además de tener implicaciones económicas y ejercer presión sobre el sistema de salud pública (Li et al., 2020; Ding et al., 2019). De hecho, este contaminante ocupa uno de los principales lugares como factor de riesgo ambiental causando la muerte a más de 4.2 millones de personas en el mundo cada año, lo que representa el 7.6% de mortalidad global (Hang et al., 2018).

La problemática de la contaminación del aire gana aún más relevancia en el contexto de grandes ciudades en las que las edificaciones se encuentran cerca de las vías, y en la que las personas pasan cerca del 90% del tiempo al interior de sus viviendas o espacios de trabajo (Hang et al., 2018), lo que agudiza la exposición a la contaminación del aire emitida desde la superficie (Hao et al., 2019).

En particular, estudios previos han mostrado que el material particulado es uno de los principales indicadores de la mala calidad del aire, puesto que las concentraciones

permisibles de este tipo de contaminante en espacios como los cañones urbanos se pueden exceder fácilmente (Whang et al., 2018). Suhong & Lin (2019), mencionan que las personas que viven en este tipo de espacios como los cañones urbanos sufren de dobles periodos de exposición causados por los tiempos que pasan en las viviendas más los que pasan en los espacios de trabajo. Estudios en India reportan una concentración horaria de PM_{2.5} por encima de 53.9 µg/m³ (Pant et al., 2017), y en China sólo cerca del 1% de las 500 ciudades más grandes cumplen las guías de la OMS del año 2015 (Zhang & Cao, 2015).

Debido a sus importantes efectos sobre la salud, el PM_{2.5} se ha convertido en muchos países del mundo en el principal contaminante criterio para monitoreo y declaración de eventos de interés atmosférico o de salud pública (Suhong & Lin, 2019). Además, ha sido uno de los principales contaminantes usado en modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) y geoespaciales a diferentes escalas (Suhong & Lin, 2019; Li et al., 2021). Por ejemplo, en el Valle de Aburrá, el PM_{2.5} es uno de los contaminantes criterio para el monitoreo y la toma de decisiones relacionadas con la calidad del aire (AMVA, 2018).

Diferentes estudios, han mostrado que características de los cañones urbanos como los parámetros arquitectónicos, las condiciones meteorológicas particulares y las emisiones de contaminantes relacionadas con el tráfico vehicular, son los principales factores que influyen en la contaminación del aire, considerando como contaminante criterio el material particulado en fracción gruesa (PM₁₀) y fina (PM_{2.5}) (He et al., 2017; Suhong & Lin, 2019; Li et al., 2021; Ming et al., 2021). En las últimas décadas, diferentes investigaciones han estudiado formas efectivas de reducir la concentración de contaminantes emitidos por automóviles, considerando factores como las configuraciones de las vías, las condiciones meteorológicas, y la altura de las barreras arquitectónicas (Wang & Wang, 2021). Grandes volúmenes de tráfico, condiciones meteorológicas desfavorables, y cañones urbanos profundos ocasionados por grandes edificios o infraestructuras, son espacios asociados generalmente con altas concentraciones de contaminantes (He et al., 2017).

Los estudios e investigaciones de la calidad del aire en cañones urbanos han aumentado, debido a los niveles de detalle alcanzados tanto en el campo de la medición como en el de la modelación del transporte de contaminantes en la escala local usando CFD's. Ahora es posible estudiar el efecto de fenómenos como la isla de calor urbano, la estabilidad atmosférica, las condiciones de confort térmico urbano y la ventilación urbana sobre el transporte de contaminantes y las condiciones de calidad del aire en las ciudades (Kumar et al., 2015). En la actualidad países como China, Alemania, Japón, Reino Unido, USA y España, han invertido en investigación y regulación interna sobre los efectos de la dispersión de contaminantes en las ciudades a escala de cañón urbano y morfología urbana (Kumar et al., 2018).

Avanzar en el entendimiento de los mecanismos de dispersión de contaminantes en cañones urbanos, puede contribuir al diseño de morfologías más adecuadas en las ciudades que lleven a reducir la recirculación y concentración de contaminantes,

particularmente en zonas densamente pobladas y cercanas a vías de alto flujo vehicular (Ding et al., 2019; Wang & Wangs, 2021).

El Valle de Aburrá, ubicado en la región central de Colombia, ha experimentado una notable urbanización en las últimas décadas. Con una creciente densidad poblacional y un rápido desarrollo industrial y comercial, la zona ha experimentado una transformación significativa en su estructura urbana (AMVA, 2018). Esta expansión ha llevado a la formación de cañones urbanos, caracterizados por edificaciones de gran altura y calles estrechas, que poseen una influencia sustancial en la dispersión de contaminantes atmosféricos. La alta densidad de construcción y la topografía montañosa que rodea el valle pueden generar fenómenos de recirculación, afectando la calidad del aire en la región. Además, factores climáticos y meteorológicos también influyen en la concentración y dispersión de contaminantes en estos cañones urbanos.

En este sentido, este trabajo busca avanzar en el entendimiento de las dinámicas de transporte de los contaminantes emitidos desde la superficie en un cañón urbano en el centro de la ciudad de Medellín. Para esto, se plantea la pregunta de investigación: ¿cómo la configuración urbana actual puede afectar la dispersión del contaminante PM_{2.5} en un tramo de cañón urbano en la Avenida Oriental en la ciudad de Medellín? Los avances alcanzados permitirán comprender mejor los mecanismos de dispersión de contaminantes en la microescala y la escala local en la zona de estudio.

El objetivo general del proyecto es: analizar la influencia de la configuración urbana sobre la dispersión de material particulado PM_{2.5} en un tramo del cañón urbano de la Avenida Oriental en la ciudad de Medellín. Para el cumplimiento de este objetivo general, se propusieron cuatro objetivos específicos:

- a) Analizar las características generales de la configuración urbana del tramo de interés en el cañón urbano a través de recopilación y procesamiento de información detallada.
- b) Modelar el campo de flujo, la dispersión y transporte del material particulado PM_{2.5} a través del cañón urbano de estudio, usando un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD).
- c) Evaluar el papel de los diferentes escenarios de configuración urbana como agentes modificadores de la dispersión de material particulado PM_{2.5} en el tramo de interés del cañón urbano en la Avenida Oriental.
- d) Discutir acerca de los efectos e implicaciones de los patrones arquitectónicos, así como de los campos de flujo sobre las concentraciones de contaminantes en el cañón urbano y de las posibles estrategias para el apoyo en la toma de decisiones encaminadas al mejoramiento de la configuración urbana.

2. Revisión del estado del arte

2.1 Características generales de la dispersión de contaminantes en cañones urbanos

El concepto de cañón urbano fue introducido inicialmente por Nicholson en el año 1975, y es definido como la composición de dos edificios dispuestos continuamente a ambos lados de una calle en cuya área principal se permite el desarrollo de actividades (Figura 1) (Ming et al., 2021 & Hang et al., 2018). De acuerdo a Ming et al., (2021), Li et al., (2016) & Reiminger et al., (2020), el impacto diferentes factores sobre la calidad ambiental de los cañones urbanos ha sido investigado a través de mediciones in situ, pruebas en túnel de viento, y simulaciones numéricas. Los factores que influyen se pueden dividir a grandes rasgos en tres categorías (He et al., 2017 & Ming et al., 2021):

- A. La morfología del cañón urbano:** relación de aspecto del cañón urbano (relación entre la altura del edificio y el ancho de la calle H/W), factores de simetría geométrica, forma de los techos, obstrucción de instalaciones en inmediaciones del cañón urbano como la vegetación, viaductos, muros bajos, entre otros.
- B. Las condiciones meteorológicas:** la velocidad y dirección del viento, los efectos térmico causados por la radiación solar.
- C. Condiciones de movimiento:** causada por el movimiento de los vehículos en la vía, contaminación secundaria causada por reacciones fotoquímicas y la forma de las fuentes de emisión.



Figura 1. Cañón urbano limitado por una vía, un viaducto y cobertura vegetal (izquierda) y viaducto limitado por edificaciones en sus laterales (derecha). Tomado de Cai et al., (2020).

Sofowote et al., (2021) reportaron los efectos de los viaductos en el patrón de flujo y difusión de partículas en cañones urbanos. Los resultados demostraron que los viaductos inducen más fuentes de material particulado y tienen un mayor impacto en patrones de flujo. Ming et al., (2021) también reportaron la influencia de la altura de viaductos en las calles con diferentes cubiertas en el campo de flujo y la difusión de contaminantes. El estudio mostró que la obstrucción del viaducto provoca un flujo inverso, lo que agrava la contaminación en el cañón urbano. Hassan et al., (2020 a) examinaron el impacto de la configuración de un

viaducto y encontraron que el viaducto genera un vórtice central que puede afectar sustancialmente la difusión de contaminantes. La ubicación de la fuente de contaminación también es un factor clave que afecta la dispersión de los contaminantes (Ysebaert et al., 2021).

La influencia de la forma del techo en el campo de flujo y en la difusión de contaminantes en el cañón urbano fue reportada por Ming et al., (2021), que mostraron que la pendiente del techo puede cambiar la estructura del vórtice en el cañón urbano y por lo tanto la dispersión de los contaminantes. Así mismo, Reiminger et al., (2020) estudiaron la influencia de cinco formas de techos con varias alturas sobre la difusión de contaminantes, mostrando que la concentración de contaminación con techo acunado hacia arriba y el techo inclinado eran mucho más altos que otros techos en $Z_H / H = 1/3$ (relaciones entre la altura del techo y la altura del edificio). La contaminación más baja y más alta se observaron para techos abovedados y techo con cuña hacia arriba en $Z_H / H = 1/2$, respectivamente.

Varios estudios en campo, comparaciones a través de mediciones en el túnel de viento y simulaciones CFD han permitido investigar el flujo y la dispersión de contaminantes en cañones urbanos (Zhou & Lin et al., 2019 & Ding et al., 2019). De acuerdo con esos estudios, los parámetros urbanos más significativos han sido el aspecto de la calle, altura del edificio, ancho de la calle, dirección y velocidad del viento, la vegetación cercana a las vías, los factores de forma urbano, la forma del techo del edificio, estratificaciones térmicas, y la fuerza de flotación inducida por calentamiento de los materiales (He et al., 2017).

En condiciones meteorológicas neutrales, los patrones de flujo en cañones 2D con un acercamiento perpendicular, el viento se puede clasificar en cuatro tipos dependiendo de las relaciones de aspecto de la calle (He et al., 2017):

- A. Flujo de Rugosidad Aislado, ocurre cuando la relación $H/W < 0.3$
- B. Flujo de estela de interferencia, se presenta cuando $0.3 < H/W < 0.7$
- C. Flujo de rozadura, ocurre cuando la relación $0.7 < H/W < 1.67$
- D. Flujo multi-vórtice, se presenta para $H/W > 1.67$

De acuerdo con Li et al., (2020) cuando $H/W=2$, dos vórtices contrarrotantes se pueden presentar, mientras que de 3 a 5 vórtices verticales alineados se dan para valores de $H/W=3 - 5$. Cañones urbanos profundos de gran altura con múltiples vórtices suelen experimentar mayores niveles de contaminación del aire en la superficie del suelo, ya que es difícil para el flujo o perfil del viento penetrar hacia abajo en el nivel del suelo donde se ubican las fuentes de emisión móvil (He et al., 2017 & Lv et al., 2020).

Al realizar simulaciones CFD, He et al., (2017) reportaron una estructura de vórtice principal único en un cañón urbano a gran escala con $H / W = 2.7$ y $Re = 5 \times 10^6$ ($H = 27$ m), que era totalmente diferente de la estructura de dos vórtices principales en modelos a escala de túnel de viento. Aún se requieren más investigaciones para confirmar el patrón de flujo en cañones urbanos profundos de gran altura ($H/W > 2$) (Shen et al., 2020). Además, el aumento continuo de vehículos en las áreas urbanas insta a los planificadores urbanos a

construir más viaductos que eleven la carretera desde el nivel del suelo para mitigar la fuerte presión del tráfico (Li et al., 2016 & Santiago et al., 2019).

2.2 Efectos de las condiciones de movimiento

2.2.1 Efectos de flujo

Las características del viento o perfil de flujo de entrada afectan directamente el transporte y eliminación de contaminantes del cañón urbano (Hang et al., 2016). Diversos proyectos de investigación han explorado la correlación entre la velocidad del viento y la dispersión de contaminantes en cañones urbanos (Li et al., 2020 & Li et al., 2016). Los componentes del viento de entrada se pueden separar en tres componentes:

$$\mathbf{u} = U + \bar{u} + u' \quad (1)$$

Dónde U es el promedio de la velocidad del viento obtenido por las mediciones sobre espacio y tiempo; \bar{u} son las fluctuaciones espaciales (fluctuaciones de baja frecuencias) y u' es la fluctuación turbulenta (fluctuaciones de altas frecuencias), que son fluctuaciones aleatorias en el tiempo y el espacio. Por lo tanto, los estudios sobre las características del viento pueden clasificarse en tres grupos: estudios sobre la velocidad del viento de entrada, las entradas que varían en el tiempo y las que tienen una fluctuación turbulenta de las entradas (Li et al., 2020 & Zhou – Lin, 2019).

2.2.1.1 Velocidad del viento

El flujo promedio de la velocidad del viento y el nivel de turbulencia en los cañones están influenciados por la velocidad del viento de entrada (Ysabaert et al., 2021). Por lo general, una mala ventilación está directamente relacionada con una baja velocidad del viento (He et al., 2017 & Ding et al., 2019). Li et al., (2020) reportan el caso de un experimento de campo en un cañón urbano con $H/W \approx 1.5$ y encontraron que cuando el viento excede un valor umbral (casi 2 m/s), el cañón urbano genera un vórtice giratorio estable impulsado por la transferencia de momentum a la altura del techo. Sobre este valor crítico, la estructura del flujo permaneció igual, independientemente de la velocidad del viento de entrada, lo que también podría justificarse por la hipótesis de “*la independencia del número de Reynolds (Re)*”. Siempre que el Re exceda un valor crítico, la estructura de flujo alrededor de los edificios permanece invariable con un aumento en Re , como es posible observar en la Figura 2 (a) (Li et al., 2020).

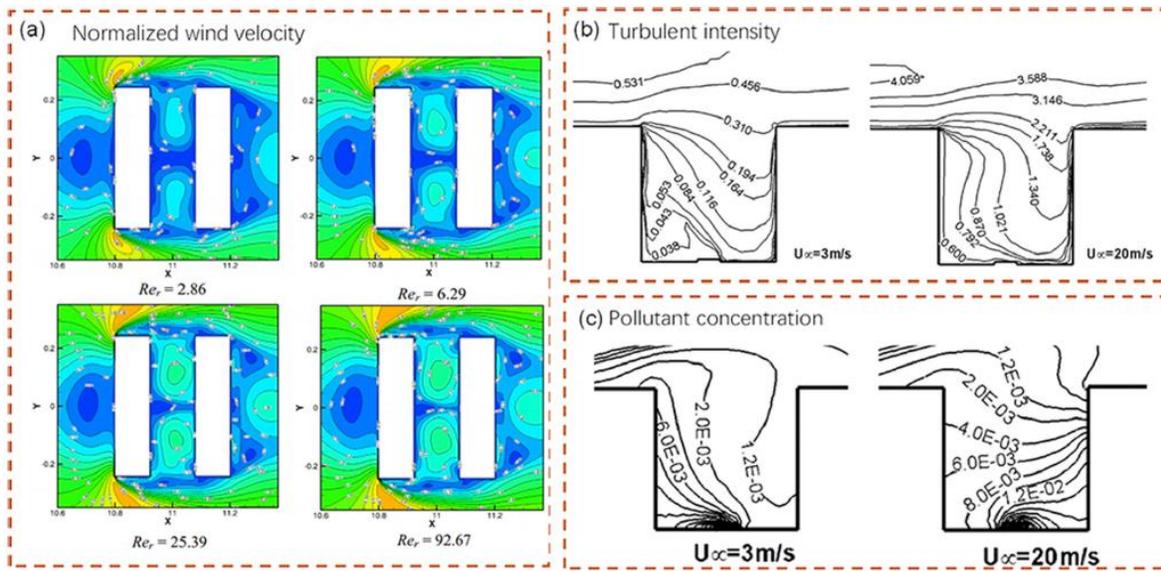


Figura 2. Cambios en los perfiles de velocidad del viento en relación al número de Reynolds - intensidad de la turbulencia - concentración de contaminantes. Tomado de Li et al., (2020).

De acuerdo a Baldauf et al., (2016), el Re crítico para un cañón urbano con $H/W=1$ es de aproximadamente 11,650. Además, se encontró que el Re crítico era entre 57,000 y 87,000 en un cañón urbano profundo ($H/W=2$). Li et al., (2020) reportaron que la intensidad de la turbulencia en un cañón urbano aumenta con un incremento en la velocidad del viento. Cuando la velocidad del viento de entrada aumenta de 3 a 20 m/s, la intensidad de la turbulencia aumenta en casi 16 veces cerca del nivel del suelo y 7 veces a la altura del techo (Figura 2 (b)). Esto se debe a que altas velocidades del viento, conducen a una mayor energía de fluctuación de la turbulencia.

Dado que el flujo medio y la turbulencia aumentan con la velocidad del viento, se espera que la calidad del aire mejore bajo estas condiciones (Baldauf et al., 2016). Li et al., (2016) confirman la dependencia de la concentración normalizada de contaminantes con la velocidad del viento al nivel de los peatones, dado que, la concentración normalizada disminuyó casi 65.5% cuando la velocidad del viento aumentó de 0.3 m/s a 3 m/s.

2.2.1.2 Variación temporal del viento

Diferentes estudios asumen condiciones de viento estacionarias y no se consideran los cambios en la velocidad y dirección del viento, sin embargo, esta es una aproximación a las condiciones cambiantes de ambas componentes del vector de viento. A diferencia de las condiciones de viento estacionario, su variabilidad en el tiempo puede impactar la estructura de flujo y el correspondiente transporte masivo (Lv et al., 2020). Zhi et al., (2020) observaron una corriente descendente en el período pico de ráfagas de viento y una ascendente en el período de valle. Bo et al., (2019) observaron que incorporar las perturbaciones periódicas

en el límite de flujo de entrada causaron una pequeña pero estadísticamente significativa respuesta, a las perturbaciones del flujo de entrada. Del mismo modo, Li et al., (2020) reportaron que variaciones de las condiciones de flujo de entrada causan características intermitentes en un cañón urbano, es decir, la expansión o compresión de la masa de aire en el cañón urbano. Así mismo, Hao et al., (2018) señalan que una disminución gradual de la velocidad del viento, destruye la capa de cizallamiento en los techos, mejorando significativamente la turbulencia vertical del flujo de transporte de contaminantes. He et al., (2017) informan que el flujo de entrada variable tuvo una concentración más baja de contaminantes que el flujo de entrada constante en el cañón urbano. He et al., (2017) concluyeron que la influencia de las entradas de flujo variables es importante y no deben ignorarse.

2.2.1.3 Fluctuaciones del flujo turbulento

Las fluctuaciones turbulentas del flujo de entrada se pueden interpretar como remolinos tridimensionales con diferentes escalas de longitud que interactúan constantemente entre sí (Brusca et al., 2016). La turbulencia de entrada afecta significativamente el campo de flujo en áreas urbanas (Li et al., 2020). Numerosos estudios utilizaron simulaciones CFD para generación de turbulencias de entrada con el fin de mejorar la predicción de la estructura de turbulencia alrededor de los edificios (Taleghani et al., 2020). Además, la fluctuación turbulenta es también un parámetro esencial que influye en la dispersión de contaminantes en las zonas urbanas (Wang & Wang, 2021). Li et al., (2020) reportan que parte de los flujos turbulentos eran remolinos que interactuaron con el flujo horizontal en el nivel de la azotea. En este sentido, Ding et al., (2019) reportan que la concentración de contaminantes alrededor de los edificios aumenta si no se incluyen las fluctuaciones de la turbulencia de entrada.

Por otro lado, Steffens et al., (2013) reportaron la relación entre la intensidad de la turbulencia de entrada en el flujo de aire y la dispersión de contaminantes alrededor de edificios para diferentes geometrías urbanas. Los resultados de este estudio sugieren que diferentes intensidades de turbulencia del flujo resultan en diferentes eficiencias de eliminación de contaminantes.

Por otro lado, la influencia de la intensidad de la turbulencia en la dispersión de contaminantes fue principalmente atribuida al cambio en la energía cinética turbulenta (TKE) en lugar de cambios en el campo de flujo. Por ejemplo, Zhou & Lin (2019), encuentran que un cambio significativo (50%) en la intensidad de la turbulencia produce menos de un 15% de cambio en la velocidad del viento. Sin embargo, un mayor nivel de turbulencia da como resultado un impulso más suave y una disminución en el pico de la velocidad del viento. La TKE en el cañón se vio notablemente mejorada por el aumento de turbulencia de entrada, que afecta directamente la eliminación de potenciales contaminantes. En este sentido, un aumento de diez veces en la turbulencia del flujo de entrada conduce a un aumento de tres veces en el TKE en los cañones urbanos, reduciendo la concentración de contaminantes gaseosos pasivos a nivel de peatones en aproximadamente un 50%.

2.2.2 Dirección del viento

La dirección del viento es otro parámetro crítico del flujo en los cañones y por lo tanto en la determinación de la concentración de contaminantes (Wang & Wang, 2021). El ángulo del viento incidente θ se define como el ángulo entre la dirección del viento y el eje de la calle. Por tanto, $\theta = 0^\circ$ denota la dirección del viento que es paralela a la dirección del eje de la calle, mientras que $\theta = 90^\circ$ representa la dirección perpendicular (Li et al., 2020). Los efectos de la dirección del viento en las características del flujo difieren para diferentes tipos de geometrías urbanas, especialmente para la longitud de la calle (Hao et al., 2019). La influencia de la dirección del viento debe ser discutida para cañones de calles largas ($L/H > 7$) y cañones de calles cortas ($L/H < 3$), según la clasificación de Vardoulakis (Li et al., 2020). Sofowote et al., (2021) encuentran que un pequeño cambio en la dirección del viento resulta en un sustancial cambio en las características de flujo de las áreas urbanas. Por ejemplo, un cambio de $\theta = 15^\circ$ en la dirección del viento conducía a un cambio máximo del 7% en la velocidad del viento promediada en el espacio a 20 m elevación.

Hassan et al., (2020 b), concluyeron que un cañón urbano largo genera un vórtice estable para el viento perpendicular, mientras que para un viento paralelo se observa una canalización del flujo. El viento oblicuo induce un vórtice en espiral a lo largo del cañón (una acción de “sacacorchos”). Buccolieri et al., (2019), obtuvieron mediciones de la dirección del viento en zonas residenciales en ciudades y los resultados mostraron que en general la relación entre la velocidad y dirección del viento dentro del cañón es casi lineal. Por lo tanto, se deduce que velocidades muy bajas del viento se producen durante condiciones de viento perpendiculares. Li et al., (2020), Wang & Wang (2021) – Hao et al., (2019) concuerdan en que vientos perpendiculares producen concentraciones máximas de contaminantes, mientras que vientos paralelos resultan en concentraciones mínimas.

Con respecto a los estudios sobre cañones urbanos cortos, Hao et al., (2019) describen los efectos de la dirección del viento entre $45^\circ < \theta < 90^\circ$ y la concentración de contaminantes gaseosos pasivos. Los autores encontraron una peor calidad del aire cuando $\theta = 45^\circ$, que es diferente de los casos de una calle larga (Figura 3). Cuando θ aumenta de 45° a 90° , el tiempo total de contaminantes residentes disminuye en aproximadamente 34.3%. Del mismo modo, Li et al., (2020) encuentra que una mejor eficiencia de ventilación se observó para $\theta = 90^\circ$ que para direcciones de viento oblicuas para un cañón urbano corto. La razón es que el viento oblicuo causa más resistencia al flujo.

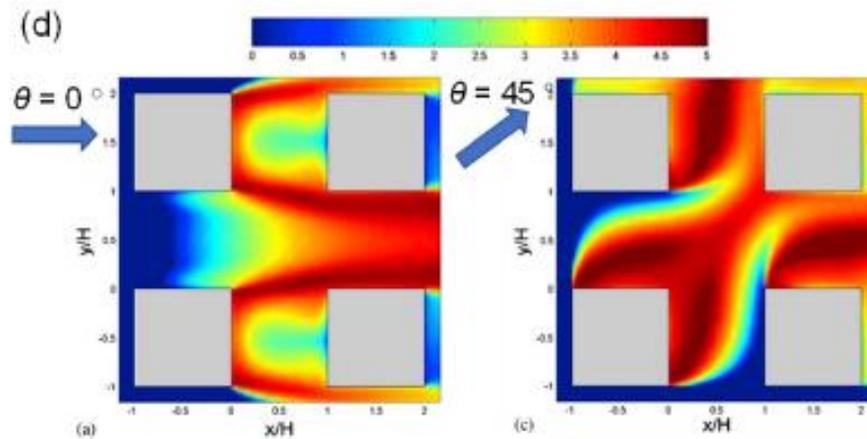


Figura 3. Relación entre la velocidad y dirección del viento y la concentración de contaminante para cañones urbanos cortos. Tomado de Hao et al., (2019).

2.3 Efectos térmicos

Cuando el viento es relativamente débil en un área urbana, los efectos térmicos tienen un impacto profundo en la estructura del flujo (Zhou & Lin, 2019). El flujo de aire en cañones podría ser impulsado completamente por un gradiente térmico cuando el flujo externo está en condiciones estables (Li et al., 2020). En consecuencia, el flujo térmico inducido debe considerarse como una fuerza impulsora fundamental para la dispersión de contaminantes en cañones urbanos (Hang et al., 2018). Recientemente, se han realizado estudios sobre los efectos térmicos (He et al., 2017). Las principales preocupaciones con respecto a los efectos térmicos se pueden clasificar a través de la estratificación térmica (neutra, inestable y estable) y la posición térmica relativa (diferentes configuraciones de calor en la superficie) (Li et al., 2020).

2.3.1 Estratificación térmica

La estratificación térmica tiene efectos no despreciables sobre la dispersión de los contaminantes en los cañones urbanos (He et al., 2017). Por lo general, la estratificación inestable ocurre durante el día cuando la radiación solar recibida por las fachadas de los edificios o el pavimento dan lugar a grandes diferencias de temperatura entre las superficies urbanas y el aire (superior a 10°C) (Li et al., 2020). La estratificación inestable también puede ocurrir en la noche debido al fenómeno de la isla de calor urbano (Brusca et al., 2016). El flujo nocturno permanece térmicamente estable. Una medida de la estabilidad se realiza mediante el número de Richardson (R_i) (o R_b) para caracterizar cuantitativamente la estratificación térmica, dada a través de la siguiente expresión (He et al., 2017 & Li et al., 2020):

$$R_i = g H \frac{T_H - T_0}{(T + 273)U_H^2} \quad (2)$$

Donde T es la temperatura media del aire (°C), T_H es la temperatura en la parte superior del cañón urbano (°C), y T_0 es la temperatura del suelo (°C). Un R_i negativo indica estratificación inestable (la superficie urbana se calienta y facilita la mezcla vertical), y un R_i positivo indica estratificación estable (la superficie se enfría y limita la mezcla vertical). En general, la estratificación térmica afecta la dispersión de contaminantes al alterar los flujos medios y los niveles de turbulencias (Eisenman et al., 2019).

Para perfiles medios de vientos, la circulación primaria (vórtice del cañón) se mejora en condiciones inestables, mientras que el flujo dentro del cañón tiende a ralentizarse significativamente en condiciones estables. Sofowote et al., (2021) llevó a cabo experimentos en túnel de viento para investigar efectos de diferentes estratificaciones térmicas ($0.21 < R_i < 0.79$) en cañones urbanos. Los resultados encontrados, muestran que la velocidad de flujo inverso durante la estratificación inestable en el fondo del cañón aumenta en casi un 60% en comparación con el caso neutral. Por el contrario, esta velocidad de flujo disminuye a cero para una estratificación estable. Además, Zhou & Lin (2019) observaron un fenómeno similar y Hao et al., (2019) observaron una región estancada cerca del suelo ($Z/H < 0.15 / 0.1$) bajo estratificación estable, lo que complicó la dispersión de las emisiones del tráfico hacia las capas superiores. Como afirman Hao et al., (2019), una región de estancamiento en el fondo del cañón resultó en la acumulación de aproximadamente la mitad de la cantidad de contaminantes en la parte inferior del cañón. Li et al., (2020) informó que una disminución de R_i de 0.35 a 0.11 redujo la retención de contaminantes gaseosos en casi un 90% a nivel peatonal. Además, Ding et al., (2019) informó sobre los efectos térmicos en diferentes cañones urbanos con relaciones de aspecto (H/W) de 1; 2 y 0.5 para la misma intensidad de calentamiento del suelo. Se observaron cambios significativos en los patrones de flujo en el cañón de la calle con H/W=2 y 0.5, mientras que en el cañón de la calle con la relación de aspecto de 1 no mostró ningún cambio en el campo de flujo (Figura 4). Solo el régimen de flujo del cañón con H/W=0.5 fue cambiado por calentamiento del suelo.

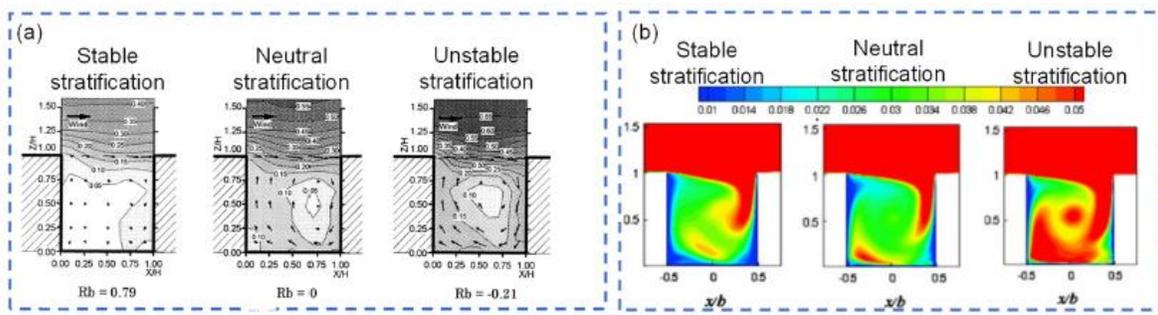


Figura 4. Diferentes estratificaciones térmicas para un aspecto H/W=1. Tomado de Li et al., (2020).

En el mismo sentido, Shen et al., (2020) encontraron que la estratificación inestable mejoró significativamente el nivel de turbulencia dentro de los cañones. La posible razón es que el transporte turbulento fue mayor debido a una recirculación primaria más fuerte cuando $R_i < 0$ en comparación a la condición neutra.

2.3.2 Posición termal

Durante el día, diferentes superficies urbanas son calentadas por radiación solar, esta radiación incidente se da en diferentes ángulos (Steffens et al., 2013). Esta radiación recibida por diferentes superficies calienta el aire cercano, aumentando la flotabilidad cerca de las superficies (Hagler et al., 2011). La posición térmica tiene un impacto profundo en el flujo de aire y la dispersión de contaminantes (He et al., 2017). Por lo general, Se adoptan cuatro escenarios de calentamiento para representar diferentes tiempos, es decir, calentamiento de superficie (mediodía), calentamiento de sotavento (mañana o tarde), calentamiento de barlovento (mañana o tarde) y calentamiento de pared (noche) (Li et al., 2020). Según lo descrito por Cai et al., (2016), diferentes flujos inducidos térmicamente y combinados con flujos inducidos mecánicamente afectan el campo de flujo y la distribución de contaminantes de dos formas diferentes:

- A. Ayudando a que la flotabilidad tenga efecto en la misma dirección que la recirculación primaria.
- B. Efecto opuesto, aumentando la flotabilidad en la dirección opuesta al flujo inducido.

Hang et al., (2016) realizaron un túnel de viento para estudiar las características del flujo en un cañón urbano largo con diferentes superficies calentadas. Los resultados mostraron que el calentamiento en todas las superficies apenas alteró la estructura del flujo; por lo tanto, solo existía recirculación primaria en el centro de los cañones. Sin embargo, la velocidad del viento en el cañón es mejor para el escenario de calentamiento del suelo, seguido por el escenario de sotavento. Por el contrario, para calentamiento barlovento un vórtice de contrarrotación secundaria apareció en el mismo lado. Así mismo, Reminger et al., (2020) & Hang et al., (2016), señalaron que los vórtices de las capas superiores fueron impulsados por un flujo inducido mecánicamente, mientras que los vórtices de las capas inferiores fueron inducidos térmicamente por la fuerza de flotación cuando la superficie de barlovento se calentó. En este escenario de calentamiento, la flotabilidad tenía la dirección opuesta, reduciendo la velocidad del viento de barlovento a casi cero. El tiempo de permanencia del contaminante en el cañón fue casi tres veces mayor que en los otros escenarios de calentamiento.

Ding et al., (2019) reportaron resultados diferentes. A baja velocidad del viento, aparece una corriente ascendente en todos los escenarios de calentamiento. Sin embargo, a alta velocidad del viento, un vórtice primario se formó solo cuando el suelo estaba caliente, y el flujo ascendente dominó los cañones en los otros escenarios de calentamiento. Una posible explicación es la diferencia en intensidades térmicas y geometrías de cañones (Li et al., 2020). Respecto a los niveles de turbulencia causados por diferentes posiciones térmicas,

Eisenman et al., (2019) encontraron que el calentamiento del suelo resultó en un mayor nivel de turbulencia en el cañón en comparación con el escenario de calentamiento de barlovento.

2.4 Efectos de la morfología urbana

Una revisión de la literatura indica que la variación espacial del flujo y de los contaminantes depende en gran medida de las características de la textura urbana (He et al., 2017). Una vez que se descargan las emisiones del tráfico a la atmósfera, la distribución de la contaminación del aire es considerablemente afectada por la morfología urbana (Hagler et al., 2011). Es fundamental analizar el efecto de las características morfológicas urbanas en la ventilación y correspondientemente en la dispersión de contaminantes (Hang et al., 2016). En la escala de vecindario, se identifican dos categorías de morfología urbana relevantes basadas en la clasificación descrita por Li et al., (2020): densidad urbana y características espaciales urbanas, incluida la heterogeneidad urbana y el grado de cerramiento.

2.5 Modelo CFD

Existe una gran variedad de modelos de dispersión de contaminantes (Yang et al., 2020). Parte de los modelos de dispersión son basados en un enfoque Gaussiano, que es válido solamente cuando la turbulencia presenta un comportamiento suave y uniforme, algo no común en los cañones urbanos (Pirjoral et al., 2021). Los modelos estadísticos y geoestadísticos son basados en funciones matemáticas y no consideran procesos físicos y químicos en la atmósfera (Gao, Y., 2008). Los modelos físicos en cambio, son desarrollados a diferentes escalas a partir de las ecuaciones de la dinámica de fluidos con alta precisión y costos económicos accesibles (Yang et al., 2020). Los modelos CFD pueden ser divididos de manera general en tres categorías: modelos de difusión Gaussiano, modelos numéricos y modelos mixtos o combinados.

Los modelos CFD tienen una alta precisión en la predicción del campo de flujo en cañones urbanos (Yang et al., 2020). Niu et al., (2018) utilizan un modelo CFD en 3D para determinar concentraciones de PM_{2.5} en un cañón urbano. Para esto seleccionan el modelo estándar κ - ϵ después de comparar con otros modelos a través del coeficiente de correlación de Pearson.

De acuerdo a Ming et al., (2021), los enfoques CFD para la modelación de dispersión de contaminantes incluyen principalmente la simulación de grandes remolinos (LES, por sus siglas en inglés) y el modelo de las ecuaciones promedio de Navier-Stokes (RANS, por sus siglas en inglés). Tanto los modelos RANS como los LES, son modelos que utilizan la viscosidad turbulenta para reemplazar el tensor de tensión de Reynolds. La diferencia se encuentra exclusivamente en el tamaño de la viscosidad de turbulencia proporcionada por el modelo de turbulencia subyacente, lo cual permite que los algoritmos de los modelos de

turbulencia pueden cambiar (Ladino Moreno et al., 2018), además LES requiere más tiempo computacional con respecto a RANS (Ming et al., 2021).

Uno de los modelos más utilizados en la modelación CFD corresponde al método RANS, este método se ha extendido para el estudio de la dispersión de campo cercano alrededor de los edificios. Lazzari et al., (2016) & Ming et al., (2021) comparan diferentes características del modelo de turbulencia RANS, y sugieren que el modelo RNG K- ϵ es uno de los modelos de turbulencia más óptimos. El modelo estándar K- ϵ asume que el flujo es totalmente turbulento y los efectos de la viscosidad molecular son despreciables, resuelve dos ecuaciones de transporte y el modelo de esfuerzos de Reynolds (Ladino Moreno et al., 2018).

En los cañones urbanos se considera que el aire es un fluido incompresible. Así, el flujo de fluidos viscosos incompresibles puede ser descrito a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes. Al asumir que las intensidades del viento entrante y de la fuente no cambian con el tiempo. La ecuación de continuidad correspondiente, la ecuación de momento (Ec.4), la ecuación de energía (Ec.5), las ecuaciones de Navier-Stokes (Ec.6-7), la ecuación de transporte másico (Ec.8) y la ecuación RNG K- ϵ (Ec.9-10) pueden ser descritas como (Ming et al., 2021):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum h_j \bar{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (5)$$

Siendo τ_{ij} expresado como:

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (6)$$

Donde, k_{eff} es la conductividad térmica efectiva y \bar{J}_j es el flujo de difusión. Los tres primeros términos del lado derecho de la Ec.5 representan la transferencia de energía debido a la conducción de calor, la difusión de componentes y la disipación viscosa, respectivamente. S_h incluye calor exotérmico (endotérmico) y cualquier otra fuente de calor volumétrica definida por el usuario.

La ecuación de transporte másico es la siguiente:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial C_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \partial / \partial x_j \left[\left(D + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial C_i}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

Las ecuaciones RNG K-ε pueden ser escritas como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m + S_k \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3g} G_b) \\ & - \left[\rho C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^3} \right] \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned} \quad (9)$$

Donde α_k y α_ϵ son los valores de k y ϵ del número de Prandtl efectivo inverso, μ_{eff} es la viscosidad turbulenta efectiva, $\eta = Sk/\epsilon$, S es el tensor de deformación, $C_{1\epsilon} = 1.42$, $C_{2\epsilon} = 1.68$, $C_\mu = 0.0845$, y generalmente $\beta = 0.012$ y $\eta_0 = 4.38$.

2.6 Exposición e inmisión en cañones urbanos

La fracción de inmisión (iF) se define como la fracción de la emisión total inhalada por una población (Lim et al., 2022 & Li et al., 2021). Este ha sido adoptado para evaluar la exposición de diferentes subgrupos de población a los contaminantes relacionados con el tráfico de forma realista en cañones urbanos a microescala (He et al., 2017). Además, la exposición a contaminantes diarios (E_i) representa el grado de contacto de los seres humanos con contaminantes del aire en un día (Wang & Wang, 2021; Hang et al., 2018 & He et al., 2017). Recientemente, muchos estudios se han centrado en la dispersión de contaminantes urbanos de material particulado y contaminantes reactivos como NO_x y O_3 (Zhou & Lin, 2019). Para la dispersión de partículas inertes, la fuerza de gravedad y los efectos de la sedimentación en relación con los diámetros de partículas, el viento dinámico y las fuerzas de flotabilidad térmica son factores importantes (Ysebaert et al., 2021). Para contaminantes reactivos, son determinantes los procesos de acoplamiento de mezcla turbulenta y efectos térmicos, las reacciones químicas y las proporciones contaminantes iniciales (Reiminger et al., 2021). Evidencias muestran que se produce una gran fracción de material particulado fino y ultrafino en los cañones urbanos por la oxidación química de precursores en fase gaseosa como NO_x y dióxido de azufre (SO_2) y la subsiguiente conversión de gas a partícula (He et al., 2017 & Li et al., 2020). Aún se requieren más investigaciones para mejorar las predicciones de CFD de procesos físicos y químicos urbanos complejos para partículas y contaminantes reactivos.

3. Metodología

3.1 Enfoque metodológico

El diseño metodológico busca cumplir con los objetivos específicos propuestos. Estos objetivos apuntan de manera general a analizar el efecto de la configuración urbana sobre la dispersión de material particulado PM_{2.5} en la escala de cañón urbano en un tramo de la Avenida Oriental en la ciudad de Medellín mediante un experimento de modelación usando una herramienta de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). El esquema metodológico se muestra en el diagrama de la Figura 5.

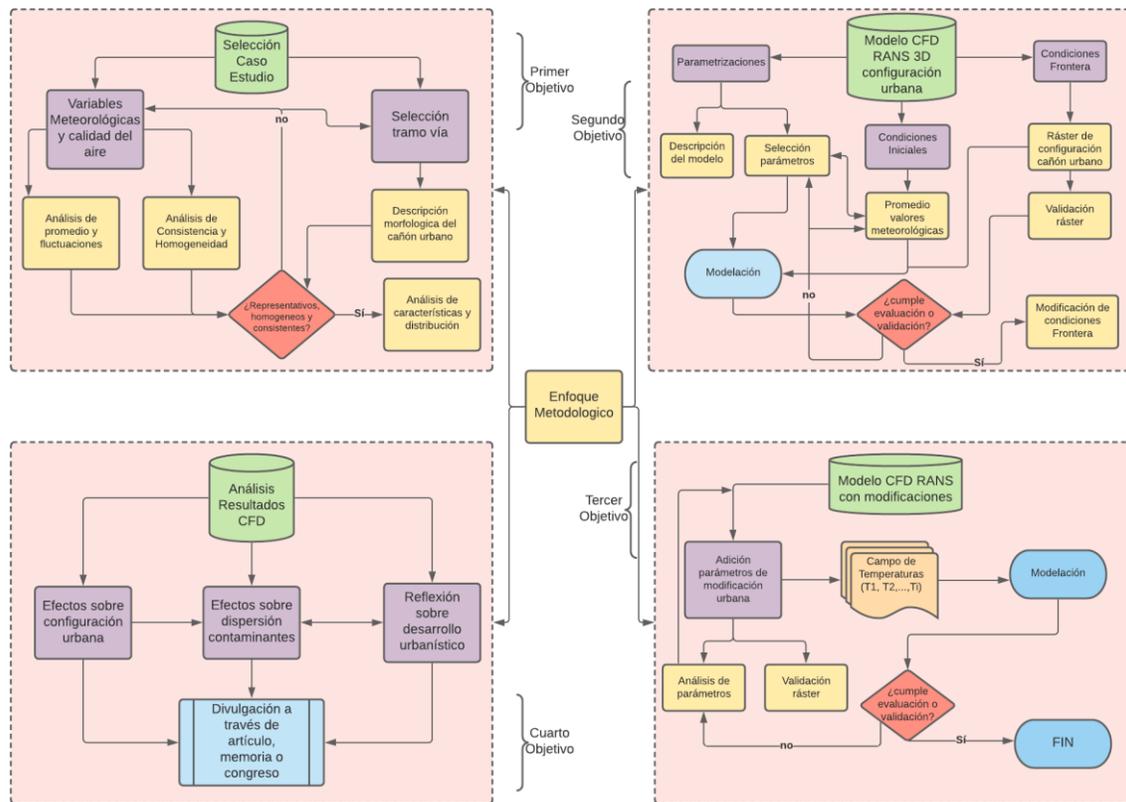


Figura 5. Esquema del enfoque metodológico.

3.2 Selección del caso de estudio

Para la selección de un tramo de cañón urbano en la ciudad de Medellín como caso de estudio, se adoptaron los siguientes cuatro aspectos (Cai et al., 2020; Zhi et al., 2020; Zhou et al., 2019 & Sin et al., 2022):

- A. Disponibilidad de información meteorológica a escala local o refinada.
- B. Configuración espacio – urbanística o morfología urbana definida.

- C. Influencia positiva del cañón frente a otros aspectos morfológicos o de relieve.
- D. Disponibilidad de datos para validación del modelo.

Para este caso de estudio, se consideran los tres primeros aspectos. El último aspecto, como lo mencionan, Sofowote et al., (2021) & Li et al., (2021) involucra a mediciones directas de calidad del aire en el cañón urbano o registros de datos en túneles de viento después de consolidar un proceso de modelación; información que no está disponible y que por lo tanto no es posible involucrar en esta investigación.

Para la selección del tramo de cañón urbano, se definió una matriz de resistencia que considerará los tres aspectos a través de una evaluación espacial siguiendo la metodología descrita en el diagrama de la Figura 6.

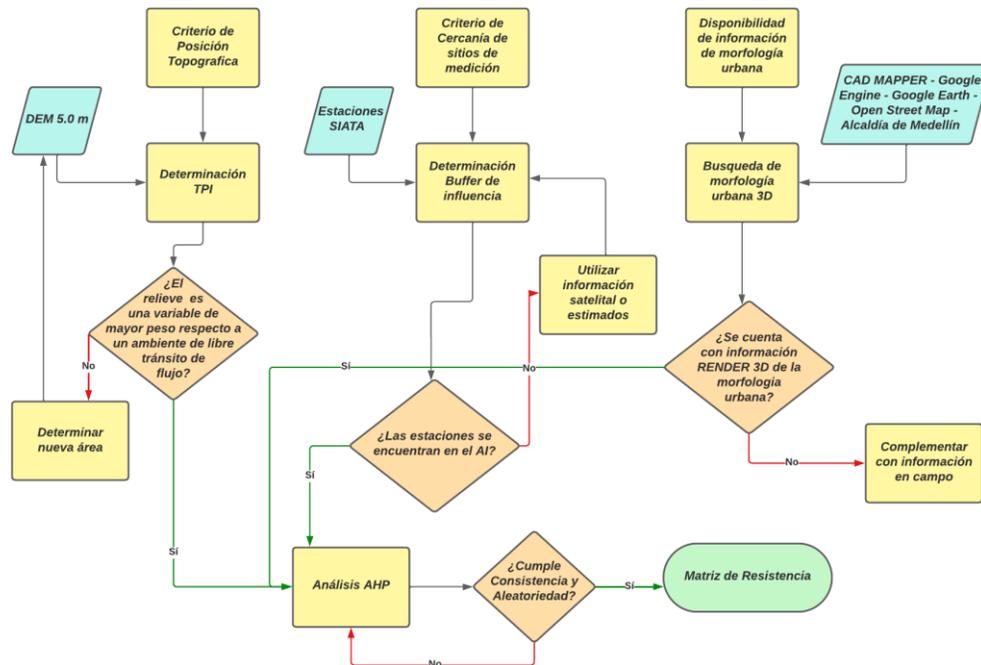


Figura 6. Descripción de la ruta metodológica para la selección del tramo de cañón urbano.

La matriz de resistencia se construye a partir de las variables condicionantes. En este estudio se consideran variables continuas, discretas y politómicas, que corresponden a los aspectos condicionantes. Los aspectos para el análisis se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de los factores y aspectos condicionantes para la matriz de resistencia.

Variable	Definición y Relevancia	Fuente de Información	Referencias
----------	-------------------------	-----------------------	-------------

<p>Índice de Posición Topográfica (TPI)</p>	<p>Aspectos morfológicos del terreno a través del cálculo y sectorización de las pendientes. El TPI es un método de clasificación de la posición de la pendiente y de tipos de geomorfología. Zonas con TPI muy altas y positivas refieren a áreas con pendientes o geomorfología pronunciada y elevada. Este índice se selecciona como marcador de relieve puesto que permite diferenciar las condiciones geomorfológicas en el terreno.</p>	<p>Landviewer-EOS – 5.0 m (https://eos.com/landviewer/?lat=37.751&lng=-97.822&z=11)</p>	<p>Duan et al., (2021)</p>
<p>Distancia de estaciones de Calidad del Aire</p>	<p>Ubicación de las estaciones de calidad del aire (SIATA) en Medellín. Cada estación presenta un radio de influencia, por lo que entre la distancia sea mayor la influencia o percepción de medición será menor.</p>	<p>Red de Calidad del Aire para el Valle de Aburrá - SIATA (https://siata.gov.co/siata_nuevo/)</p>	<p>Cai et al., (2020); Zhi et al., (2020); Zhou et al., (2019); Londoño Ciro et al., (2017) & Sin et al., (2022)</p>
<p>Morfología urbana detallada</p>	<p>Detalle de la morfología urbana, considerando en este caso ancho de vías y altura de edificaciones.</p>	<p>CAD Mapper (https://cadmapper.com/) – Alcaldía de Medellín Open Data (https://www.medellin.gov.co/es/transparencia/medata/)</p>	<p>Cai et al., (2020); Zhi et al., (2020); Zhou et al., (2019) & Sin et al., (2022)</p>

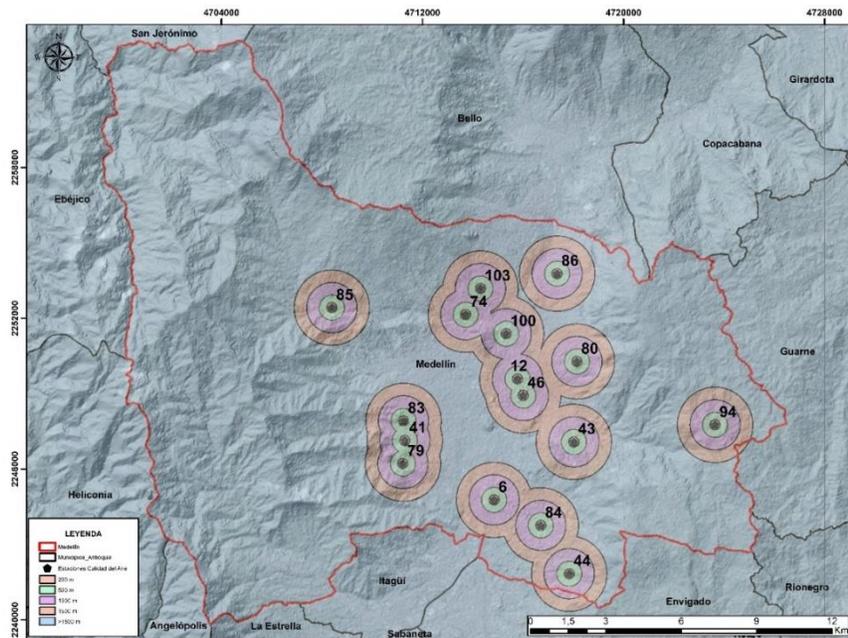
La calificación de las variables de la matriz de resistencia se encuentra en la Tabla 2. Valores menores en el aspecto de calificación indica zonas donde se cumple de manera parcial o total los criterios de selección, mientras que, valores mayores indican zonas donde no es posible garantizar los aspectos de selección para un cañón urbano.

Tabla 2. Clasificación de las variables condicionantes para la matriz de resistencia.

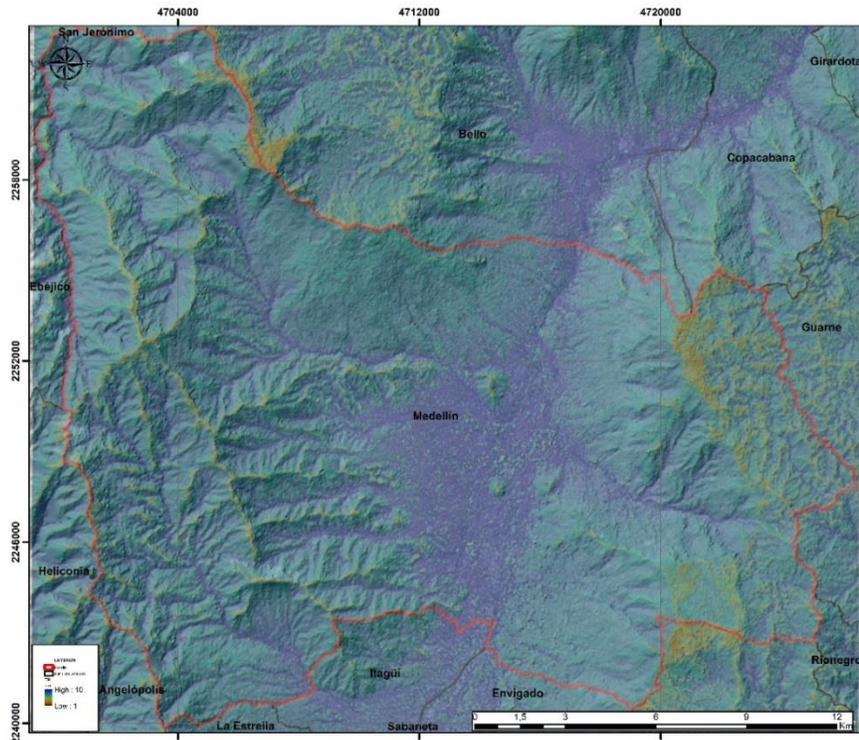
Variable	Clases	Clasificación	Escala de Trabajo
<p>Índice de Posición Topográfica (TPI) - Normalizado en factor de 10</p>	8-10	1	1:10,000
	6-8	2	
	4-6	3	

	2-4	4	
	0-2	5	
Estaciones de Calidad del Aire (m)	0- 200	1	1:10,000
	201 – 500	2	
	501-1,000	3	
	1,001 – 1,500	4	
	>1,500	5	
Morfología urbana detallada	Con detalle (3D)	1	1:10,000
	Sin detalle (2D)	5	

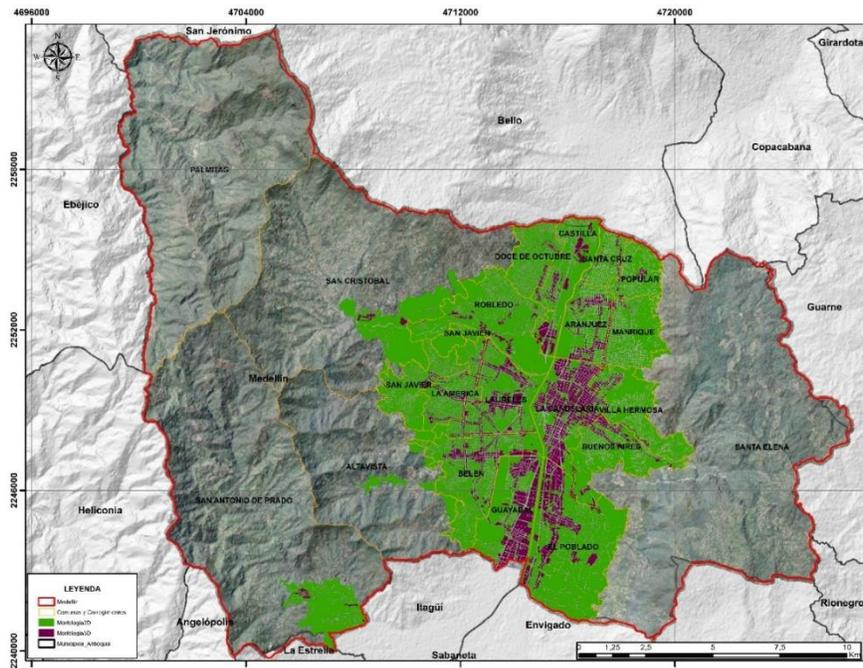
El alcance espacial para la creación de la matriz de resistencia se limita al área urbana del municipio de Medellín de acuerdo al POT del año 2014 (Alcaldía de Medellín, 2014). Cada una de las variables presenta un precedente espacial, el cual es geo-procesada. Para la variable TPI, se obtiene a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM por sus siglas en inglés) utilizando el software SAGA GIS 7.8.2 y reprocesada en ArcMap 10.8. Para las estaciones de calidad del aire se crea un multi-buffer de acuerdo a las clases de trabajo (Londoño Ciro et al., 2017) utilizando el software ArcMap 10.8 y para la variable morfología urbana; se delimitan las áreas que presentan detalle. Para las demás áreas se consideran con el valor de resistencia más alto, puesto que no presentan un render o descripción morfológica urbana en 3D. Los resultados del conjunto de variables espaciales procesadas se muestran en la Figura 7.



a) Multi-buffer estaciones de calidad del aire en la ciudad de Medellín. Tomado de la información del SIATA (2022).



b) TPI para la ciudad de Medellín.



c) Disponibilidad de información de morfología urbana en 3D. Adaptado de la información de CADMAPPER (2022), Google Engine (2022) & Google Earth (2022).

Figura 7. Procesamiento espacial de las variables para la construcción de la matriz de resistencia.

Cada una de las variables es analizada a través del método de análisis jerárquico ponderado (AHP, por sus siglas en inglés) y consolidada en un único ráster, siendo esta la matriz de resistencia espacial, como se muestra en la Figura 8.

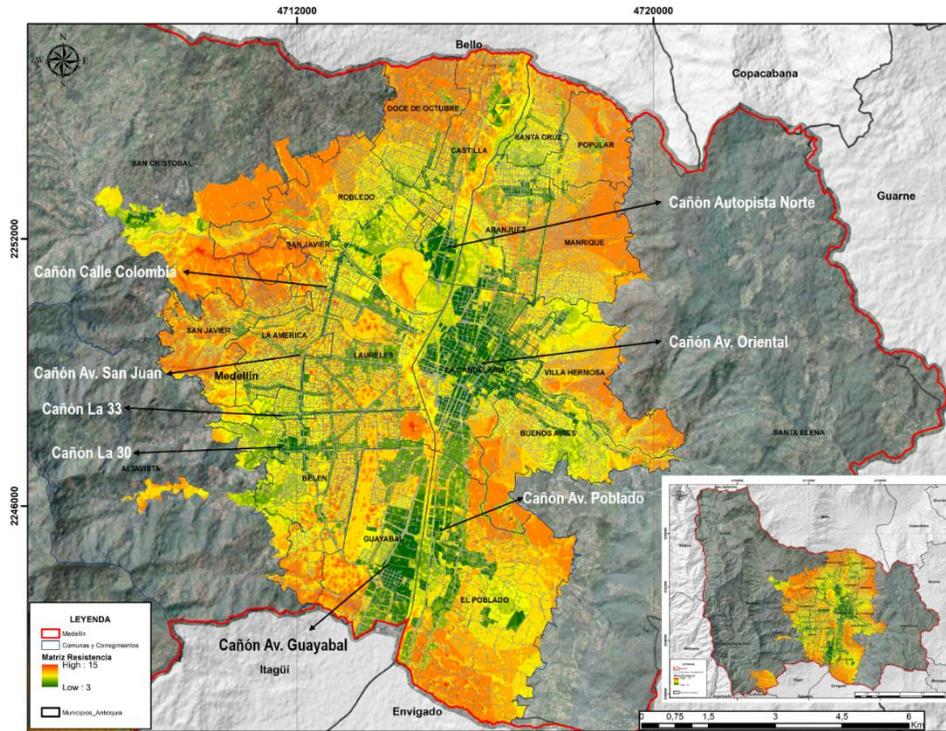


Figura 8. Matriz de resistencia espacial para selección del cañón urbano.

3.3 Variables meteorológicas y de calidad del aire

Con el fin de establecer las condiciones iniciales para el experimento de modelación se seleccionaron las estaciones meteorológicas y de calidad del aire con mayor proximidad al cañón urbano. La información usada proviene de la red de monitoreo de calidad del aire para el Valle de Aburrá, disponible en <https://siata.gov.co/>, para el año 2022. Se selecciona como parámetro de calidad de aire el PM_{2.5}, siendo este el contaminante criterio para el Valle de Aburrá (AMVA, 2018). La ubicación de las estaciones y de las variables de medición se encuentran descritas en la Tabla 3.

Tabla 3. Estaciones de monitoreo de calidad del aire y meteorológicas seleccionadas.

ID	Código	Nombre Estación	Variables de Medición	X (m)	Y (m)	Altitud (m.s.n.m.)	Rango Influencia (m)
1	12	Estación tráfico centro	[PM _{2.5}]	4,715,784.585	2,249,583.409	1,474	500 – 1,000
2	80	PTAP – Villa Hermosa		4,718,146.789	2,250,294.611	1,700	1,000 – 1,500
3	100	Fiscalía General de la Nación		4,715,305.688	2,251,413.801	1,463	>1,500
4	68	Jardín Botánico	Temperatura, velocidad y dirección del viento.	4,716,507.139	2,251,436.221	1,495	>1,500
5	478	Fiscalía General de la Nación		4,715,364.136	2,251,372.721	1,489	>1,500
6	203	UNAL – Sede agronomía		4,714,824.385	2,250,515.469	1,495	>1,500
7	419	SENA Medellín		4,715,221.261	2,249,928.093	1,496	>1,500
8	202	AMVA		4,715,284.761	2,248,451.715	1,496	>1,500
9	360	Miraflores		4,718,015.267	2,247,070.587	1,742	>1,500
10	367	Joaquín Vallejo		4,718,777.268	2,249,864.593	1,874	>1,500

Aunque en el cañón urbano de la Avenida Oriental no se cuenta con estaciones meteorológicas o de calidad del aire, existen algunas estaciones de monitoreo en la periferia que se usan como referencia en este estudio. La distancia promedio entre el cañón urbano y las estaciones de medición es superior a 1 Km, exceptuando la estación 12 que se encuentra en el rango de 500 – 1,000 m. Debido a la baja cobertura de estaciones de medición para establecer las condiciones iniciales para el ejercicio de modelación, se consideran las estaciones de mayor cercanía. Aunque las estaciones no cumplen con el criterio de proximidad descrito por Londoño Ciro et al., (2017), éstas se utilizan en este estudio debido a la carencia de información disponible para el cañón urbano seleccionado, con el fin de contar con información que pueda considerarse representativa para el centro de la ciudad de Medellín y que permita el proceso de interpolación espacial y la obtención de las condiciones iniciales promedio de las variables de interés para el ejercicio de modelación. En la Figura 9, se muestra la distribución de las estaciones meteorológicas y de calidad del aire con respecto a la ubicación del tramo del cañón urbano.

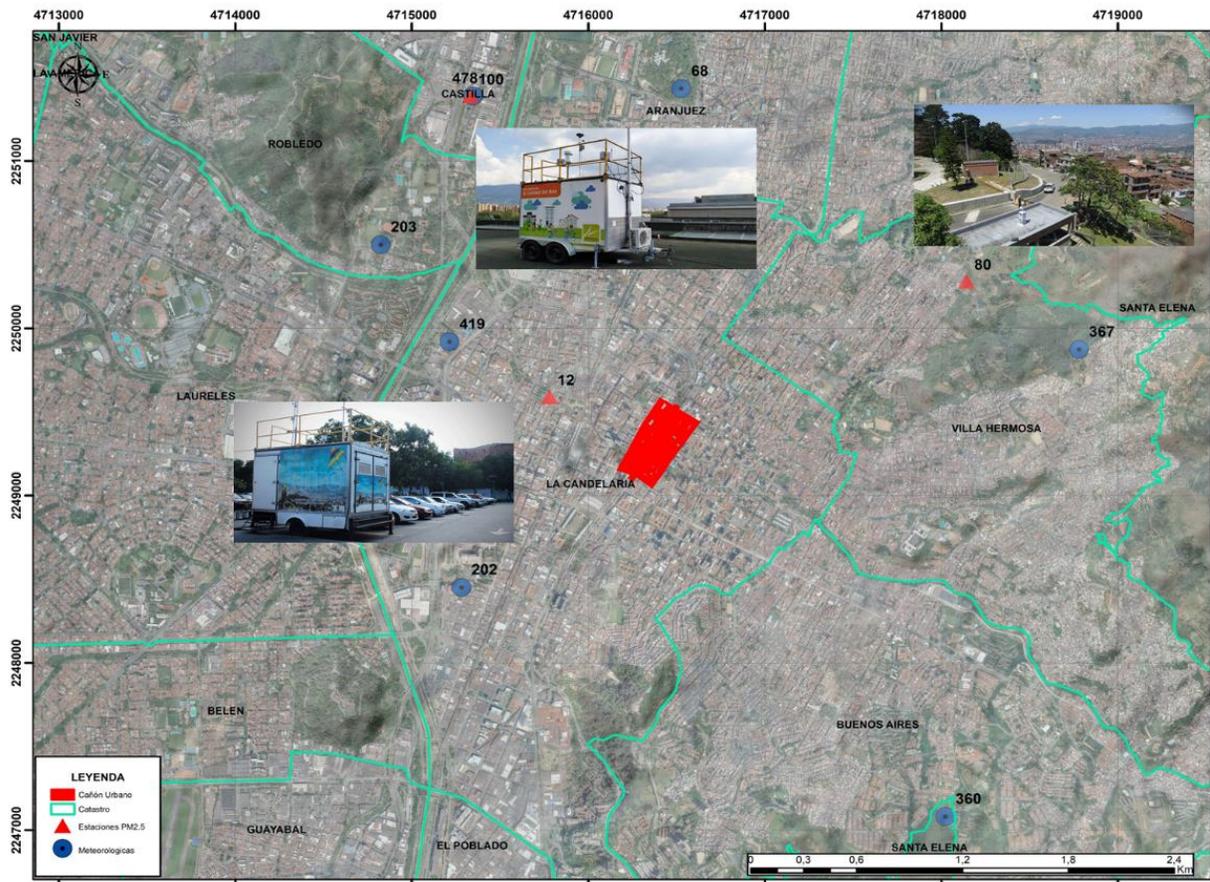


Figura 9. Ubicación del tramo de cañón urbano con respecto a las estaciones de monitoreo.

La información se encuentra en diferente resolución temporal por lo que se decide trabajar para una resolución horaria. Dentro del análisis se involucra solo la información que tenga como mínimo el 80% de los datos en el periodo de estudio.

La identificación de los datos anómalos en cada una de las variables se realiza mediante análisis estadístico de distribución, usando diagrama de cajas y bigotes. Este tipo de gráfico permite resumir la información descriptiva del conjunto de los datos y agruparlos alrededor de los momentos representativos respecto a la media, además de proporcionar una idea de la tendencia central del conjunto de datos, la dispersión y la presencia de “outliers”.

Además, se analizan los datos a través de estadísticos de homogeneidad. El análisis de homogeneidad de las series tiene por objeto detectar si presentan cambios o tendencias en la media y en la varianza. En caso de que se presenten, es preciso entrar a evaluar si estos cambios son producto de incremento de presión antrópica, consecuencia de fenómenos naturales o deficiencia en la captura o procesamiento de los datos y en algunas ocasiones ser removidos de la serie original, ya que pueden conducir a tener resultados poco confiables.

Para esto se propone el uso de la prueba de Pettit, que es un ensayo no paramétrico que no depende de la distribución de probabilidad de los datos, en donde una serie presenta saltos en los valores de la media cuando se observa un cambio, estos cambios pueden ser negativos o positivos. Cuando ocurre un cambio positivo, el nivel de la media de la variable en estudio se incrementa después del punto de cambio, si ocurre lo contrario se dice que el cambio es negativo. La hipótesis nula en esta prueba es H_0 : No existe cambio en la media. De igual manera, se realizan pruebas de tendencia en la media, que permiten establecer si se presentan cambios graduales o progresivos en la magnitud de la serie de datos. Para esto se considera la prueba de Mann - Kendall. La hipótesis nula en esta prueba es H_0 : No existe cambio en la media. En la Figura 10, se ilustra la ruta de preprocesamiento de datos.

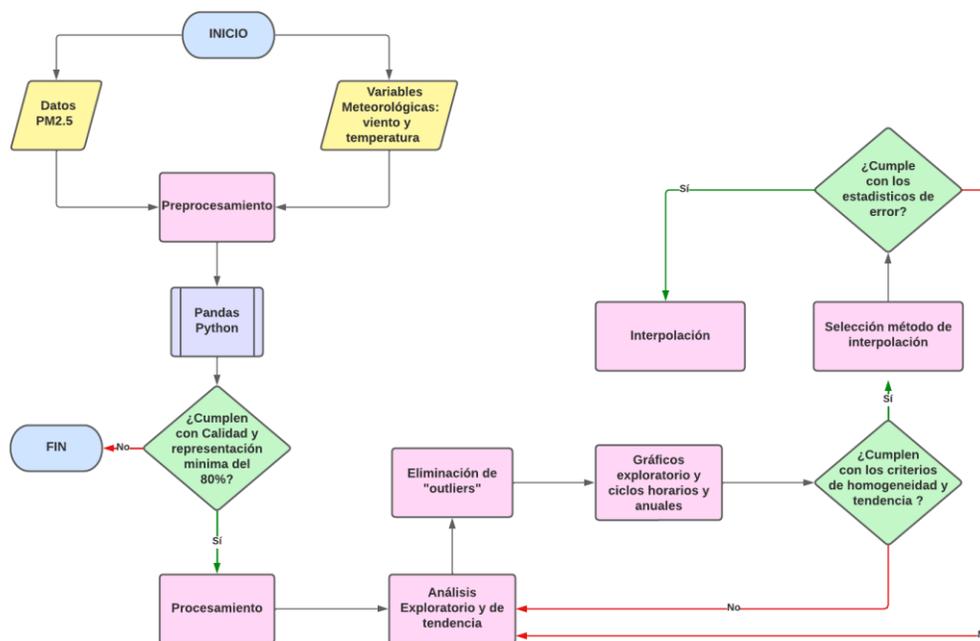


Figura 10. Ruta de procesamiento de los datos de las estaciones de monitoreo.

Procesadas las variables de calidad del aire y meteorológicas se determina el modelo de interpolación que presente los menores estadísticos de error, evaluando en este caso los criterios ASE, RMSE y RMSS¹ como estadísticas condicionantes para la selección del modelo (Londoño Ciro et al., 2017 & Maroufpoor et al., 2020).

3.4 Selección del modelo numérico

Se han realizado simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para un dominio tridimensional (3D) utilizando el software COMSOL Multiphysics, que ha sido

¹ ASE: Absolute Squared Error, Error Cuadrático Absoluto

RMSE: Root Mean Squared Error, Error Cuadrático Medio

RMSS: Root Mean Squared Successive Differences, Raíz Cuadrada de las Diferencias Sucesivas al Cuadrado

utilizado en diferentes aplicaciones de estudio en la mecánica y el transporte de contaminantes en diferentes fluidos (e.g. [Lazzari et al., 2016 & Ferrón Rísquez, J. 2022]). En este trabajo de investigación se utiliza el paquete Fluid Flow del software COMSOL Multiphysics V 5.5.

La concentración y distribución del PM_{2.5} en el cañón urbano para los diferentes escenarios son simuladas utilizando el modelo de turbulencia estándar k-ε (donde k representa la energía cinética turbulenta y ε es la tasa de disipación de la energía cinética). El modelo de turbulencia k-ε es uno de los modelos más ampliamente utilizados en la simulación de flujos turbulentos, incluyendo la dispersión de partículas en un cañón urbano (Cai et al., 2020 & Sofowote et al., 2021 & Sin et al., 2022). Este modelo se basa en la resolución de dos ecuaciones diferenciales parciales para las variables k y ε, que representan la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación de energía cinética, respectivamente (Hang et al., 2018 & Niu et al., 2017).

La ecuación de transporte para k está dada por:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k U) = \nabla \cdot (\mu_t \nabla k) + Pk - \varepsilon \quad (10)$$

donde:

- ρ es la densidad del fluido (Kg/m³),
- t es el tiempo (s),
- k es la energía cinética turbulenta (m²/s²),
- U es el vector de velocidad media del flujo (m/s),
- μ_t es la viscosidad turbulenta (m²/s),
- Pk es la tasa de producción de k (m²/s³),
- ε es la tasa de disipación de energía cinética (m²/s³).

La ecuación de transporte para ε es:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon U) = \nabla \cdot (\mu_t \nabla \varepsilon) + C_{\varepsilon 1} \left(\frac{\varepsilon}{k}\right) Pk - C_{\varepsilon 2} \rho \left(\frac{\varepsilon}{kl}\right)^2 \quad (11)$$

donde:

- ε es la tasa de disipación de energía cinética (m²/s³),
- C_{ε1} y C_{ε2} son constantes de modelado,
- l es una longitud característica del cañón (m).

La solución de estas ecuaciones proporciona información sobre el campo de velocidades y los perfiles de turbulencia en el cañón urbano (Li et al., 2021 & Niu et al., 2017). Utilizando

estos resultados, es posible calcular la concentración de PM_{2.5}, teniendo en cuenta las condiciones iniciales y las fuentes de emisión dentro del cañón.

3.5 Escenarios de Análisis Propuestos

En este proyecto se consideran diferentes escenarios de modelación, con el objetivo de analizar distribución y concentración de PM_{2.5} bajo diferentes escenarios en la zona de estudio:

- A. **Escenario 1: condiciones meteorológicas promedio y morfología urbana actual sin vía preferencial del Metroplús.** En este primer caso de estudio se analiza el cañón urbano bajo unos valores promedio de la velocidad y dirección predominante del viento, la temperatura superficial y la concentración media de PM_{2.5}. Estos valores promedio fueron obtenidos del análisis de la información proveniente de las estaciones meteorológicas y de calidad del aire y del proceso de interpolación. El escenario considera la morfología urbana actual, pero no se incluye la adecuación central de las estaciones y vía preferencia del Metroplús, la cual se implementó en la ciudad en el año 2021. Este caso, se considera el escenario de control. El objetivo es conocer el comportamiento en la distribución y concentración del material particulado antes de la instalación de barreras en el eje central vial del cañón urbano de la Avenida Oriental.
- B. **Escenario 2: condiciones meteorológicas promedio, morfología urbana actual sin vía preferencial del Metroplús y condiciones variables de calidad del aire.** En este caso, se cambia la concentración de material particulado, considerando dos concentraciones diferentes la primera correspondiente a la mitad del promedio y la segunda referente al máximo registrado por las estaciones de calidad del aire, manteniendo las condiciones meteorológicas en el modelo y la configuración urbana actual. Este escenario tiene por objetivo el análisis de la dispersión durante eventos extremos de contaminación.
- C. **Escenario 3: condiciones meteorológicas promedio y morfología urbana actual con vía preferencial del Metroplús.** Este escenario considera las mismas variables de análisis, pero implementando en la geometría del modelo el eje vial del paso del Metroplús y las barreras centrales del eje vial y tiene por objetivo evaluar el impacto de las barreras asociadas al Metroplús en la dispersión de contaminantes en el cañón urbano.
- D. **Escenario 4: condiciones meteorológicas desfavorable, calidad del aire promedio y morfología urbana actual con vía preferencial del Metroplús.** En este caso, se consideran las condiciones actuales del cañón urbano manteniendo la vía preferencial del Metroplús, pero se alteran las condiciones meteorológicas iniciales en el modelo, considerando como parámetros de entrada una dirección del viento con una rotación de 180°, una temperatura promedio constante, una velocidad del viento mínima de acuerdo a los registros de las estaciones meteorológicas y una concentración de PM_{2.5} promedio.

4. Resultados y Discusión

4.1 Selección del área de estudio

Los resultados del análisis AHP propuesto a través de la evaluación de la matriz Saaty, se describen en la Tabla 4. De acuerdo a la clasificación, el conjunto de variables condicionantes con mayor peso corresponde a la distancia de las estaciones de calidad del aire y morfología urbana, por último, la variable con menor peso es la TPI. La agrupación de las dos primeras variables tiene un determinante explicativo del fenómeno del 89%, por lo que entre las variables seleccionadas se concluye prioridad de clases.

Tabla 4. Resultados de pesos y consistencia para la categorización de la matriz de resistencia.

VARIABLES DE ANÁLISIS	Σ	PESOS (w_i)	EIGENVALOR
TPI	1.53	0.11	1.02
Estaciones de Calidad del Aire	7.00	0.52	1.14
Morfología urbana detallada	5.00	0.37	0.86
Σ	13.53	1.00	3.02
PRUEBA CONSISTENCIA		I.C.	0.009852
		I.A.	0.58
		R.C.	0.016986
		Prueba Hipótesis	VERDADERO

El resultado de la matriz de resistencia, permite identificar ocho (8) corredores o cañones urbanos potenciales para la investigación. Estos cañones se encuentran supeditados al valor promedio del pixel en el ráster, siendo estas áreas las que cuentan con un valor más bajo, respecto a las celdas vecinas promediadas.

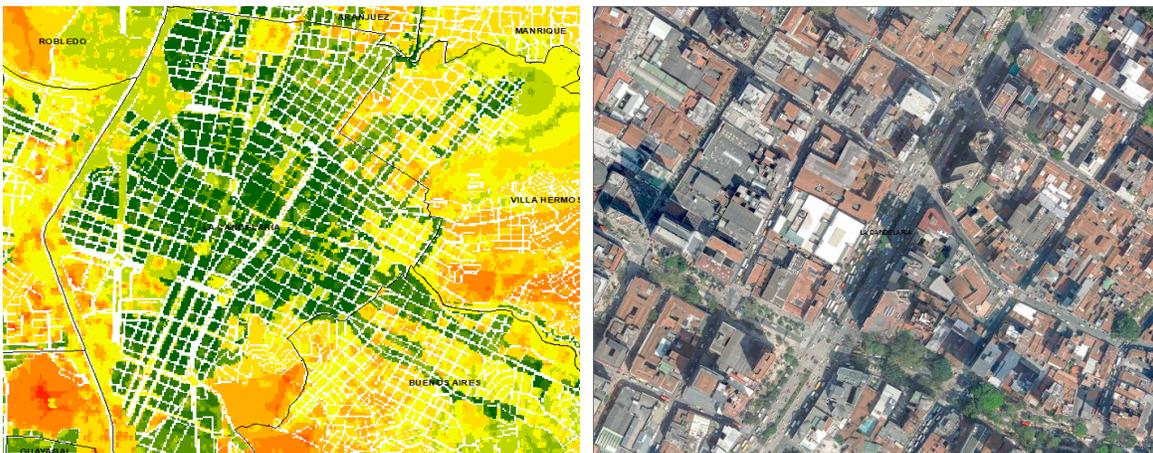


Figura 11. Selección del cañón urbano de la Avenida Oriental a través de la evaluación de la matriz de resistencia.

A partir de la selección de los cañones con menor resistencia, se determinan las características geométricas principales de acuerdo a la configuración espacial disponible como el ancho (W), el largo (L) y la altura (H) promedio de las edificaciones, hallando los aspectos o relación de descripción del cañón (Vardoulakis et al., 2003; Li et al., 2021 & Ming et al., 2021). Las características de la configuración urbana de los cañones se describen en la Tabla 5.

Tabla 5. Características de los potenciales cañones urbanos.

Nombre del Cañón	Ancho (W) promedio (m)	Largo (L) (m)	Valor promedio de resistencia por pixel (Adim.)	Altura (H) Promedio Edificaciones (m)	Relación H/W (Adim.)	Relación L/H (Adim.)	Observación
Avenida Oriental	45	1,600	3.37	70.6	1.57	22.66	Cañón profundo, irregular, asimétrico y corto.
Parque Juanes de la Paz – Autopista Norte	28	2,600	4.35	22.3	0.80	116.59	Cañón normal, largo, sin aberturas en las paredes del cañón y escalonado.
Avenida El Poblado	35	2,547	5.86	75.7	2.16	33.65	Cañón profundo, irregular, asimétricos y largo.
Avenida Guayabal	45	1,620	7.00	20.4	0.45	79.41	Cañón de tipo avenida, medio y escalonado.
Calle 30	28	2,254	5.67	17.7	0.63	127.34	Cañón de tipo avenida, largo y escalonado.
Avenida San Juan	30	2,621	9.46	27.1	0.90	96.72	Cañón normal, medio, sin aberturas en las paredes del cañón y asimétrico.
Avenida 33	30	2,660	10.71	23.3	0.78	114.16	Cañón de tipo avenida, largo, sin aberturas en las paredes del cañón y medianamente simétrico.
Calle Colombia	40	1,993	11.35	26.6	0.67	74.92	Cañón de tipo avenida, medio y escalonado con tendencia asimétrica.

De acuerdo con la matriz de resistencia, el cañón urbano con menor valor de resistencia promedio es la Avenida Oriental comprendido entre las calles 58 (Argentina) y Calle 41 (Avenida Los Huesos). A partir de este resultado y considerando además como parámetro de selección la densidad de edificios, se delimita el cañón urbano entre las calles 55 (Perú) y calle 50 (Avenida Colombia). La delimitación del área de estudio se encuentra comprendida por manzanas entre las carreras 47 (Sucre) y Carrera 45 (Avenida El Palo).

De acuerdo a la categorización obtenida en la matriz de resistencia (Tabla 5), se selecciona el cañón urbano de la Avenida Oriental en la ciudad de Medellín, siendo la zona con menor valor de resistencia promedio, de acuerdo a las condiciones de evaluación planteadas.

Este cañón presenta una longitud (L) de 1,600.0 m y un ancho (W) promedio de 45.0 m y es descrito de acuerdo a los aspectos de configuración arquitectónica como un cañón profundo, irregular, asimétrico y corto (Vardoulakis et al., 2003; Li et al., 2021 & Ming et al., 2021). Sin embargo, no se analizó la longitud total del cañón urbano, sino que se delimitó considerando como parámetro de selección la densidad de edificios, que es mayor entre la calle 55 (Perú) y calle 50 (Avenida Colombia). El área de estudio se encuentra entonces comprendida entre la carrera 47 (Sucre) y carrera 45 (Avenida El Palo). En la Tabla 6, se describen los vértices del área de estudio para el ejercicio de modelación de CFD. El cañón urbano se detalla en la Figura 12.

Tabla 6. Delimitación de vértices para la zona de estudio.

ID	X (m)	Y (m)	ID	X (m)	Y (m)
1	4,716,405.409	2,249,586.642	6	4,716,257.242	2,249,114.360
2	4,716,498.013	2,249,539.017	7	4,716,251.950	2,249,115.683
3	4,716,634.274	2,249,443.767	8	4,716,294.284	2,249,404.080
4	4,716,544.316	2,249,322.059	9	4,716,378.951	2,249,539.017
5	4,716,427.899	2,249,143.464	10	4,716,441.128	2,249,561.507

La Avenida Oriental es uno de los referentes para los habitantes de la ciudad de Medellín y de Antioquia, siendo diseñada y construida entre los años 1,970 y 1,979, reemplazando a la carrera La Unión; fue la primera vía de alta capacidad, con seis carriles y 3,800 metros de longitud, que nació como una alternativa para descongestionar a la ciudad (El Colombiano, 2019). Además, es una de las vías con mayores cambios en diseño y urbanismo en los últimos 40 años, producto de la dinámica poblacional y de transformación que ha caracterizado a la ciudad. Hasta finales del siglo XX, fue el epicentro de creatividad y construcción por parte de los urbanistas, diseñando diferentes formas que identifican las edificaciones del centro de Medellín.

Además, se caracteriza por tener diferentes aspectos y patrones arquitectónicos en los elementos que configuran su espacio urbano. Integrando desde espacios verdes y peatonales, viviendas, centros comerciales, centros financieros, centros religiosos, centros de salud, espacios lúdicos, equipamientos urbanos públicos, vías exclusivas para

transporte público y ejes viales, además de ser una de las avenidas con más afluencia peatonal en la ciudad (Alcaldía de Medellín, 2014).

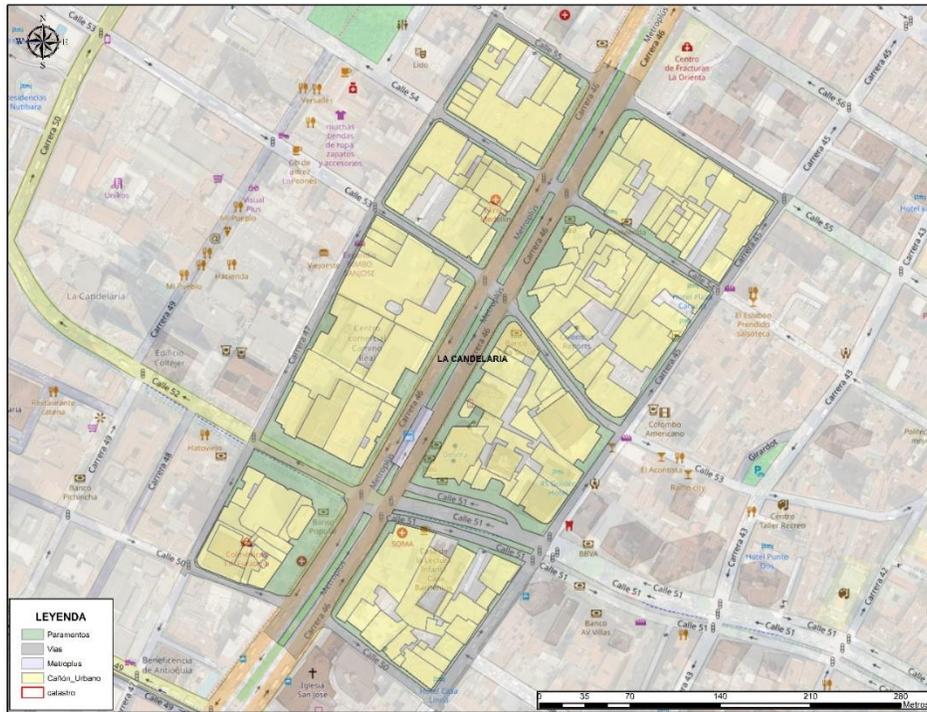


Figura 12. Selección del tramo de cañón urbano de la Avenida Oriental para el área de estudio.

El caso de estudio se encuentra limitado a una extensión de cuatro manzanas con respecto al eje vial de la Avenida Oriental (Figura 12). En la Tabla 7, se describen las principales edificaciones, paramentos y las vías² que componen los elementos urbanísticos en el cañón urbano de la Avenida Oriental.

Tabla 7. Características representativas de las edificaciones y las vías ubicadas en el cañón urbano de la Avenida Oriental.

Descripción de las edificaciones			
ID	Nombre de la edificación	Altura (m)	Uso o zonificación habitacional
1	Centro comercial y de servicios La Oriental	20.0	Comercial
2	Instituto Neurológico de Colombia	20.0	Salud
3	Botica Junín	10.0	Comercial
4	Torre Fundadores – Clínica Medellín	65.0	Salud
5	Torre 46	80.0	Comercial
6	Clínica central Fundadores	25.0	Salud

² El ancho de las vías son medidas desde el paramento, incluyendo andenes y jardineras, siendo el resultado promedio considerando diferentes secciones transversales.

7	Centro Comercial El Paso	32.0	Comercial
8	Centro Comercial Camino Real	30.0	Comercial
9	Óptica Contemporánea	7.0	Comercial
10	Centro Comercial Paseo de La Playa	30.0	Comercial
11	Estación La Playa Metroplús	6.0	Transporte
12	Edificio Interbolsa	85.0	Comercial y Financiero
13	Colmédicos S.A.S. – Hotel Mi Colombia	50.0	Comercial, Salud y Habitacional
14	Edificio Portón II	65.0	Habitacional
15	Edificio Comedal	95.0	Comercial y Salud
16	Edificio Colseguros	105.0	Comercial
17	TIGO	30.0	Comercial
18	Cámara de Comercio	120.0	Comercial
19	Edificio Vicente Rendón	70.0	Comercial
20	Clínica Soma	35.0	Salud

Descripción de las vías y paramentos

ID	Nombre de la vía	Ancho (m)	Uso principal
1	Avenida Oriental a la altura Calle 52 – Calle 55	45.0	Tráfico vehicular
2	Avenida Oriental a la altura Calle 52 – Calle 50	60.0	Tráfico vehicular
3	Calle 55 (Perú)	8.0	Tráfico vehicular
4	Calle 54 (Avenida De Greiff)	11.0	Tráfico vehicular
5	Calle 53 (Avenida Maracaibo)	11.0	Tráfico vehicular
6	Calle 52 (Avenida La Playa – 1 de mayo)	40.0	Tráfico vehicular – Prevalencia peatonal
7	Calle 50 (Avenida Colombia)	10.0	Tráfico vehicular

Como se describe en la Tabla 7, el cañón presenta una configuración asimétrica, tanto en el ancho (W) como en la altura (H), diferente a otros cañones desarrollados en otras ciudades en el mundo, que presentan características de simetría constructiva y arquitectónica. Las principales actividades que se desarrollan en el cañón urbano corresponden a dinámicas comerciales y de prestación de servicios, estando asociadas a un alto flujo peatonal y vehicular, siendo el parque automotor la fuente predominante de emisión de gases y material particulado que afectan la calidad del aire a escala vecindario. En la Figura 13, se observa la configuración arquitectónica y espacial del cañón urbano de la Avenida Oriental en la zona de estudio.



Figura 13. Detalle del cañón urbano de la Avenida Oriental.

Por otro lado, la Avenida Oriental se encuentra integrada por diferentes elementos, que crean una alta y variable rugosidad, que como se dijo antes crea modificaciones de las características de flujo, produciendo efectos de dispersión, turbulencia, cizallamiento y dispersión, afectando la distribución y concentración de contaminantes a nivel de superficie (Hang et al., 2018; Hassan et al., 2020 a & Ming et al., 2021). En la Figura 14, se muestran algunos elementos que componen la configuración urbana del cañón urbano, encontrando estaciones intermedias de transporte público, arbolado urbano, jardines, vehículos, peatones y establecimientos comerciales en espacio público.



Figura 14. Elementos que componen la configuración urbana del cañón urbano de la Avenida Oriental en la ciudad de Medellín.

4.2 Análisis de las condiciones locales meteorológicas y de calidad del aire

4.2.1 Análisis estadístico y exploratorio de los datos

Las series de tiempo de velocidad del viento, temperatura y concentración de PM_{2.5} fueron objeto de análisis de consistencia, homogeneidad y de identificación de valores anómalos, con el fin de establecer la calidad y confiabilidad de los registros. Para esto se tiene, en cuenta que la velocidad y dirección del viento son las principales variables que en conjunto con la temperatura caracterizan la estabilidad atmosférica y que son la base para el análisis sobre la dispersión de los contaminantes.

Dentro de la verificación de la calidad de la información, en primera instancia se revisa el porcentaje de información disponible, descartando aquellas series de tiempo de estaciones que no cumplen con la condición de tener como mínimo el 80% de los datos, tal como lo establece la Guía de Prácticas Climatológicas de la Organización Meteorológica Mundial. En la Tabla 8 se presenta el estado de la información de velocidad del viento, concentración de PM_{2.5} y temperatura a escala horaria utilizada en el presente trabajo de investigación, incluyendo el porcentaje de datos faltantes.

Tabla 8. Estado de la información de las estaciones meteorológicas y de calidad del aire usadas en el estudio.

COD	Nombre	Variable	Unidad	Resolución	Período	Datos Faltantes (%)	Datos disponibles
100	Medellín - Fiscalía General de la Nación	Concentración PM _{2.5}	µg/m ³	horaria	01/2022 - 12/2022	5.45	8,283
80	Medellín, Villahermosa - PTAP EPM	Concentración PM _{2.5}	µg/m ³			7.56	8,098
12	Estación Tráfico Centro	Concentración PM _{2.5}	µg/m ³			6.54	8,187
68	Jardín Botánico	Velocidad y Dirección del viento	m/s y °	10.23		471,866	
		Temperatura	°C	3.39		507,775	
478	Medellín - Fiscalía General de la Nación	Velocidad y Dirección del viento	m/s y °	7.92		484,004	
		Temperatura	°C	8.39		481,521	
203	UNAL – Sede Agronomía	Velocidad y Dirección del viento	m/s y °	11.70		464,125	
		Temperatura	°C	9.19		477,304	
419	SENA Medellín	Velocidad y Dirección del viento	m/s y °	10.49		470,462	
		Temperatura	°C	4.55	501,711		
202	AMVA	Velocidad y Dirección del viento	m/s y °	10.06	472,725		
		Temperatura	°C	9.97	473,184		
360	Miraflores	Velocidad y Dirección del viento	m/s y °	8.78	479,491		
		Temperatura	°C	7.81	484,569		
367	Joaquín Vallejo	Velocidad y Dirección del viento	m/s y °	4.28	503,138		
		Temperatura	°C	3.28	508,361		

En este caso se cumple el criterio de faltantes inferior al 20% para las variables meteorológicas y de calidad del aire para el año 2022.

El análisis de homogeneidad de las series de tiempo para cada una de las variables tiene por objeto detectar si las mismas presentan cambios o tendencias en la media y en la

varianza. En caso de que se presenten, es preciso entrar a evaluar si estos cambios son producto de incremento de presión antrópica, consecuencia de fenómenos naturales o deficiencia en la captura o procesamiento de los datos y en algunas ocasiones ser removidos de la serie original, ya que pueden conducir a tener resultados poco confiables. A pesar de que el periodo de análisis es sólo un año, y de que estos cambios típicamente evidentes en escalas de tiempo mayores, se realiza la verificación de homogeneidad para vislumbrar posibles cambios en la escala intra-anual y tener confiabilidad en los datos analizados.

Cada una de las variables meteorológicas y de calidad del aire fueron objeto de análisis de pruebas de cambio en la media utilizando la Prueba de Pettit, que es un ensayo no paramétrico que no depende de la distribución de probabilidad de los datos.

De igual manera, se realizaron pruebas de tendencia en la media, que permiten establecer si se presentan cambios graduales o progresivos en la magnitud de la serie de datos. Para esto, se utilizó la prueba de Mann – Kendall, la cual es una prueba no paramétrica que no depende de la distribución de probabilidad de los datos.

En la Tabla 9, se describen los resultados para las pruebas de homogeneidad. Donde A es que se acepta la hipótesis propuesta, que para la prueba de Pettit H_0 : los datos son homogéneos y H_a : hay una fecha en la que hay un cambio en los datos y para la prueba de Mann-Kendall H_0 : no existe una tendencia en la serie y H_a : existe una tendencia en la serie. Una vez analizados los resultados de las pruebas mencionadas se descartaron los datos que presentarían cambios críticos en la media, esto con la finalidad de no realizar transformación de las variables.

Tabla 9. Resultados de prueba de Homogeneidad y tendencia para las estaciones meteorológicas y de calidad del aire.

COD	Nombre	Variable	Prueba Homogeneidad de Pettitt		Prueba de Tendencia de Mann-Kendall		Datos eliminados
			H_0	H_a	H_0	H_a	
100	Medellín - Fiscalía General de la Nación	[PM _{2.5}]	A	---	---	A	5
80	Medellín, Villahermosa - PTAP EPM	[PM _{2.5}]	A	---	---	A	13
12	Estación Tráfico Centro	[PM _{2.5}]	A	---	---	A	2
68	Jardín Botánico	Velocidad y Dirección del viento	A	---	---	A	14
		Temperatura	A	---	---	A	3
478	Medellín - Fiscalía General de la Nación	Velocidad y Dirección del viento	---	A	A	---	32
		Temperatura	A	---	---	A	17

203	UNAL – Sede Agronomía	Velocidad y Dirección del viento	A	---	---	A	3
		Temperatura	A	---	---	A	1
419	SENA Medellín	Velocidad y Dirección del viento	A	---	---	A	6
		Temperatura	A	---	---	A	0
202	AMVA	Velocidad y Dirección del viento	---	A	A	---	22
		Temperatura	A	---	---	A	0
360	Miraflores	Velocidad y Dirección del viento	A	---	---	A	21
		Temperatura	A	---	---	A	6
367	Joaquín Vallejo	Velocidad y Dirección del viento	A	---	---	A	10
		Temperatura	A	---	---	A	19

Los resultados de las pruebas de homogeneidad y tendencia para cada una de las variables, muestran un comportamiento asociativo especialmente para la temperatura y la concentración de PM_{2.5}. Este comportamiento es característico en este conjunto de variables debido al fenómeno físico, encontrando que las series de tiempo para cada una de las variables presenta un comportamiento homogéneo y no existen cambios significativos respecto a la media. Por otro lado, se observa una tendencia de los datos en la serie de tiempo. Para el caso de la velocidad y dirección del viento, se encuentra que en algunas estaciones no se cumple la hipótesis de homogeneidad respecto a la media, al igual que la prueba de tendencia a la media. Al considerar la eliminación de los datos que causan ruido frente a la tendencia y homogeneidad, se cumplen las hipótesis respectivas para algunas estaciones. Esta eliminación de los datos no obedece a un criterio de “outliers”, como el que se expondrá a continuación, por lo que pueden ser datos reales bajo condiciones o escenarios desfavorables, sin embargo, con el fin de mantener condiciones de tendencia para evitar la transformación de los grupos de datos, se procede con esta depuración de datos.

En la Figura 15 se presentan las gráficas resultantes del análisis de homogeneidad y tendencia para las estaciones tráfico centro (12), Villa Hermosa PTAP (80) y Fiscalía General (100), observándose que no se presentan cambios en la media. Para las tres estaciones de referencia la prueba de Pettit indica que la hipótesis nula se acepta para un nivel de significancia del 95%, por lo tanto, los datos son homogéneos. De igual forma, la prueba estacional de Mann Kendall de tendencia en las estaciones estima que para un nivel de significancia del 95% se debe rechazar la hipótesis nula H₀, por lo que existe tendencia en la media.

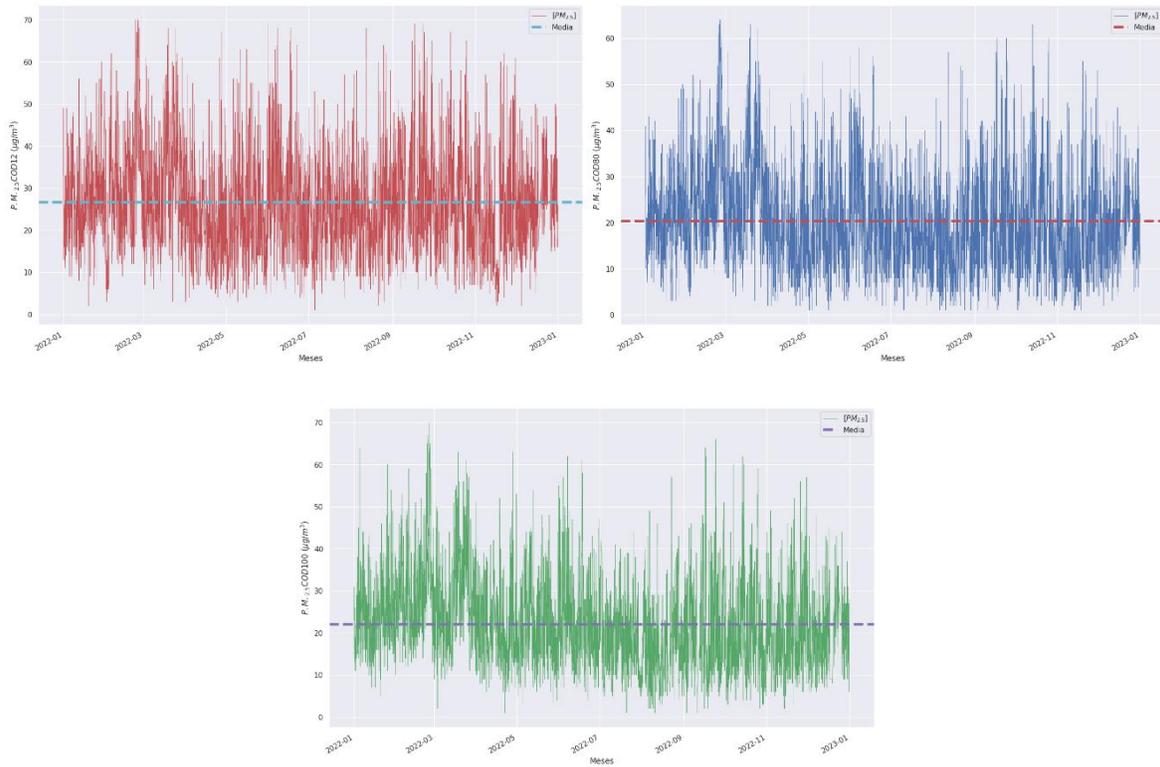
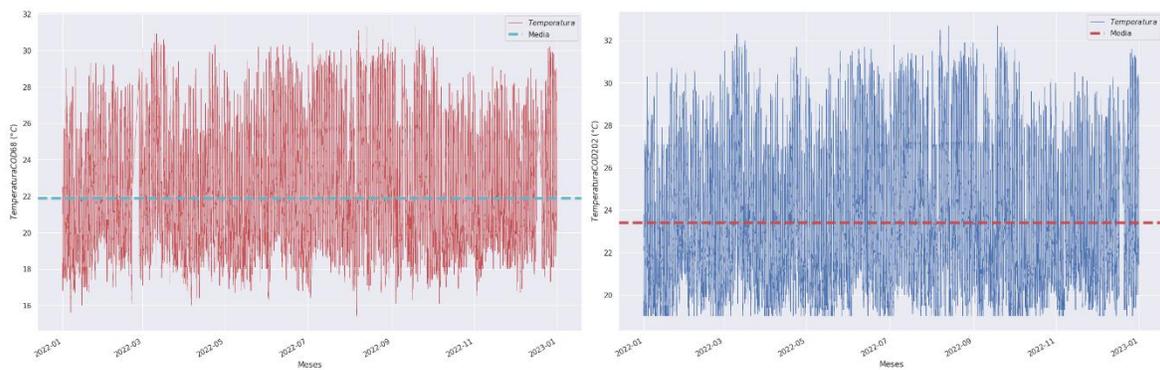


Figura 15. Análisis de homogeneidad para valores horarios de las estaciones de calidad de aire para el parámetro de evaluación P.M._{2.5}. De Izquierda a Derecha: COD12, COD80 y COD100.

De manera similar se analizan las pruebas de homogeneidad y tendencia para las variables temperatura y velocidad del viento, como se muestran en las Figura 16 y Figura 17.



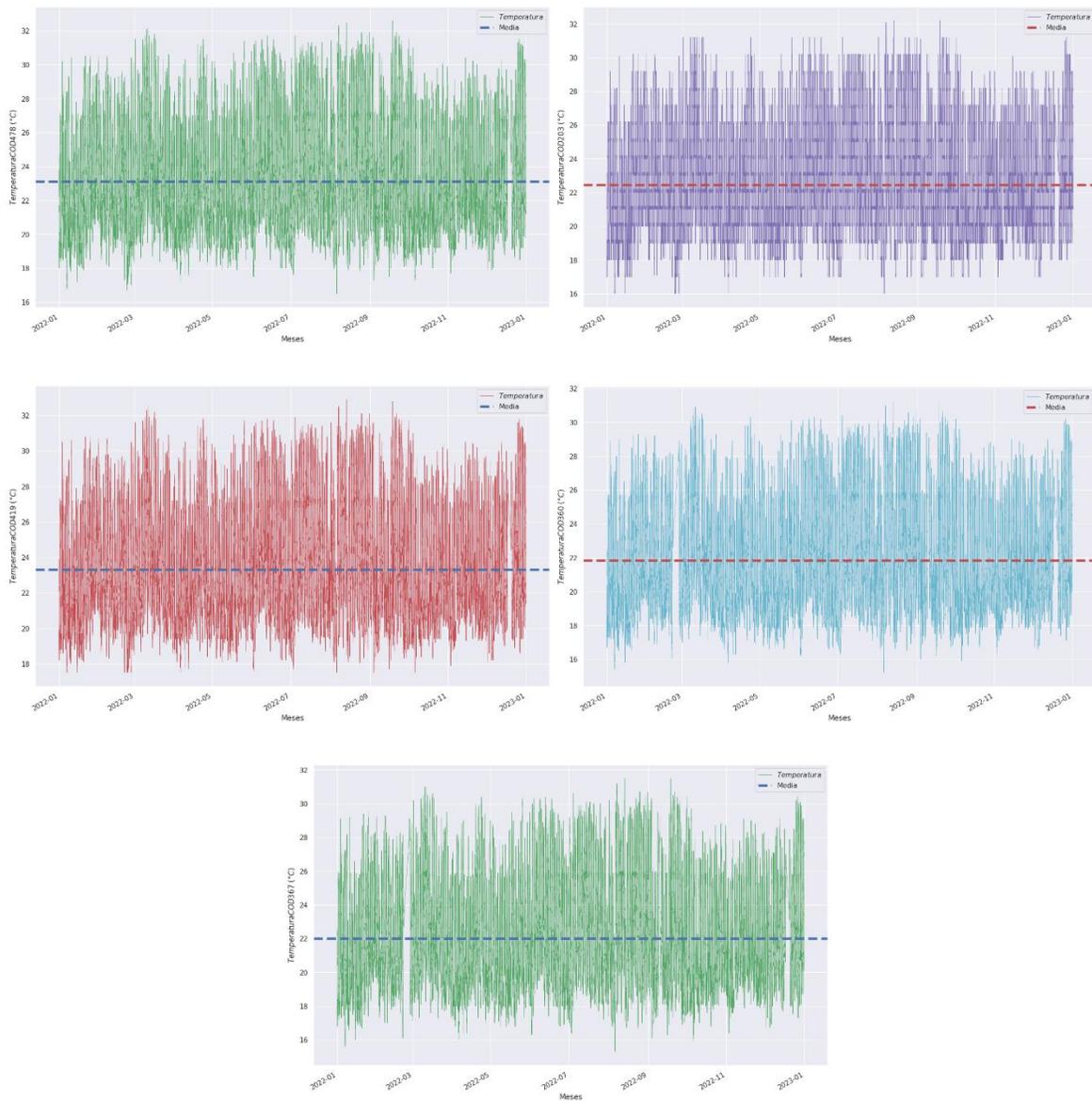
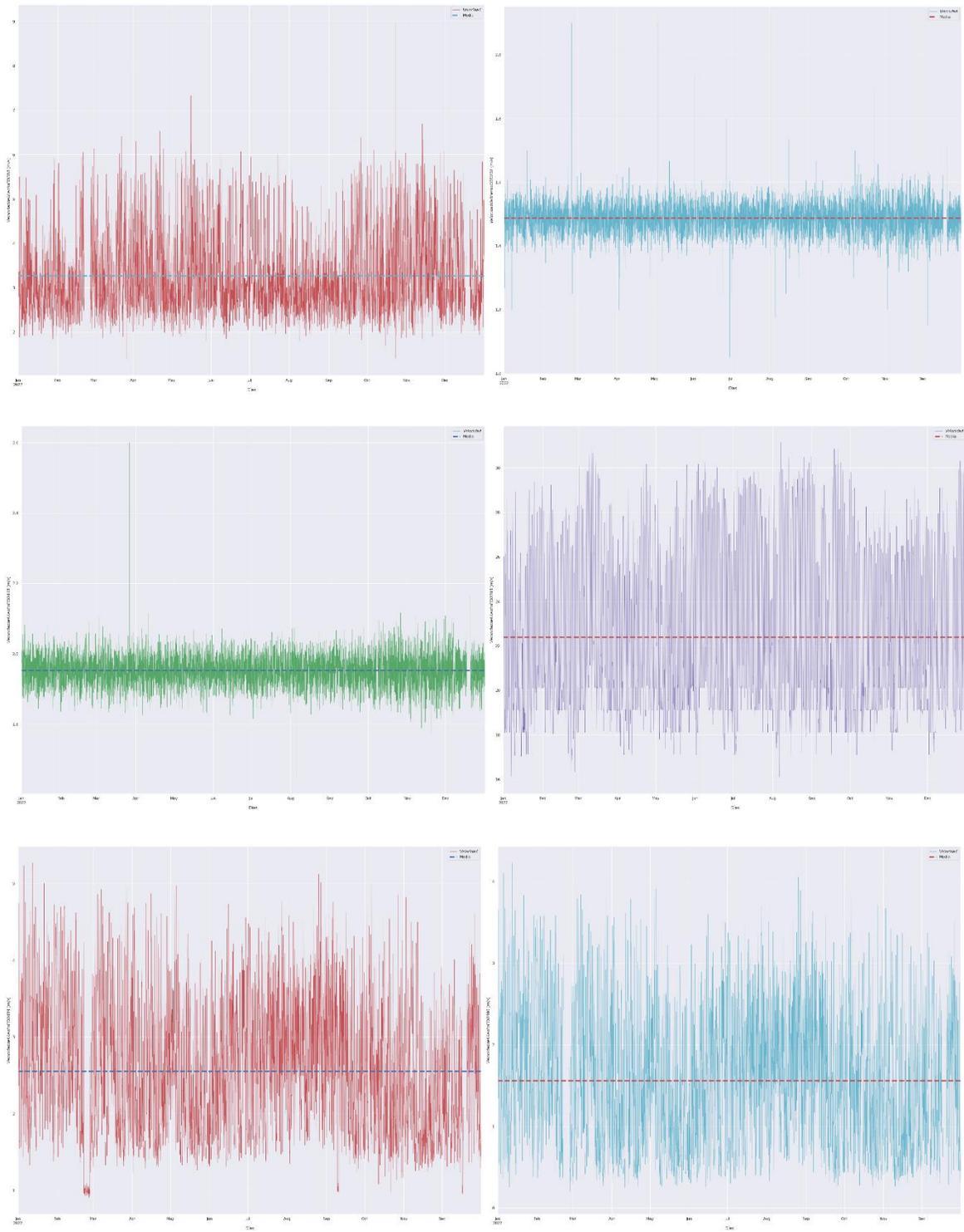


Figura 16. Análisis de homogeneidad para valores horarios de las estaciones meteorológicas para la temperatura (datos sin tratamiento). De Izquierda a Derecha: COD68, COD202, COD478, COD203, COD419, COD360 y COD367.



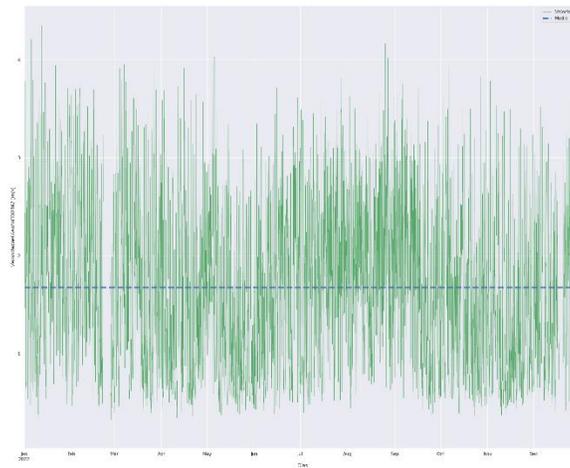


Figura 17. Análisis de homogeneidad para valores horarios de las estaciones meteorológicas para la velocidad del viento (datos sin tratamiento). De izquierda a Derecha: COD68, COD202, COD478, COD203, COD419, COD360 y COD367.

El análisis de identificación de puntos anómalos (*“outliers”*) se realizó mediante la utilización de diagramas de cajas y bigotes, con el objeto de identificar datos atípicos y atípicos extremos en las respectivas series, identificando posibles errores en la toma de datos o la comprobación de la ocurrencia de los mismos.

En la Tabla 10 se identificaron el número de valores atípicos 1 (atípico leve) y 2 (atípico extremo) resultantes por estación, en donde los valores atípicos 1 fueron incluidos en las series de tiempo, para complementar el proceso de interpolación. Los valores atípicos 2 fueron descartados previa a la comprobación que el valor analizado no correspondiera a un valor promedio máximo de esta estación para el periodo de análisis.

Tabla 10. Identificación de valores atípicos 1 y 2 para las variables en las estaciones meteorológicas y de calidad del aire.

COD	Nombre	Variable	Valores atípicos 1	Valores atípicos 2
100	Medellín - Fiscalía General de la Nación	[PM _{2.5}]	47	13
80	Medellín, Villahermosa - PTAP EPM	[PM _{2.5}]	50	21
12	Estación Tráfico Centro	[PM _{2.5}]	69	21
68	Jardín Botánico	Velocidad y Dirección del viento	49	35
		Temperatura	38	19

478	Medellín - Fiscalía General de la Nación	Velocidad y Dirección del viento	40	26
		Temperatura	37	10
203	UNAL – Sede Agronomía	Velocidad y Dirección del viento	21	7
		Temperatura	28	11
419	SENA Medellín	Velocidad y Dirección del viento	21	10
		Temperatura	19	7
202	AMVA	Velocidad y Dirección del viento	24	18
		Temperatura	38	15
360	Miraflores	Velocidad y Dirección del viento	52	20
		Temperatura	41	12
367	Joaquín Vallejo	Velocidad y Dirección del viento	59	18
		Temperatura	62	13

4.2.2 Distribución temporal

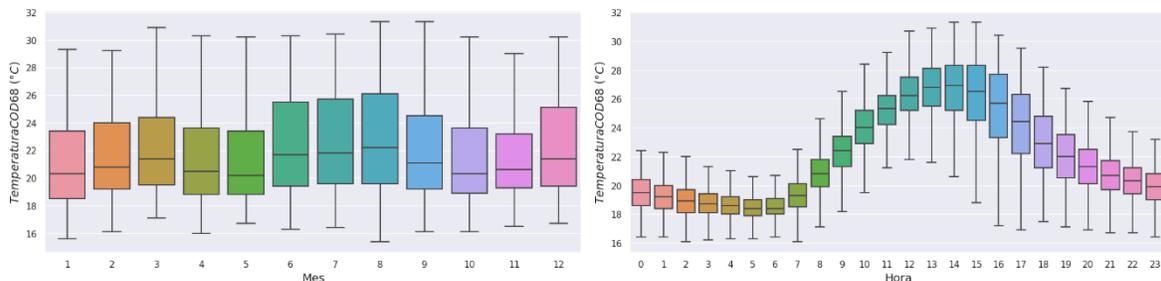
El análisis de las dinámicas temporales de las variables meteorológicas y de calidad del aire en las escalas de interés se realiza a partir de la construcción del ciclo anual y diurno promedio. Los resultados del resumen estadístico de las variables analizadas se recopilan en la Tabla 11.

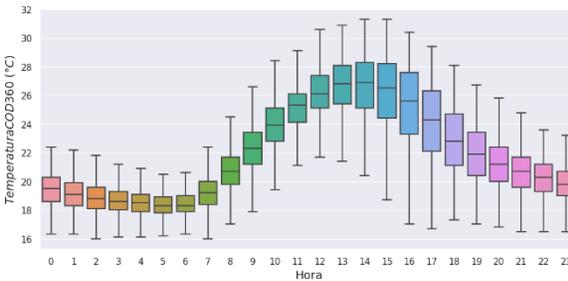
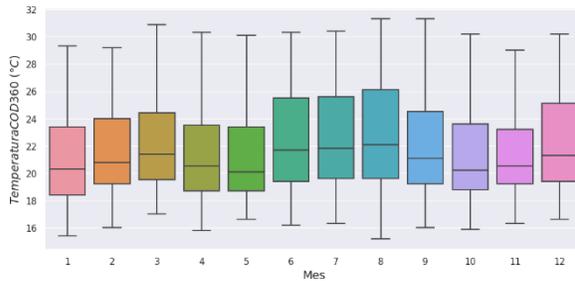
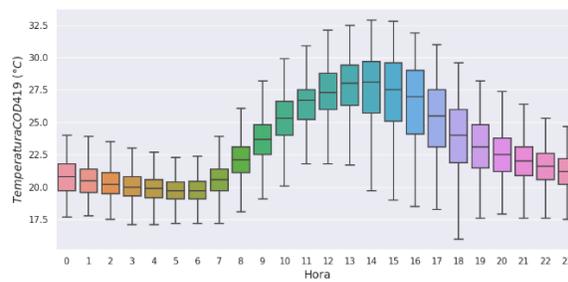
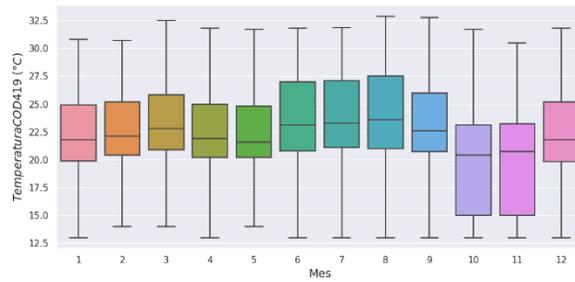
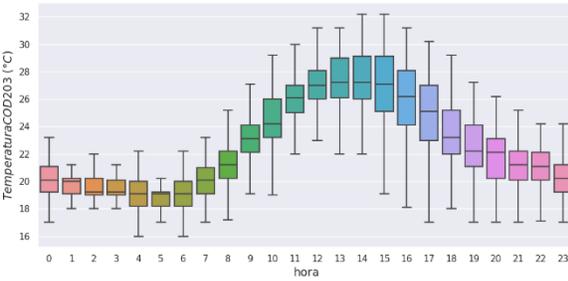
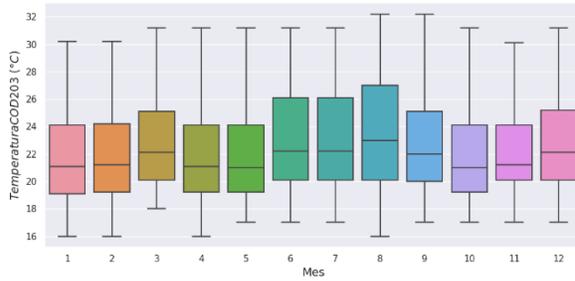
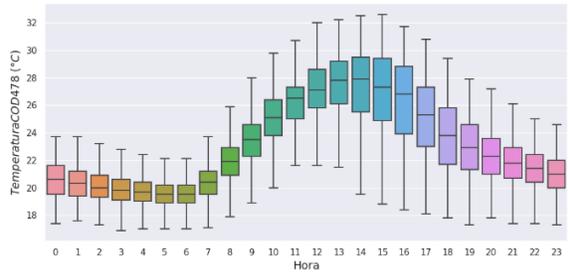
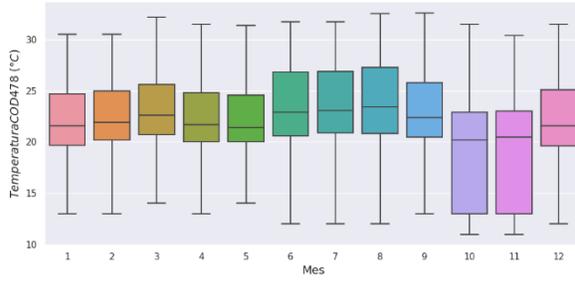
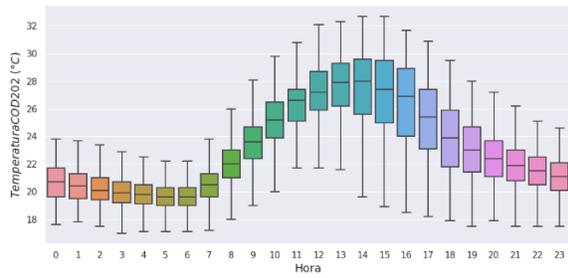
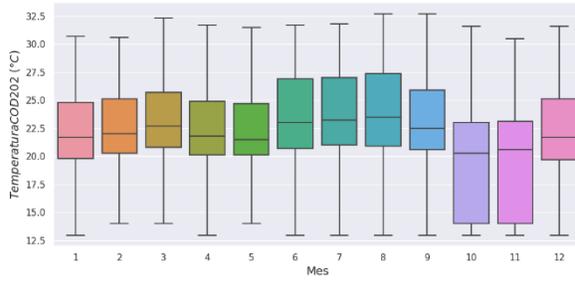
Tabla 11. Resumen estadístico de las variables meteorológicas y de calidad del aire para cada estación.

COD	Nombre	Variable	μ	δ	Max	Min
100	Medellín - Fiscalía General de la Nación	[PM _{2.5}] (μg/m ³)	22.02	10.05	70.17	1.05
80	Medellín, Villahermosa - PTAP EPM	[PM _{2.5}] (μg/m ³)	20.29	10.06	64.12	1.00
12	Estación Tráfico Centro	[PM _{2.5}] (μg/m ³)	26.59	11.19	70.00	1.02
68	Jardín Botánico	Velocidad del viento (m/s)	3.25	2.18	9.00	1.04
		Dirección del viento (°)	N (21.5)			
		Temperatura (°C)	21.88	3.32	31.30	15.40
478	Medellín - Fiscalía General de la Nación	Velocidad del viento (m/s)	1.95	0.33	6.80	1.10

		Dirección del viento (°)	N (22.5)			
		Temperatura (°C)	22.34	4.21	32.60	11.00
203	UNAL – Sede Agronomía	Velocidad del viento (m/s)	1.83	0.75	7.20	0.100
		Dirección del viento (°)	NW (340.8)			
		Temperatura (°C)	21.21	5.86	32.20	16.10
419	SENA Medellín	Velocidad del viento (m/s)	2.55	1.21	9.30	0.50
		Dirección del viento (°)	NE (71.3)			
		Temperatura (°C)	22.67	3.92	32.90	13.01
202	AMVA	Velocidad del viento (m/s)	1.49	0.32	7.20	0.70
		Dirección del viento (°)	N (23.5)			
		Temperatura (°C)	22.50	4.06	32.70	13.00
360	Miraflores	Velocidad del viento (m/s)	1.61	1.14	8.10	0.201
		Dirección del viento (°)	SE (157.5)			
		Temperatura (°C)	21.86	3.32	31.30	15.20
367	Joaquín Vallejo	Velocidad del viento (m/s)	1.72	1.14	8.20	0.100
		Dirección del viento (°)	NE (45.0)			
		Temperatura (°C)	21.99	3.33	31.50	15.30

Se establece el ciclo anual y diario de temperatura para cada estación como se muestra en la Figura 18. Durante los meses entre junio a agosto los valores de temperatura son superiores al promedio anual y en el ciclo diario existe una franja horaria entre las 11:00 a.m. – 4:00 p.m. donde la temperatura presenta valores superiores comparadas con el valor promedio horario.





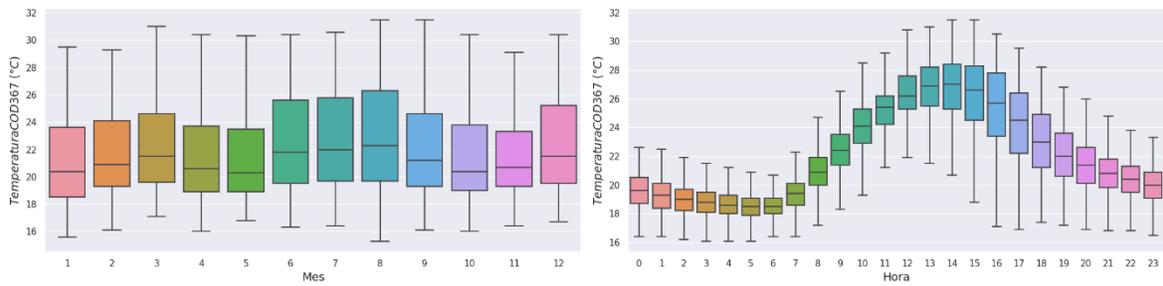
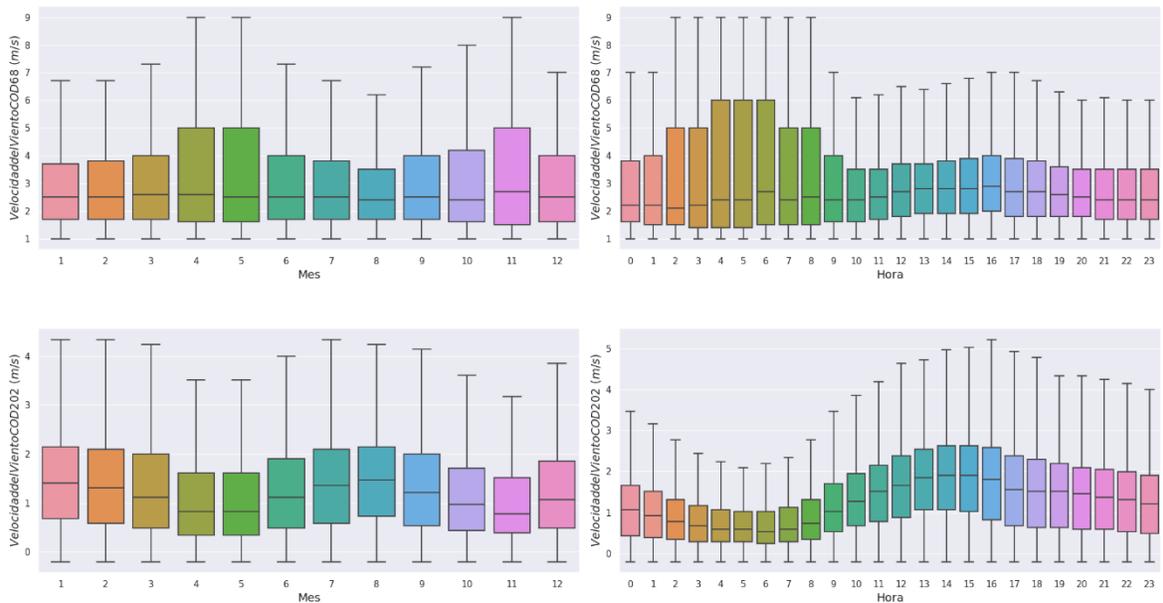


Figura 18. Ciclo anual y diario de las estaciones meteorológicas para el parámetro de temperatura. De arriba hacia abajo: COD68, COD202, COD478, COD203, COD419, COD360 y COD367.

El ciclo anual y diario promedio para la velocidad del viento en cada una de las estaciones se muestra en la Figura 19. Para la variable velocidad del viento, también se evidencia una tendencia en el ciclo anual, siendo los meses entre abril – agosto, los que presentan una velocidad del viento mayor comparada con respecto al promedio. Esta tendencia también se evidencia en el ciclo diario, encontrando valores de velocidad del viento superiores comparados con respecto a la media durante la franja horaria entre las 12:00 p.m. – 7:00 p.m.



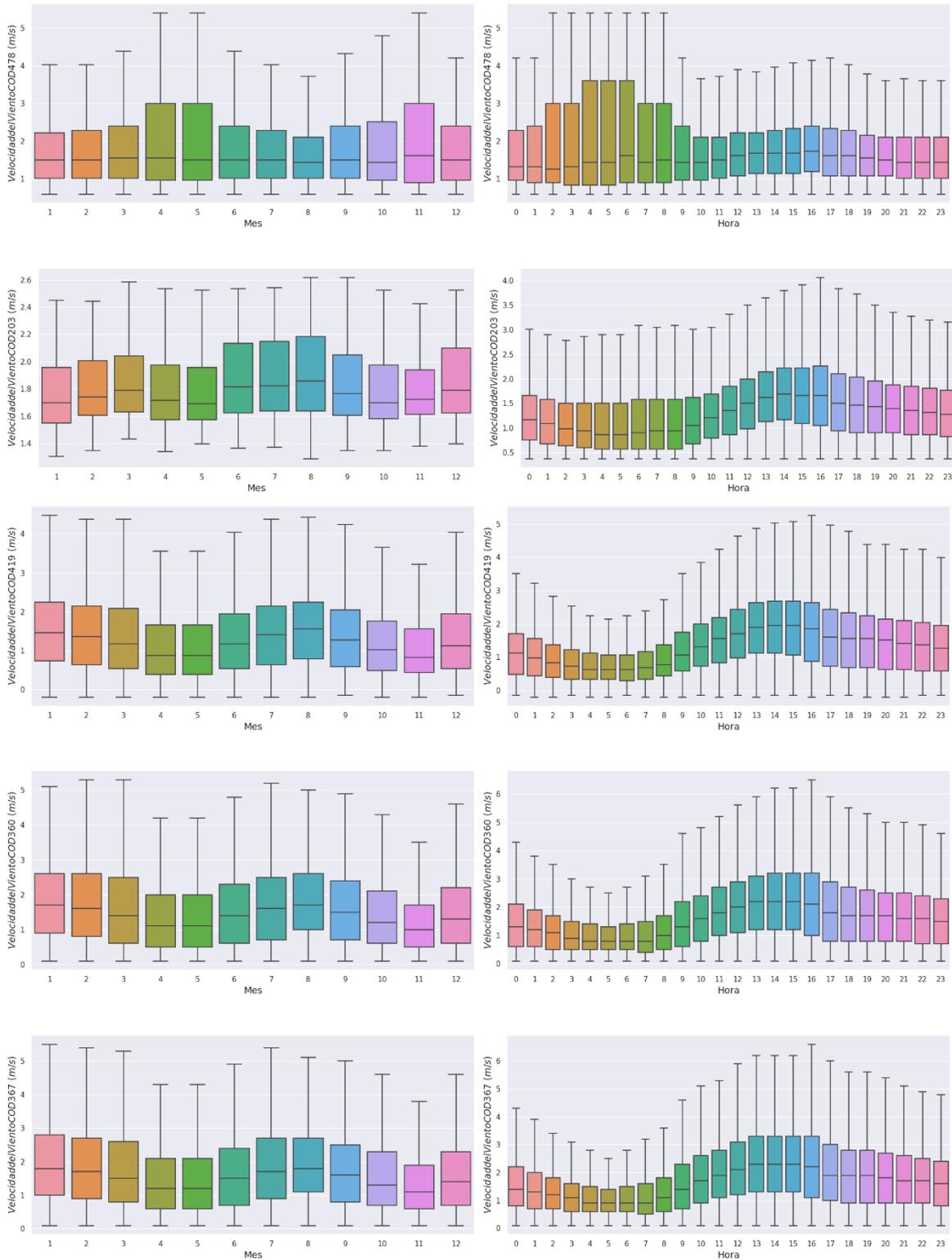
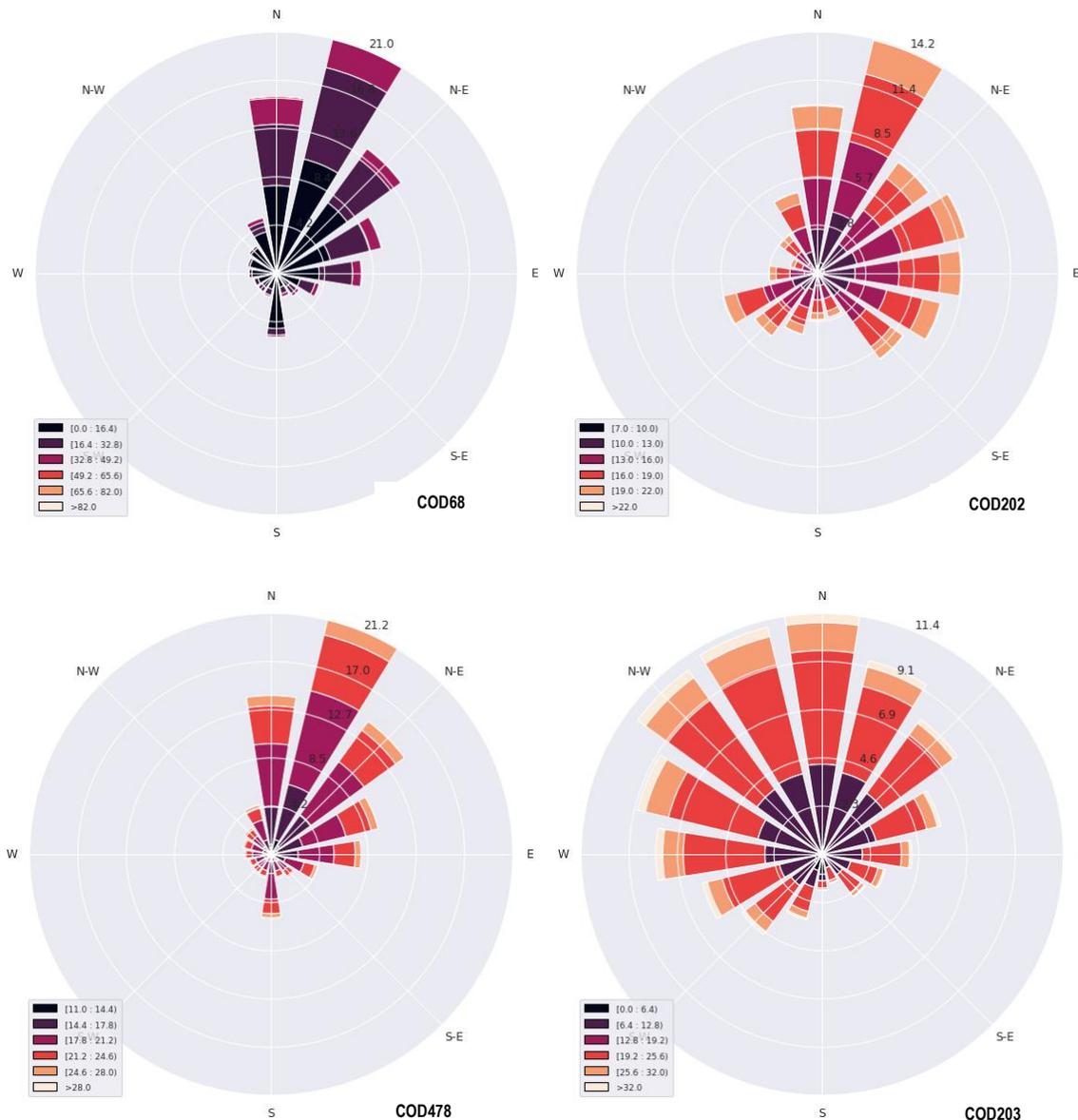


Figura 19. Ciclo anual y diurno de las estaciones meteorológicas para el parámetro de velocidad del viento. De arriba hacia abajo: COD68, COD202, COD478, COD203, COD419, COD360 y COD367.

La representación gráfica de la dirección de los vientos se detalla a través de la rosa de los vientos como se muestra en la Figura 20. La dirección de los vientos en las estaciones de estudio proviene del noreste y el norte del Valle de Aburrá. Esta tendencia es predominante en gran parte de las estaciones, excepto en la estación COD360 ubicada en Miraflores. Esta estación se encuentra ubicada en la ladera oriental del Valle, por lo que puede estar sujeta a recirculaciones ocasionadas por la topografía y a vientos predominantemente anabáticos y catabáticos. El comportamiento de vientos predominantes del noroeste y del norte en las demás estaciones ubicadas en el eje central del Valle de Aburrá han sido reportadas previamente en diferentes estudios (AMVA, 2018 & Londoño Ciro et al., 2017).



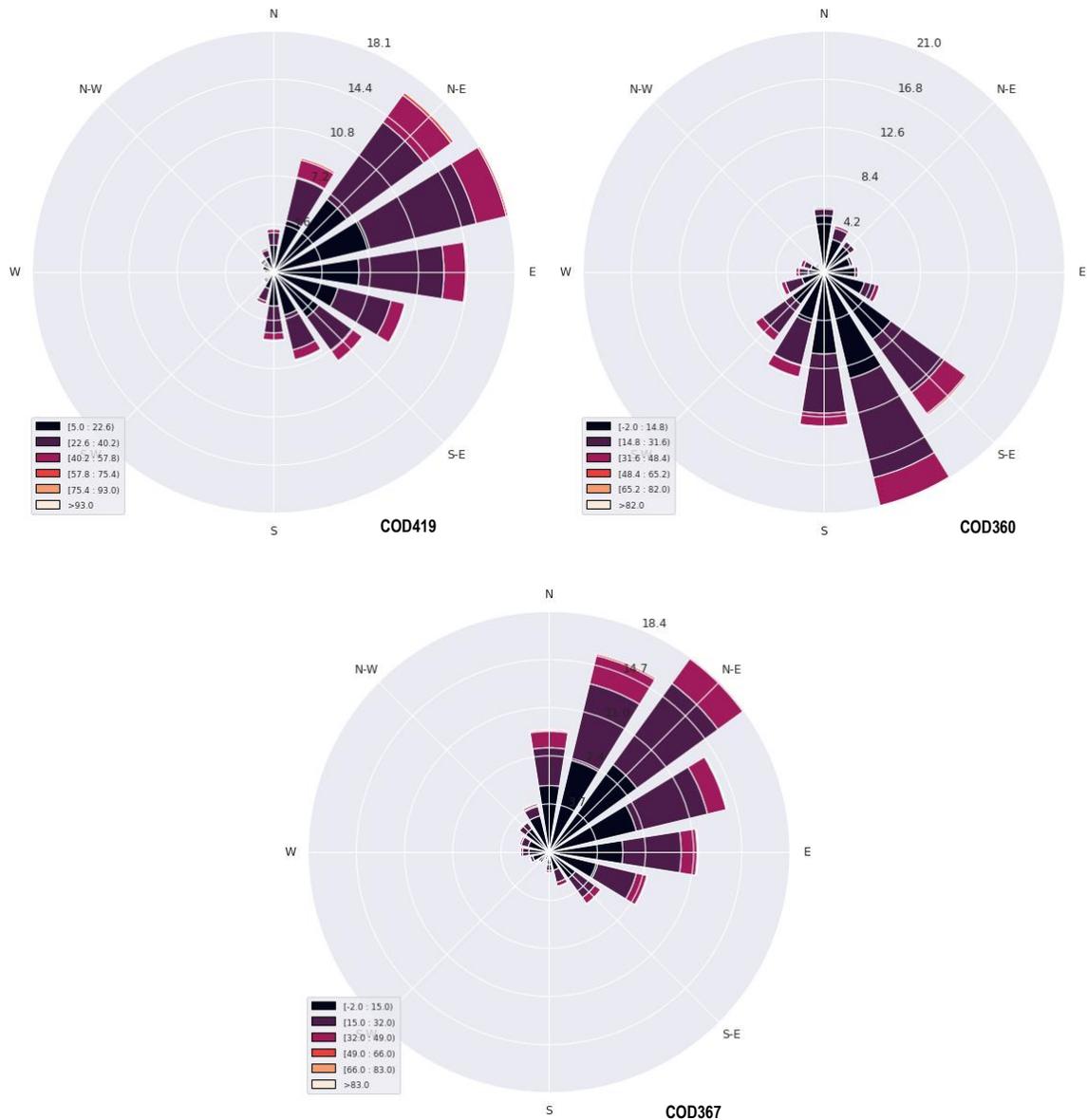


Figura 20. Rosa de los vientos. De Izquierda a Derecha: COD68, COD202, COD478, COD203, COD419, COD360 y COD367.

El ciclo anual y diario promedio para la concentración de PM_{2.5} en cada una de las estaciones se muestra en la Figura 21. En este caso, la distribución temporal del PM_{2.5}, presenta una tendencia similar en las tres estaciones. Durante los meses febrero – marzo y septiembre – noviembre, la concentración de material particulado es superior; comportamiento que coincide con lo reportado anteriormente por AMVA (2018) & Londoño Ciro et al., (2017) en el Valle de Aburrá cuando se presentan eventos de contingencia ambiental por calidad del aire.

Con respecto al ciclo horario, se evidencia un máximo y un mínimo en el ciclo, el cual ocurre en una franja horaria. La concentración de PM_{2.5} superan el valor promedio entre las 6:00 a.m. – 11:00 a.m., mientras que, los valores mínimos se presentan entre la 1:00 p.m. – 5:00 p.m. Este comportamiento horario del material particulado obedece al ciclo de convección y advección atmosférica, siendo un fenómeno térmico regulado por la temperatura y la velocidad del viento.

Al comparar tanto el ciclo horario como el anual entre la concentración de PM_{2.5}, la velocidad del viento y la temperatura, se encuentra una relación inversa, es decir, cuando la velocidad del viento y la temperatura incrementa, la concentración de PM_{2.5} disminuye, esto se presenta durante la franja horaria después del medio día en el Valle de Aburrá, cuando el ciclo de advección y convección térmica atmosférica presentan una mayor energía portante (Londoño Ciro et al., 2017).

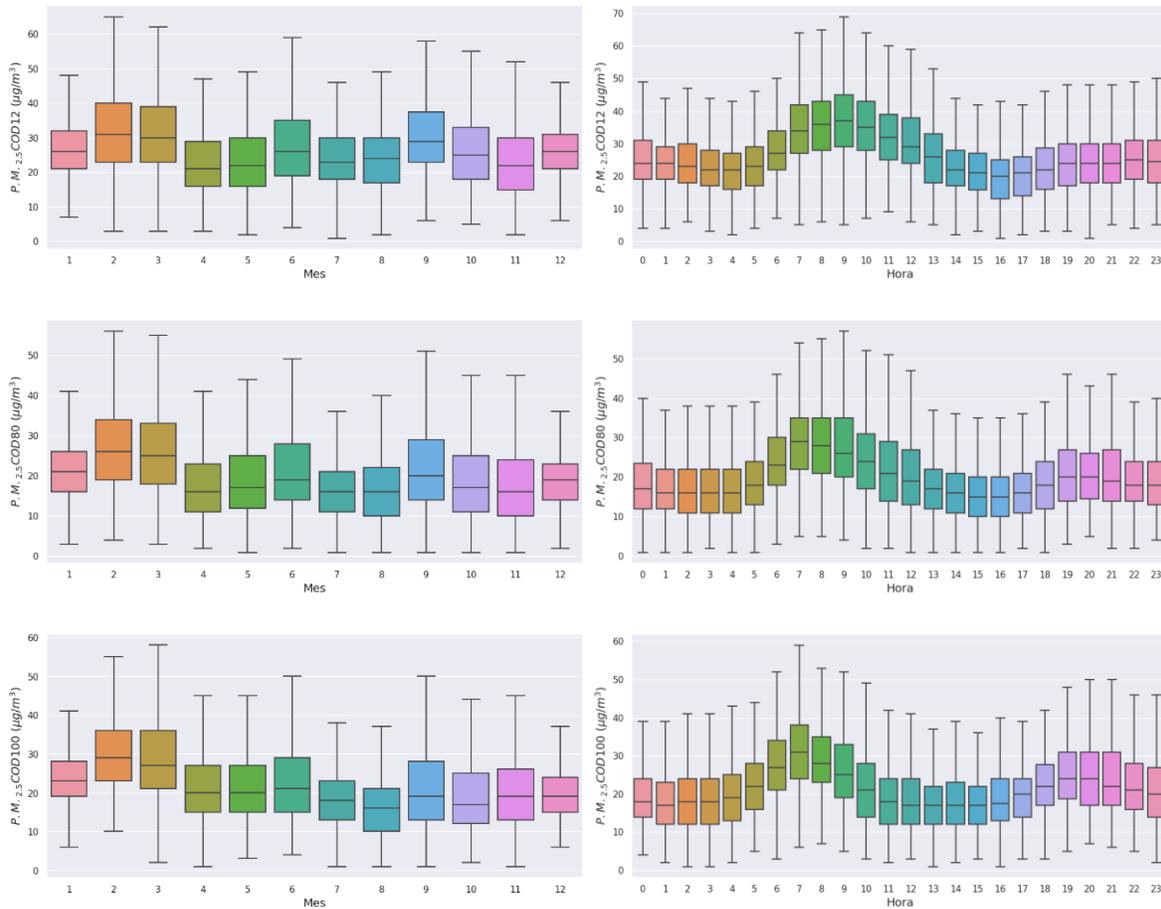


Figura 21. Ciclo anual y diurno de las estaciones de calidad de aire para el parámetro de evaluación P.M._{2.5}. De arriba hacia abajo: COD12, COD80 y COD100.

4.2.3 Distribución espacial

A partir del procesamiento de los datos meteorológicos y de calidad del aire, se realiza la interpolación espacial, para cada una de las variables. Este proceso se lleva a cabo dada la ausencia de valores de ambos tipos de información para el cañón urbano y a la necesidad de éstos para la implementación del ejercicio de modelación CFD. El método de interpolación se seleccionó de acuerdo a los estadísticos de error que presentan los valores mejor ajustados (Londoño Ciro et al., 2017 & Maroufpoor et al., 2020). En la Tabla 12, se describen los estadísticos de error, la comparación entre métodos de interpolación y la selección del método para cada variable.

Tabla 12. Estadísticos de error para selección de métodos de interpolación.

Técnica de Interpolación	Estadístico de Error	Variables meteorológicas y de calidad del aire		
		PM _{2.5}	Velocidad y dirección del viento	Temperatura
IDW (W2)	ASE	2.6099136	0.682628	0.627429
	RMSE	2.287381	0.7062238	0.6906841
	RMSS	1.284782	0.7937285	0.5637284
Kriging Simple	ASE	0.484929	0.5962913	0.4541509
	RMSE	2.657647	0.5811495	0.4541509
	RMSS	1.937382	0.999931	0.826848
Kriging Ordinario	ASE	2.7027489	0.6779435	0.5298427
	RMSE	2.986471	0.6778814	0.5298427
	RMSS	1.793829	0.919931	0.8736282
TÉCNICA DE INTERPOLACIÓN		IDW	Kriging Simple	Kriging Simple

De acuerdo a la tabla anterior, el método de interpolación que presenta los mejores estadísticos de error para la concentración de PM_{2.5} corresponde a IDW de potencia 2, mientras que, para las variables meteorológicas de temperatura y velocidad del viento, el método de Kriging simple es el más adecuado para la interpolación espacial de las variables. Los resultados de los procesos de interpolación para el cañón urbano se muestran en la Figura 22.

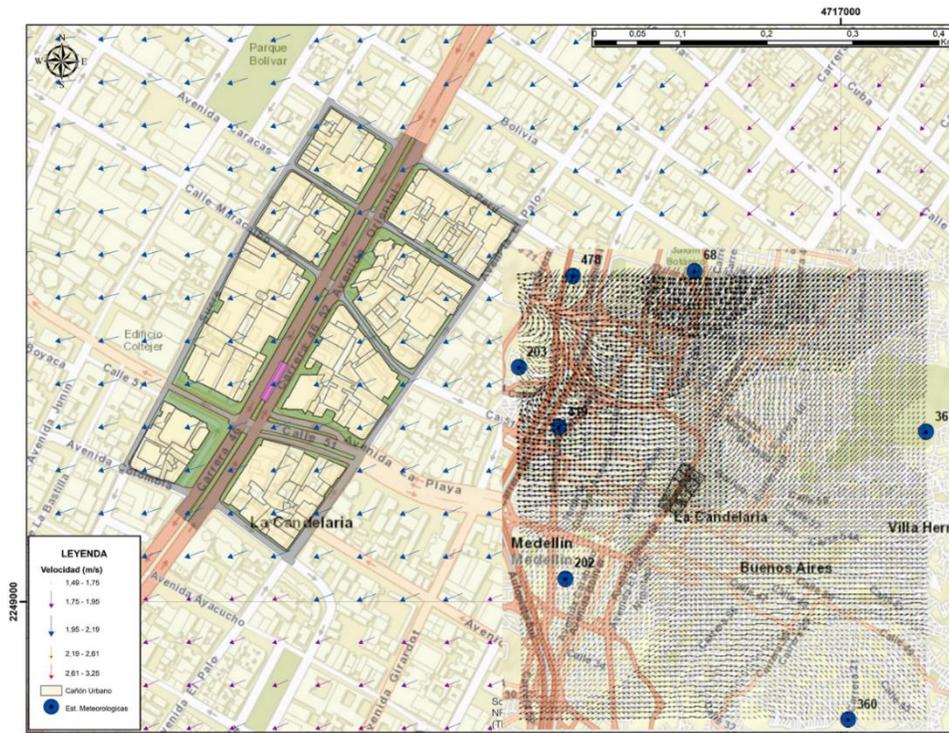


Figura 22. Distribución espacial de los campos promedios de concentración de PM_{2.5}, temperatura, velocidad y dirección del viento (respectivamente).

La distribución espacial de la variable de calidad del aire y las variables meteorológicas muestran que, el cañón urbano se encuentra predominantemente influenciado por las estaciones ubicadas en el centro de la ciudad, lo que permite evaluar las condiciones iniciales que se utilizarán en el modelo numérico. En este sentido, el cañón urbano de la Avenida Oriental presenta una concentración promedio de $25.94 \pm 1.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{2.5}, una temperatura promedio de $22.24 \pm 0.28 \text{ }^\circ\text{C}$, una velocidad promedio del viento de $2.03 \pm 0.56 \text{ m/s}$ y una dirección predominante del viento de $58.23 \pm 3.69 \text{ }^\circ$ (N-NE). Estos valores promedio son información de entrada para el proceso de análisis de las dinámicas de dispersión al interior del cañón urbano usando el modelo CFD.

En el análisis preliminar de la zona comprendida entre el cañón urbano de La Avenida Oriental y el centro de la ciudad, se observa un patrón sugerente relacionado con el comportamiento espacial de variables clave. La hipótesis inicial plantea la posibilidad de un arrastre de material particulado desde el cañón urbano hacia el centro de la ciudad, influenciado por factores como la velocidad del viento y la geometría urbana. Este fenómeno se sustenta en la observación de que el viento puede transportar material particulado a lo largo de su trayectoria, empujándolo desde las áreas urbanas hacia las zonas más céntricas. Además, se destaca una disminución en la velocidad del viento en las proximidades del centro de la ciudad, posiblemente atribuible a la interacción entre el viento y las estructuras urbanas.

Es importante señalar que este análisis no pretende asumir conocimientos previos, sino más bien establecer un marco inicial para las simulaciones posteriores. La investigación se enfocará en explorar y validar estas observaciones mediante simulaciones detalladas que permitan comprender mejor la dinámica del transporte de material particulado en la zona.

4.3 Descripción de las características del cañón urbano

Adicional a las características descritas anteriormente acerca del cañón urbano de la Avenida Oriental, a continuación, se dan detalles adicionales necesarios para la implementación del modelo CFD. Este trabajo de investigación se enfocó en analizar aspectos como la altura de los edificios, el ancho de la vía, la relación altura-ancho (H/W) y otros parámetros relevantes que describen la forma y estructura del cañón urbano de La Avenida Oriental. Estas características morfométricas condicionan la dinámica del flujo de aire, la distribución de contaminantes y la calidad del ambiente urbano (Wang et al., 2021). En la Tabla 13 se describen las características morfométricas del cañón urbano de La Avenida Oriental.

Tabla 13. Características de morfología urbana en el cañón urbano de la Avenida Oriental.

Parámetro	Variable	Resultado
Altura Edificaciones (H) (m)	Máximo	120.0
	Mínimo	6.0
	Promedio	49.0
	Desviación	34.5
Ancho Cañón (W) (m)	Máximo	60
	Mínimo	8
	Promedio	26.5
	Desviación	21.4
Largo (L) (m)		482
Características Morfométricas del Cañón Urbano		
Aspecto H/W		1.85
Aspecto L/W		18.24
Aspecto L/H		9.83

De acuerdo a las características morfométricas descritas en la tabla anterior para el cañón urbano, es posible relacionar el comportamiento del flujo y la distribución del PM_{2.5} en el interior de la Avenida Oriental. La relación H/W de 1.85 sugiere que el cañón urbano presenta una proporción significativa entre la altura de los edificios y el ancho de la vía (Lim et al., 2022). Esta configuración puede generar un flujo en canal, donde el aire se ve confinado y canalizado a través del espacio estrecho entre los edificios (Li et al., 2021). Este tipo de flujo puede influir en la concentración y dispersión de contaminantes en el cañón (Li et al., 2021 & Ding et al., 2019). Por otro lado, la relación L/W de 18.24 indica que el cañón urbano es más largo que ancho. Esta diferencia de escala puede dar lugar a la formación de vórtices de estela en el interior del cañón (Li et al., 2021). Estos vórtices se generan cuando el flujo de aire choca con los bordes de los edificios y se crean remolinos en su

estela (He et al., 2017 & Sofowote et al., 2021). Por último, la relación L/H de 9.83 sugiere una mayor extensión horizontal en comparación con la verticalidad de los edificios. Esta diferencia de escala puede propiciar zonas de recirculación de flujo dentro del cañón urbano (Li et al., 2021). Las áreas de menor velocidad del viento y mayor estancamiento pueden generar acumulación de contaminantes y afectar la calidad del aire en el cañón (Sofowote et al., 2021).

4.4 Condiciones para el modelo CFD y tasa de emisión

4.4.1 Condiciones Iniciales y de frontera

Las condiciones iniciales y de frontera para el modelo se describen en la Tabla 14. Se consideran como condiciones iniciales y de frontera, la concentración de PM_{2.5} y los valores promedio de las variables meteorológicas. Para el caso particular de la concentración de PM_{2.5} el valor de la concentración establecida se aplica en todo el dominio del cañón al inicio de la simulación.

Tabla 14. Condiciones ambientales iniciales para el modelo.

Variable	Unidad	Valor
Concentración Promedio de PM_{2.5}	μg/m ³	25.94
Concentración Máxima de PM_{2.5}		68.10
Velocidad máxima	m/s	6.97
Velocidad promedio		2.03
Velocidad mínima		0.467
Temperatura máxima	°C	32.07
Temperatura promedio		22.24
Temperatura mínima		14.14
Temperatura vía		30.00
Temperatura paramentos		28.00
Dirección predominante	°	58.23
Presión atmosférica	Atm	0.8421
Gravedad	m/s ²	9.77
Viscosidad cinemática	m ² /s	1.5E-05
Viscosidad dinámica	Kg/(m-s)	1.8E-05

Las condiciones de viscosidad del fluido (aire) son constantes para cada uno de los escenarios. Las condiciones de temperatura son constantes para cada escenario. Este mismo condicionamiento, aplica para el valor de la gravedad, que tiene incidencia en la dirección vertical para tener en cuenta su efecto en el flujo de aire dentro del cañón. En

cada escenario, en la zona definida como *inlet*, se establece la velocidad inicial del flujo de aire, utilizando la velocidad promedio como la velocidad inicial, la cual presenta un cambio con respecto a la altura del cañón urbano y coincide con la dirección del viento seleccionada. La presión atmosférica se considera como condición de frontera en la salida del cañón (*outlet*), donde el aire fluye hacia la atmósfera circundante.

4.4.2 Tasa de Emisión del Contaminante

Para determinar la tasa de emisión del PM_{2.5} conocida la concentración promedio se consideran las dimensiones del dominio donde se realiza la simulación CFD. Esto incluye el volumen total del área en la que se ha medido la concentración promedio del contaminante (Wang et al., 2018 & Niu et al., 2017). Para determinar la tasa de emisión del PM_{2.5}, se utiliza la siguiente relación (Wang et al., 2018 & Hang et al., 2016):

$$Tasa\ Emisión\ \left(\frac{Kg}{s}\right) = [PM_{2.5}] \left(\frac{Kg}{m^3 - dia}\right) * V(m^3) * \frac{1\ dia}{86400\ s} \quad (12)$$

Al reemplazar la concentración promedio y máxima para los escenarios de estudio en la relación (11), considerando un volumen del dominio de simulación de 20,920,376 m³ se obtiene una tasa de emisión promedio y máxima de 6.281E-06 $\frac{Kg}{s}$ y 1.65E-05 $\frac{Kg}{s}$ respectivamente. Esta tasa de emisión se encuentra asociada a las vías, como una fuente área, como se observa en la Figura 23. Se adopta como altura de emisión 0.20 m, consistente con lo descrito por Niu et al., (2017), tomando esta altura de referencia como la ubicación de las tuberías de escape de los vehículos con respecto al suelo.

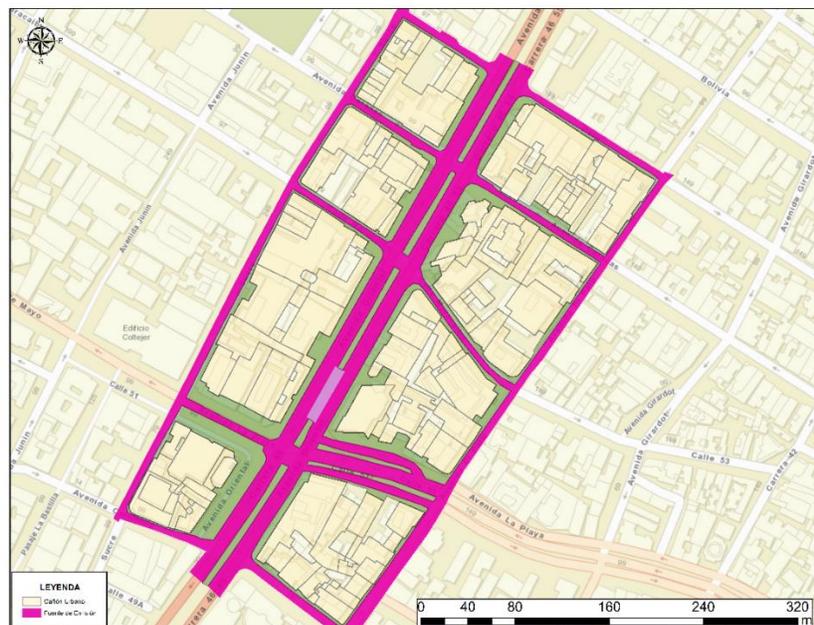


Figura 23. Área del dominio de simulación para la ubicación de la fuente de emisión en el interior del cañón urbano coincidente con las vías.

4.5 Dominio computacional y modelo geométrico

4.5.1 Suposiciones del Modelo

De acuerdo a Multiphysics, COMSOL (2014), la interfaz de Flujo Turbulento, $k-\epsilon$, se utiliza para simular flujos monofásicos a altos números de Reynolds. Esta interfaz física es adecuada para flujos incompresibles y flujos compresibles a bajas velocidades de Mach (generalmente menores a 0.3). Las ecuaciones resueltas por la interfaz de Flujo Turbulento, $k-\epsilon$, son las ecuaciones de Navier-Stokes para la conservación del momento y la ecuación de continuidad para la conservación de la masa. Los efectos de la turbulencia se modelan utilizando el modelo estándar de dos ecuaciones $k-\epsilon$ con restricciones de realismo. El flujo cerca de las paredes se modela utilizando funciones de pared. La interfaz de Flujo Turbulento, $k-\epsilon$, se puede utilizar para flujos estacionarios y flujos dependientes del tiempo.

En el presente trabajo de investigación, para el desarrollo de los diferentes escenarios se describen las suposiciones clave para la implementación del modelo CFD:

- a) **Fluido Newtoniano:** se asume que el fluido es Newtoniano, es decir, su viscosidad es constante y no depende del esfuerzo cortante (Li et al., 2021).
- b) **Turbulencia homogénea isotrópica:** se considera que la turbulencia se encuentra en estado estacionario y que la energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación de energía cinética (ϵ) se distribuyen homogéneamente en todas las direcciones (Li et al., 2021 & Wang et al., 2018 & Ferrón Rísquez, J. 2022).
- c) **Flujo incompresible:** se asume que el flujo es incompresible, lo que significa que la densidad del fluido permanece constante en todo el dominio de simulación (Zhi et al., 2020). Esta suposición se puede realizar en situaciones en las que los cambios en la densidad del aire debido a la variación de la presión son despreciables o no tienen un impacto significativo en el fenómeno físico que se está estudiando, como los señalados por Wang et al., (2021) & Li et al., (2021) & Lim et al., (2022) & Hao et al., (2019): flujo a velocidades bajas o moderadas, flujo en cañones o conductos de gran diámetro y fenómenos de baja presión.
- d) **Flujo estacionario:** se asume este tipo de flujo, considerando que, las propiedades del fluido en el sistema no cambian con respecto al tiempo. En este tipo de flujo, las variables como la velocidad, la presión y la temperatura se mantienen constantes en el tiempo en cada punto del dominio de simulación.
- e) **Fuerzas despreciadas:** se desprecian los efectos de Saffman y arrastre, siendo relevantes en flujos de bajo Reynolds y puede ser importante en situaciones donde la viscosidad del fluido es significativa (Wang et al., 2018).
- f) **Condiciones de frontera asumidas:** se asume que la condición de frontera de salida se establece como flujo completamente desarrollado y la condición de frontera del muro de los edificios y la frontera inferior se establecen como pared sin deslizamiento (Niu et al., 2017 & Ferrón Rísquez, J. 2022).

- g) Flujo aislado:** el fluido que está siendo analizado no interactúa significativamente con su entorno. Esto implica que no hay intercambio de masa, energía o momento con el entorno circundante. En este caso el flujo se encuentra en una región del dominio que está suficientemente alejada de cualquier frontera o límite del sistema, de manera que las influencias externas no afecten significativamente al flujo en esa área (Niu et al., 2017).

4.5.2 Dominio del modelo

El dominio computacional para el modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) con el fin de determinar el transporte y concentración de PM_{2.5} en el cañón urbano, se encuentra descrito por las condiciones iniciales para la velocidad (U, V, W), la energía cinética turbulenta (k) y su tasa de disipación (ε), así como las constantes numéricas que se asumen para considerar la completitud del modelo. En este trabajo de investigación para los escenarios de modelación se considera el siguiente dominio para las variables del modelo (Hang et al., 2016 & Lim et al., 2022 & Park et al., 2020):

$$U(z) = U_d \left(\frac{z}{H_d} \right)^\alpha \quad (13)$$

$$V(z) = 0 \quad (14)$$

$$W(z) = 0 \quad (15)$$

$$k(z) = \frac{1}{C_\mu^2} U_*^2 \left(1 - \frac{z}{\delta} \right)^2 \quad (16)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}} k^{\frac{3}{2}}}{\kappa z} \quad (17)$$

En este caso, las ecuaciones (14-18) describen el perfil vertical de velocidad (U, V, W), la energía cinética turbulenta (k) y tasa de disipación de energía cinética (ε) en una capa límite atmosférica para flujo turbulento, utilizando las leyes de perfil logarítmico y modelos de turbulencia (Lim et al., 2022 & Park et al., 2020). La ecuación (14) representa el perfil vertical de la componente de velocidad U en la dirección X del flujo, en donde U_d es la velocidad del viento a una altura de referencia H_d, y z es la altura sobre el suelo (Figura 24-a). El parámetro α es el exponente de rugosidad del terreno y depende de la rugosidad del terreno y las condiciones atmosféricas (Parker et al., 2020). Las ecuaciones (15-16) indican que las componentes de velocidad V y W en la componente Y y Z es igual a cero en todo el dominio. Esto implica que no hay flujo en dirección y, es decir, el flujo es unidireccional en la dirección X.

La ecuación (17) representa el perfil vertical de la energía cinética turbulenta k . Aquí, C_μ es una constante de modelado, U^* es la velocidad de fricción (velocidad de fricción de pared) y δ es la altura de capa límite atmosférica (Figura 24-b) (Parker et al., 2020 & Lim et al., 2022). Esta ecuación muestra cómo la energía cinética turbulenta disminuye con la altura en la capa límite, lo que es consistente con la disipación de la energía turbulenta a medida que el flujo se aleja de la superficie (Li et al., 2021).

Por último, se cuenta con la ecuación (18) esta ecuación representa el perfil vertical de la tasa de disipación de energía cinética ϵ . C_μ y κ son constantes de modelado (Figura 24-c) (Parker et al., 2020). Esta ecuación muestra cómo la tasa de disipación de energía cinética aumenta con la altura en la capa límite, indicando una mayor disipación de la turbulencia a medida que el flujo se aleja de la superficie (Li et al., 2021 & Lazzari et al., 2016).

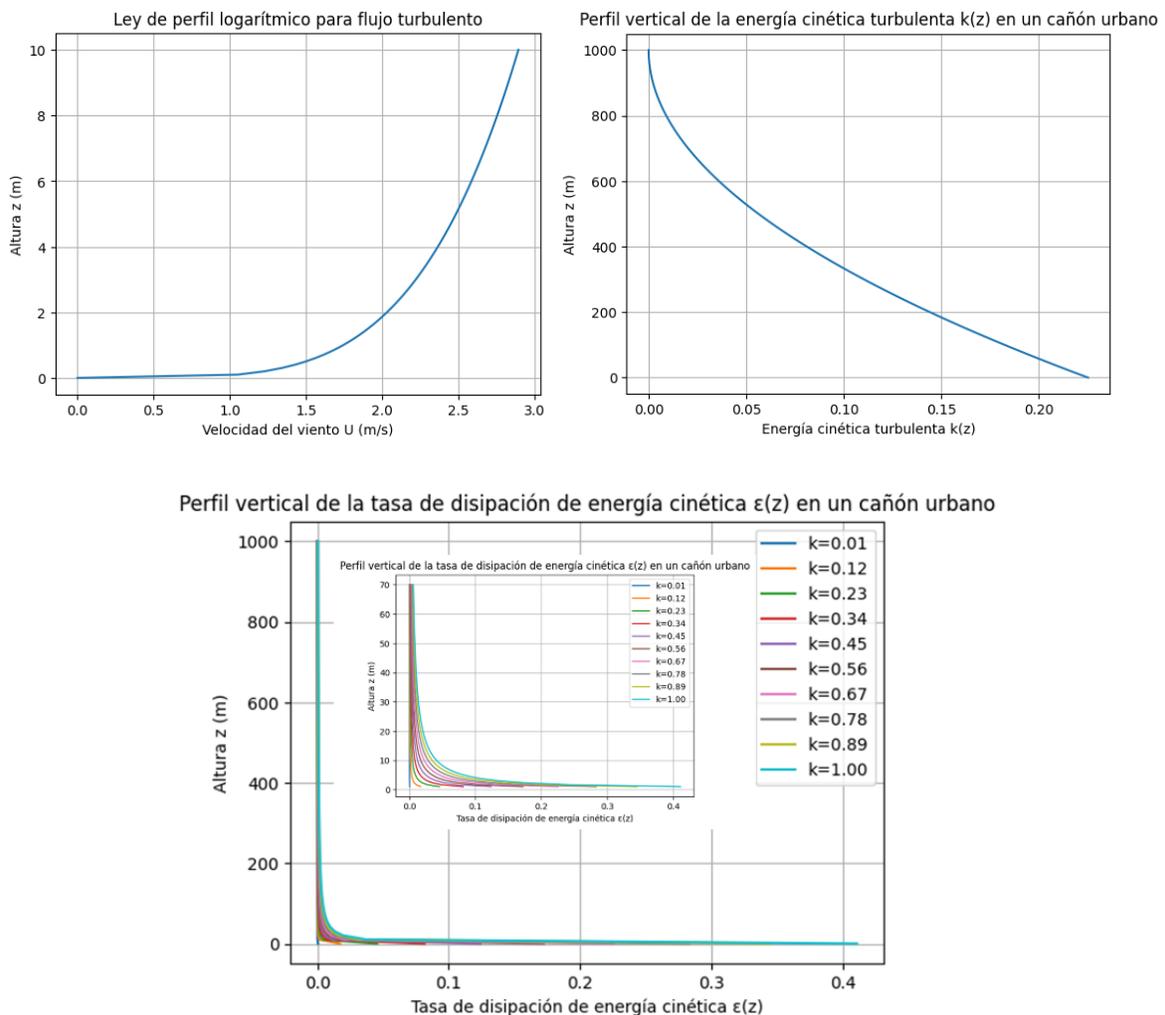


Figura 24. Comportamiento de los perfiles de velocidad del viento (a), energía cinética turbulenta (b) y disipación de la energía cinética turbulenta (c), para $U_d=2.03$ m/s, $\alpha=0.22$, $H_d=2.0$ m, $C_\mu=0.09$, $\delta=1,000$ m, $\kappa=0.04$ y $U^*=0.26$.

En la Tabla 15 se presentan los valores numéricos y demás condiciones iniciales y de frontera que definen el dominio computacional utilizadas en el modelo k- ϵ .

Tabla 15. Condiciones iniciales, de frontera y numéricas del modelo CFD.

Variable	Representación	Valor	Referencia
Exponente de rugosidad del terreno	α	0.22	Wang et al., (2018) – Niu et al., (2017) & Park et al., (2020).
Velocidad de fricción de pared	U^* (m/s)	0.26	Li et al., (2021) - Niu et al., (2017) & Park et al., (2020).
Velocidad del viento a la altura de referencia H_d	U_d (m/s)	2.03 (min: 0.467)	---
Altura de referencia H_d	H_d (m)	2.0	---
Constante empírica del modelo	C_μ	0.09	Li et al., (2021) - Niu et al., (2017) & Park et al., (2020).
Altura de capa límite atmosférica	δ (m)	1,000 (800 – 1,000)	Herrera Mejía, L. (2015)
Constante de von Kármán	κ	0.4	Li et al., (2021) - Niu et al., (2017) & Park et al., (2020).
Constantes del modelo	$C_{\epsilon 1}$	1.44	Wang et al., (2018)
Constantes del modelo	$C_{\epsilon 2}$	1.92	Wang et al., (2018)
Tiempo de integración	Tiempo de integración (s)	4,500	---
Step	Step (s)	0.5	---
Tolerancia	---	1E-3	---
Esquema de solución	---	Esquema de Solución Segregado (Segregated solver)	Lazzari et al., (2016) & COMSOL (2014).
Convergencia	---	1E-3	---

4.5.3 Modelo geométrico

El modelo geométrico en el contexto de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se refiere a la representación digital de la geometría física del dominio en el cual se está estudiando el flujo, incluyendo la geometría detallada del cañón urbano y sus alrededores. Esto implica incluir las calles, edificios y otras estructuras relevantes que puedan afectar el flujo y la dispersión de partículas. Esta representación es esencial para realizar simulaciones CFD (Hasan et al., 2020).

El dominio computacional del modelo suele ser seleccionado en base a la altura promedio de los edificios (H) o el ancho del cañón urbano (W) (Niu et al., 2017). Se considera una grilla estructurada rectangular para la discretización espacial del dominio computacional. El dominio computacional se basa en el diseño de la grilla, y el número de celdas y nodos permanece igual para los dominios. La Figura 25 muestra la configuración del cañón urbano y la malla descrita para el caso de estudio.

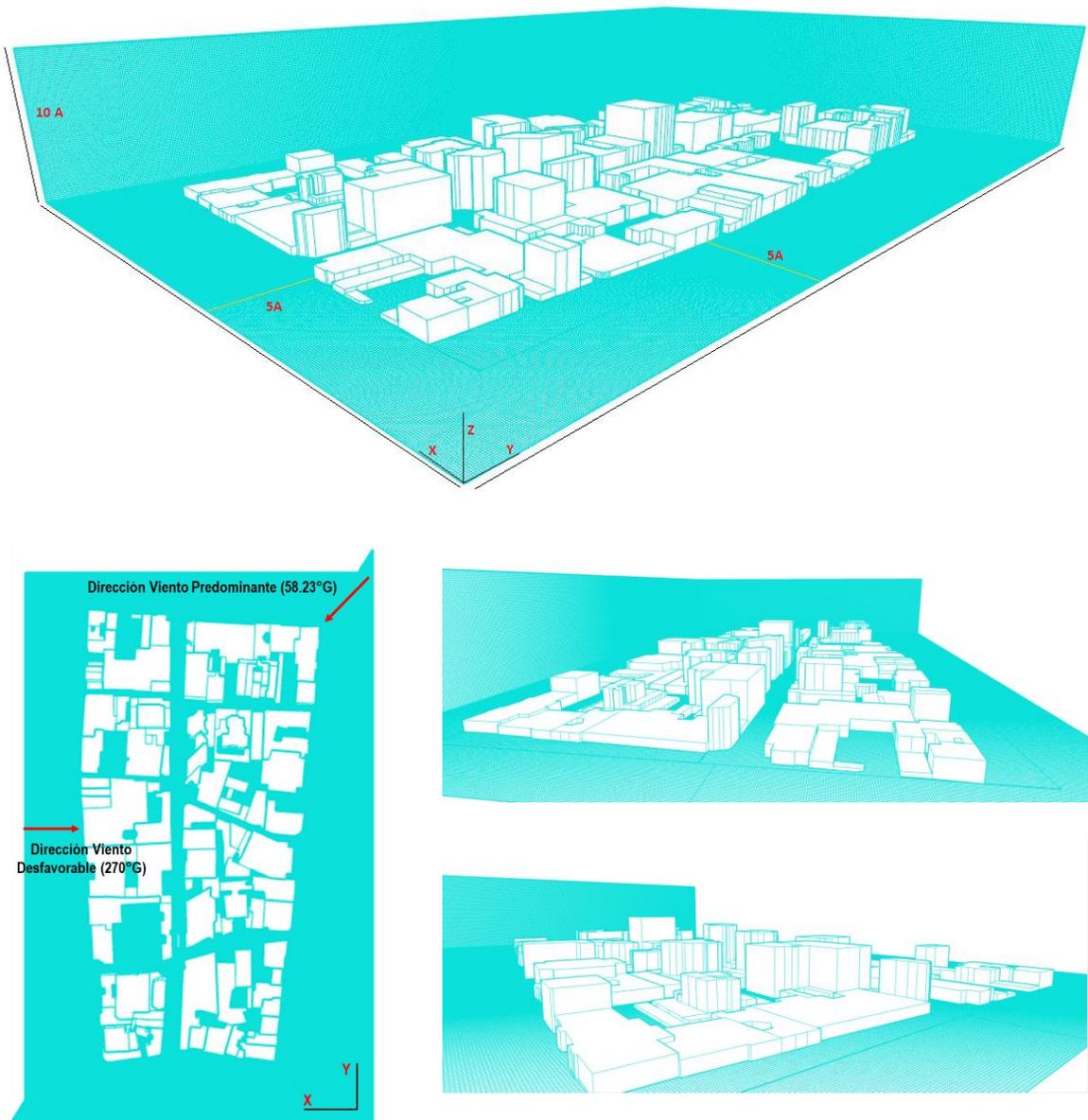


Figura 25. Configuración del cañón urbano y definición del sistema de malla.

La longitud del dominio desde el límite hasta la entrada y salida del cañón de la calle y el ancho del dominio desde ambos lados hasta el cañón de la calle se fijó en $5W$ (A). Esto proporciona una distancia pertinente en el dominio para eliminar la turbulencia de remolinos

en la región de salida del cañón de la calle. La altura del dominio desde el nivel del suelo hasta la parte superior se estableció en 10W (A). Un dominio similar fue utilizado por Park et al. (2020). El dominio computacional tenía una longitud de 1,803.55 m, un ancho de 1,128 m y una altura de 265 m, y se discretizó en 1,128 celdas en la dirección X, 1,804 en la dirección Y y 265 en la dirección Z, como se muestra en la Figura 25.

4.5.4 Generación del mallado y análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad de la grilla en el contexto de un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional se refiere a evaluar cómo varían los resultados del modelo cuando se modifican los parámetros relacionados con la discretización espacial de la geometría del dominio (Wang et al., 2018). En este caso de estudio, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de la malla sobre el efecto de los tamaños de celda para verificar la independencia de la solución y confirmar que el resultado de la predicción no cambia significativamente con diferentes sistemas de malla. La Figura 26 presenta la relación entre la concentración promedio de PM_{2.5} a una altura de 0.20 m y el tamaño de la grilla. El promedio de PM_{2.5} se mantiene constante desde un tamaño de grilla de 0.6 m x 0.6 m hasta 1.0 m x 1.0 m, para luego mostrar una tendencia al aumento desde del tamaño de grilla de 1.5 m x 1.5 m. Tras un análisis de sensibilidad de la malla, se eligió la grilla de 1.0 m x 1.0 m, ya que demostró ser lo suficientemente fina como para capturar de manera estable los fenómenos físicos en el modelo.

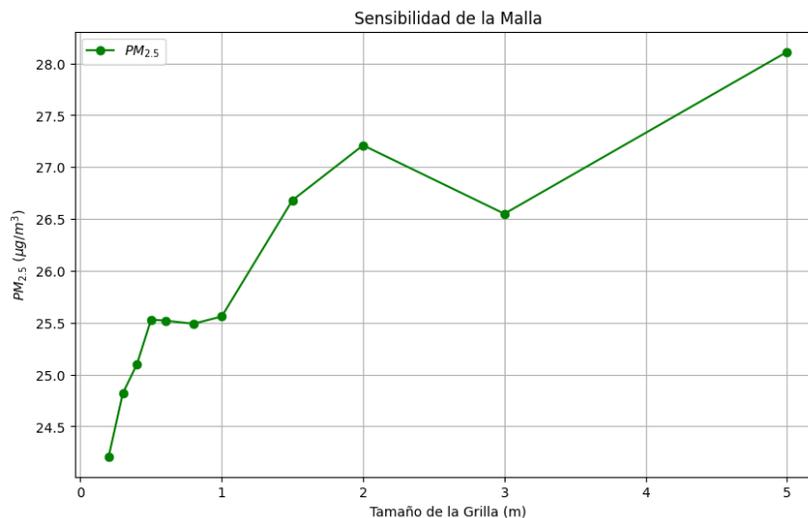


Figura 26. Relación entre la concentración de PM_{2.5} y el tamaño de la malla expresada en metros.

La malla de 1x1 m demuestra su capacidad para capturar de manera más estable los fenómenos físicos en el modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) a través de un análisis de sensibilidad de la grilla. Este análisis se centra en cómo varían los resultados del modelo cuando se modifican los tamaños de celda dentro del dominio computacional.

El objetivo principal fue verificar la independencia de la solución, es decir, asegurar que los resultados del modelo no cambien significativamente con diferentes sistemas de malla.

En el análisis de sensibilidad realizado, se observó la relación entre la concentración promedio de PM_{2.5} a una altura de 0.20 m y el tamaño de la malla. Los resultados, presentados en la Figura 26, muestran que la concentración promedio de PM_{2.5} se mantiene constante para tamaños de malla que van desde 0.6 m × 0.6 m hasta 1.0 m × 1.0 m. Esto indica que, dentro de este rango, el tamaño de la celda es suficientemente fino para capturar de manera precisa los fenómenos físicos sin introducir variaciones significativas en los resultados del modelo.

Sin embargo, para tamaños de celda mayores, como 1.5 m × 1.5 m, se observa una tendencia al aumento en la concentración promedio de PM_{2.5}. Este cambio sugiere que celdas más grandes no son capaces de resolver adecuadamente las características físicas y dinámicas del flujo y la dispersión de partículas en el cañón urbano. La insuficiente resolución espacial con tamaños de celda mayores provoca una pérdida de detalle en la captura de fenómenos turbulentos y variaciones locales en la concentración de PM_{2.5}, resultando en predicciones menos precisas y estables.

La elección de una malla de 1.0 m × 1.0 m se justifica, por tanto, por su capacidad de mantener constantes los resultados de concentración de PM_{2.5}, demostrando que es lo suficientemente fina para capturar de manera estable los fenómenos físicos sin incrementar significativamente el costo computacional. Este tamaño de celda representa un equilibrio óptimo entre precisión y eficiencia, garantizando que el modelo CFD proporciona resultados fiables sin requerir una resolución excesivamente alta que aumentaría los tiempos y recursos de cómputo necesarios.

4.6 Modelación CFD de los casos de estudio

Con el fin de examinar la distribución de la concentración del PM_{2.5} en el cañón urbano de la Avenida Oriental, se proponen cinco áreas o cortes de análisis. En este sentido, se consideran cuatro cortes transversales del cañón urbano en dirección del eje X y un corte longitudinal que coincide con la vista en planta en dirección al eje Y, como se muestra en la Figura 27.

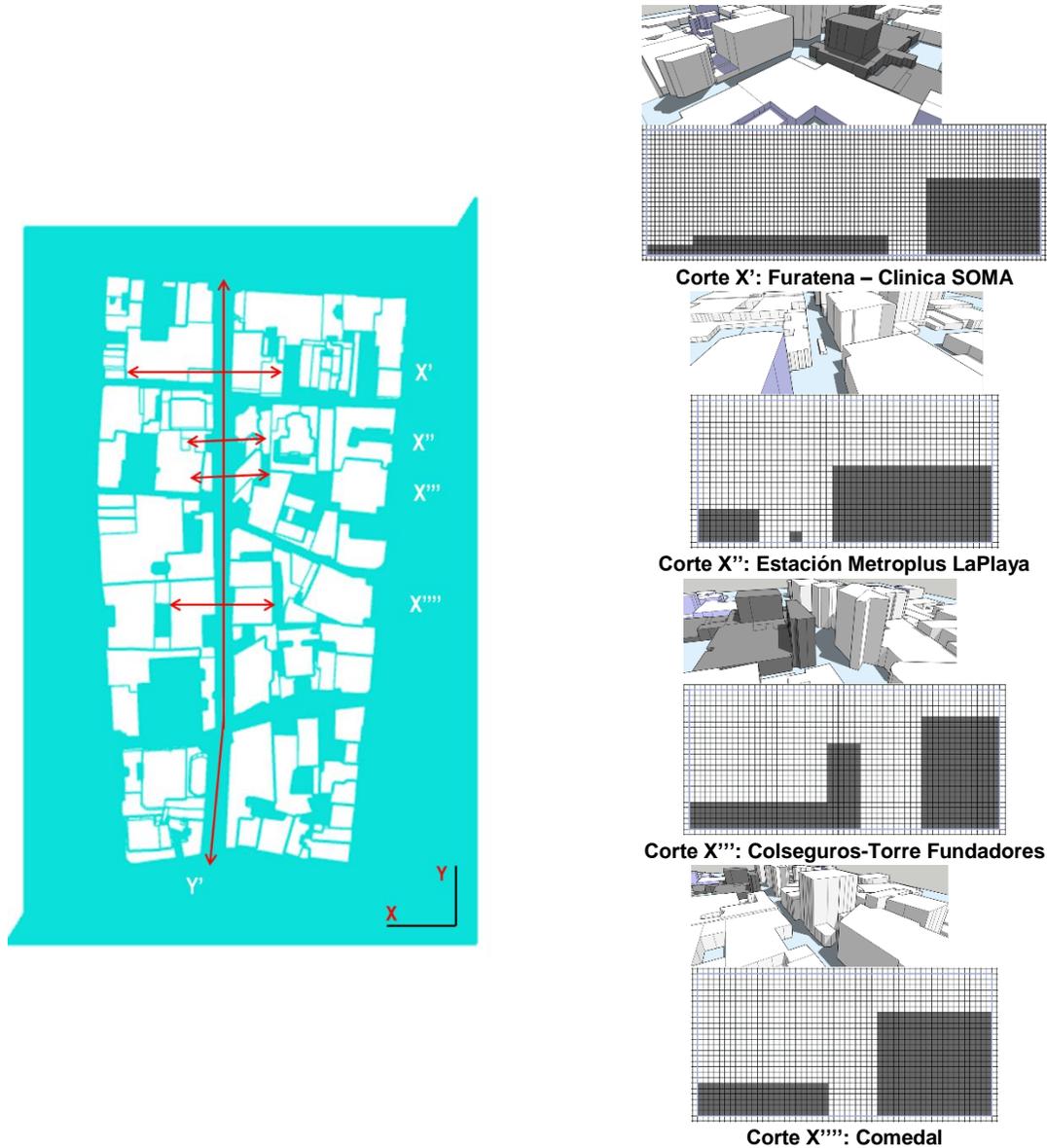


Figura 27. Identificación de los cortes de las secciones transversales (X) del cañón urbano.

4.6.1 Escenario 1: condiciones meteorológicas promedio y morfología urbana actual sin vía preferencial del Metroplús

Las concentraciones de material particulado fino se simulan y analizan en cuatro cortes transversales y una sección longitudinal, como se muestra en la Figura 28.

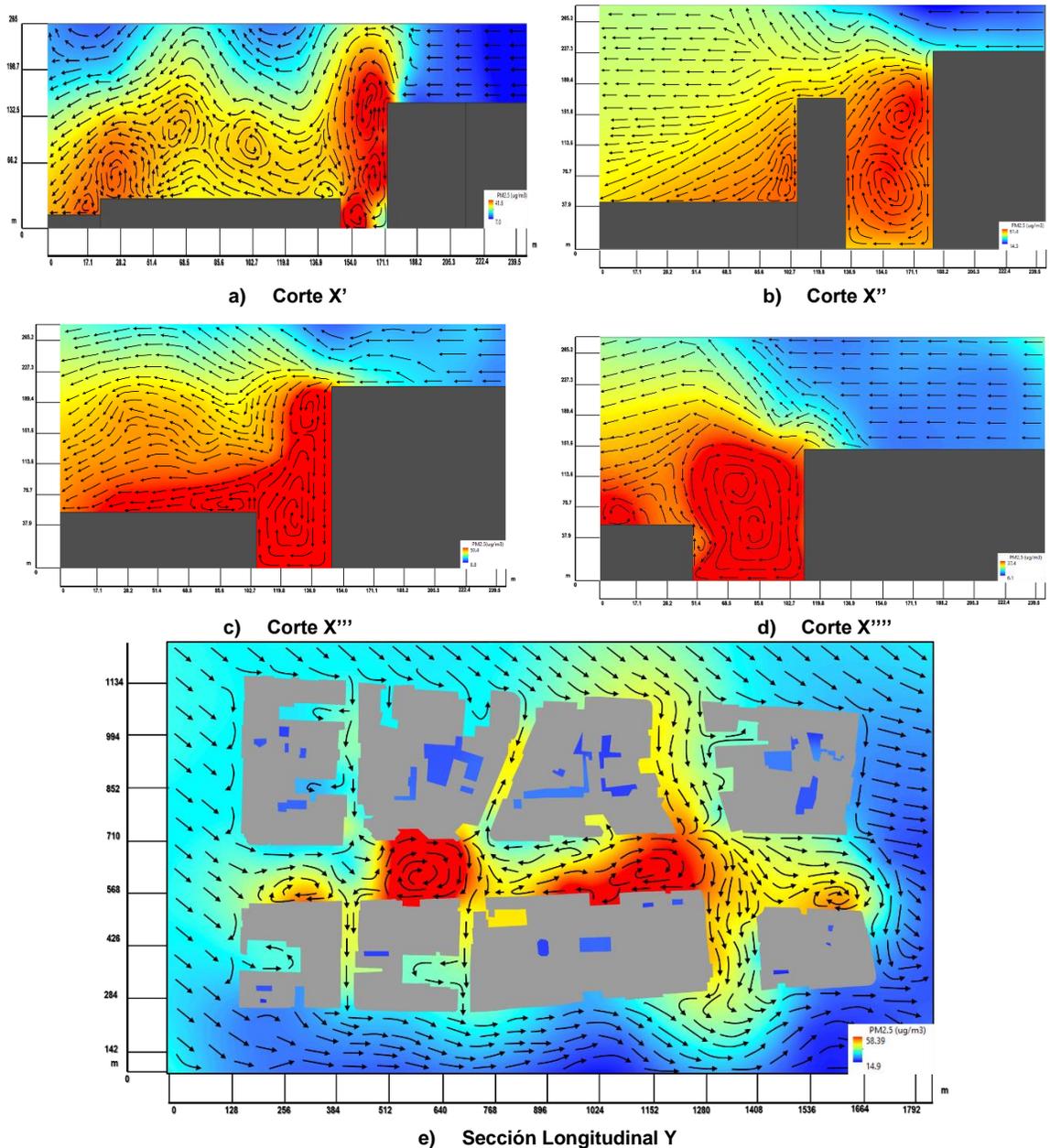


Figura 28. Campo de concentración de PM_{2.5} en el cañón urbano bajo condiciones de 2.0 metros sobre el nivel de la vía, velocidad del viento de 2.03 m/s, temperatura de 22.24°C, dirección del viento de 58.23° y sin vía preferencial del Metroplús.

En los cortes transversales en el plano XiZ, se observan variaciones en la distribución de concentración de PM_{2.5}. La Figura 28 (a-d) ilustra cómo el flujo atraviesa los edificios y se ve influenciado por las paredes, dando lugar a diferentes puntos de estancamiento, siendo el más notable en el corte de la Figura 28 (b). El flujo por encima de estos puntos de estancamiento se separa de los bordes frontales del edificio a sotavento, lo que conduce a la formación de una zona de recirculación en las azoteas y techos de los edificios. En todos los casos, se generaron corrientes descendentes relativamente intensas debajo del punto de estancamiento en la región a sotavento del cañón urbano. Estas corrientes descendentes contribuyeron a la formación de vórtices primarios en sentido horario. Incluso en el caso (d), se observó la formación de hasta siete pequeños vórtices de giro, que se agrupan asintóticamente y, que, bajo estas condiciones, causan aumentos de la concentración de material particulado en la zona posterior a las edificaciones. Estos resultados están acordes con lo reportado por Li et al., (2021), quienes indicaron que a medida que aumenta la relación de aspecto longitud-edificio, los vórtices en el cañón de la calle se vuelven más persistentes, manteniendo un máximo de corriente descendente.

El vórtice más pronunciado se distingue claramente en el caso (b), donde se comparaban dos edificios de alturas similares. Este caso presenta un cañón urbano de menor amplitud (~45.0 m) en comparación con el resto del cañón. Estas condiciones propiciaron la formación de dos vórtices rotantes en sentido horario, con corrientes permanentes generadas por las particularidades del modelo. Esto no solo condujo a una mayor concentración de material particulado en esta área, sino que también estableció un vórtice duradero. En el punto de estancamiento, se evidencia una drástica disminución de la velocidad del flujo de aire en el cañón, lo cual resulta en un rápido incremento en la concentración de material particulado a niveles significativamente altos. Esto, a su vez, indica una ventilación más débil en el cañón en este punto específico.

En el caso (a), la formación de varias crestas o vórtices de contaminación por encima del cañón urbano se debe a la interacción compleja entre las edificaciones y las condiciones atmosféricas locales. La edificación más baja al frente actúa como un obstáculo para el flujo del viento (Li et al., 2016). El viento es desviado hacia arriba y alrededor del edificio, generando áreas de alta y baja presión en diferentes lados del mismo (Li et al., 2016 & Cai et al., 2019).

En el lado leeward (lado opuesto al viento) del edificio más bajo, se crea una zona de baja presión (Reiminger et al., 2020). Esta zona es propicia para la formación de vórtices atmosféricos. El viento que se desplaza alrededor del edificio genera remolinos y vórtices en el aire, dando lugar a crestas o acumulaciones de contaminantes en esa área (He et al., 2017). Como resultado del bloqueo del viento, se produce un flujo de aire ascendente detrás del edificio más bajo. Este ascenso del aire puede llevar consigo partículas contaminantes suspendidas, contribuyendo a la formación de crestas de contaminación en altitudes superiores (Li et al., 2016). El edificio más alto también juega un papel crucial. La diferencia de alturas entre los dos edificios crea una especie de "rampa" para el flujo de aire. El viento

que ha sido desviado alrededor del edificio más bajo puede ascender sobre el edificio más alto, generando nuevos vórtices en la parte superior del cañón urbano.

El análisis de las concentraciones en un plano horizontal, representado en la Figura 28 (e), revela que la configuración con una proporción de altura medida a 2.0 m con respecto a la superficie, comparte similitudes notables en términos de concentraciones. Las concentraciones de PM_{2.5} se manifiestan de manera prominente en el área media y final del cañón urbano. Este patrón está consistentemente correlacionado con la disminución de la velocidad del viento, donde se observa la formación de vórtices, un fenómeno que impacta directamente en la distribución de partículas suspendidas en el aire.

Asimismo, se registra un fenómeno interesante en la Avenida La Playa, que cruza la Av. Oriental donde se presentan notables procesos de recirculación. Este proceso contribuye significativamente a la acumulación de material particulado en el cañón urbano. Tal comportamiento puede atribuirse a la división del flujo de viento en múltiples corrientes al momento de ingresar al inicio del cañón. Además, el efecto de rugosidad en la superficie urbana desacelera notablemente este flujo a lo largo del cañón, exacerbando la acumulación de partículas en suspensión. Estos hallazgos subrayan la complejidad y la influencia de múltiples factores en la distribución de contaminantes en un entorno urbano, proporcionando una visión más detallada y precisa de los patrones de concentración de PM_{2.5} en el área de estudio.

A partir del análisis de la distribución de PM_{2.5}, se pueden identificar las concentraciones correspondientes a cada uno de los ejes o planos en la zona de estudio, tal como se ilustra en la Figura 29. En el eje X, se destaca que las concentraciones más elevadas de PM_{2.5} se concentran en el interior del cañón urbano. Este patrón es coherente con lo observado en el eje longitudinal, donde se evidencia un aumento de la concentración tanto en la entrada como en la salida del cañón urbano. Cabe mencionar que estas mediciones se realizaron a una altura de 2.0 metros sobre la superficie.

En cuanto al eje Z, que representa la altitud, se identifica un comportamiento característico que ha sido previamente documentado por estudios como los de Guyang et al. (2021), Lim et al. (2022) y Reiminger et al. (2020). Este comportamiento se relaciona con los procesos de dispersión y dilución que experimentan las partículas liberadas en el aire. Los vientos y las corrientes atmosféricas tienen la capacidad de dispersar estas partículas, lo que conduce a una disminución de su concentración a altitudes superiores.

En el presente caso de estudio, se ha corroborado esta relación, ya que, a altitudes superiores a los 200 m, únicamente se registra, en promedio, el 35% de la concentración de material particulado con respecto a la superficie. Además, se ha identificado un punto de equilibrio en torno a los 240 m, donde la concentración promedio de PM_{2.5} se sitúa en alrededor de 20 µg/m³.

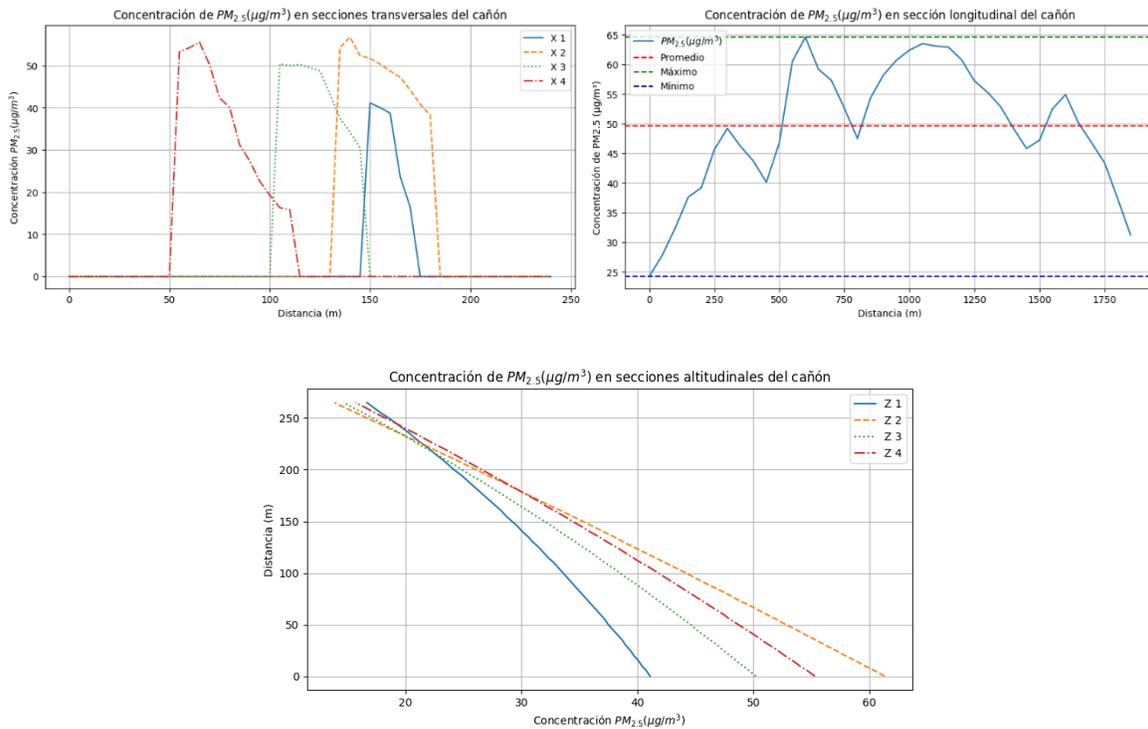


Figura 29. Concentración de PM_{2.5} en el cañón urbano para las secciones transversales (X) y longitudinal (Y) para el escenario 1.

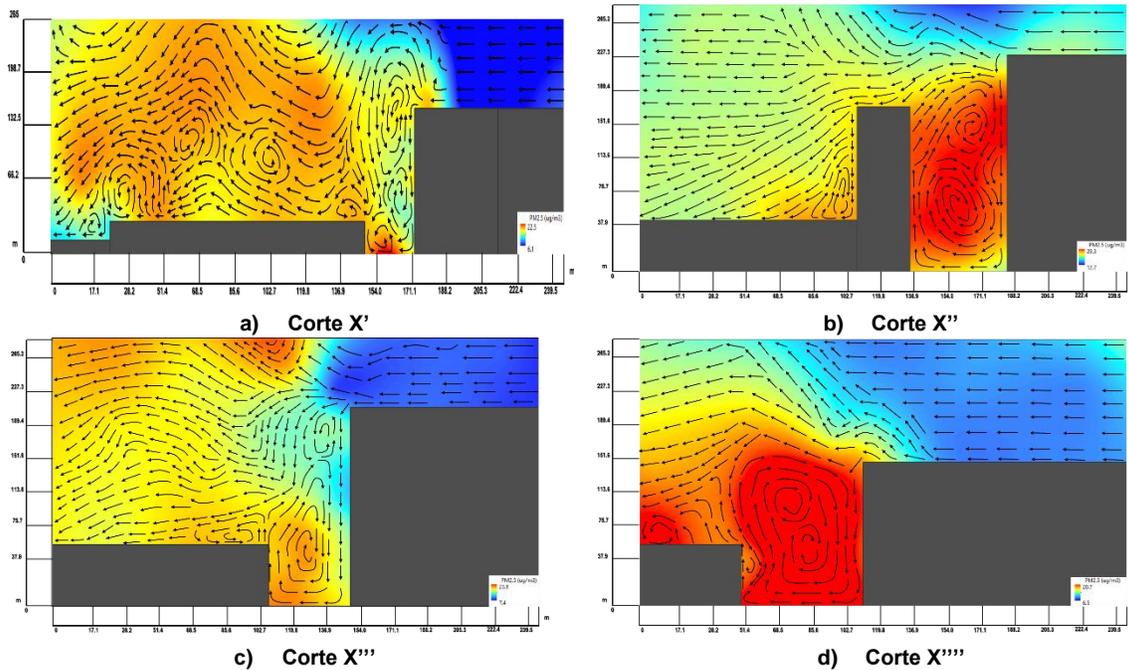
Al analizar detalladamente las condiciones iniciales del modelo, se constató que la concentración inicial de PM_{2.5} se situaba en 25.94 µg/m³. Sin embargo, es importante destacar que, debido a las complejas dinámicas de flujo presentes en el interior del cañón, se generó una redistribución significativa en los patrones de concentración. Esto condujo a altas concentraciones de PM_{2.5} en algunas áreas, alcanzando niveles de hasta 60.4 µg/m³. Por otro lado, se observó que en algunas zonas la concentración disminuyó significativamente, llegando a alcanzar valores tan bajos como 14 µg/m³. Este fenómeno revela la influencia crucial de las condiciones del flujo en la distribución y concentración de partículas contaminantes en el área de estudio. Factores como la geometría del cañón, la velocidad y dirección del viento, así como la rugosidad de las superficies, desempeñan un papel determinante en la compleja dinámica del transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos (He et al., 2017). Estos hallazgos subrayan la necesidad de considerar estos factores en la evaluación de la calidad del aire y en la implementación de estrategias para mitigar los impactos de la contaminación en entornos urbanos.

4.6.2 Escenario 2: condiciones meteorológicas promedio y calidad del aire variable

En el contexto del cañón urbano de la Avenida Oriental en la Ciudad de Medellín, se presenta una comparación entre dos escenarios diferentes en relación a la variación de la concentración de material particulado. El primer escenario (escenario 2A) corresponde a la

reducción a la mitad en la concentración de PM_{2.5} (Figura 33) y el segundo escenario (escenario 2B), consiste en el incremento en la concentración a 68.10 µg/m³ (Figura 34).

En comparación con el escenario 1, la concentración de material particulado es la base de referencia y en el punto X', la concentración inicial es de 22.75 µg/m³, en el escenario 2A, esta concentración disminuye significativamente a 13.6 µg/m³, lo que representa una reducción del 37.47%. Por otro lado, en el escenario 2B, la concentración aumenta a 28.65 µg/m³, lo que equivale a un incremento del 31.72%. En el punto X'', la concentración inicial es de 29.6 µg/m³. En comparación con el Escenario 2A, esta concentración disminuye a 15.6 µg/m³, lo que refleja una reducción del 47.29% y en el escenario 2B, la concentración es de 26.7 µg/m³, lo que representa un decremento del 9.79%. Estos escenarios buscan vislumbrar posibles efectos en la concentración de contaminantes y en su transporte al interior del cañón urbano como consecuencia de estrategias de movilidad que conduzcan a disminución en las emisiones, o a la continuidad en el aumento del parque vehicular y de las emisiones en el centro de la ciudad.



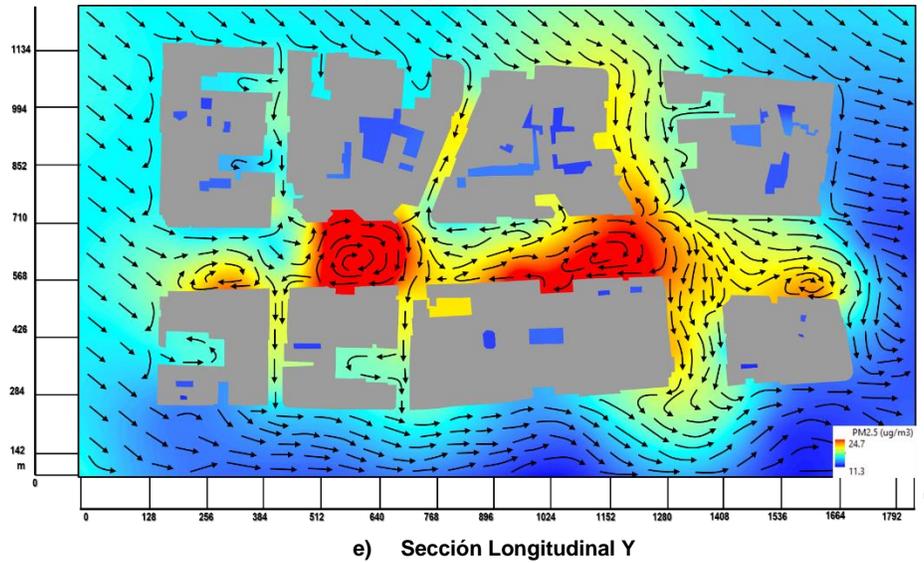
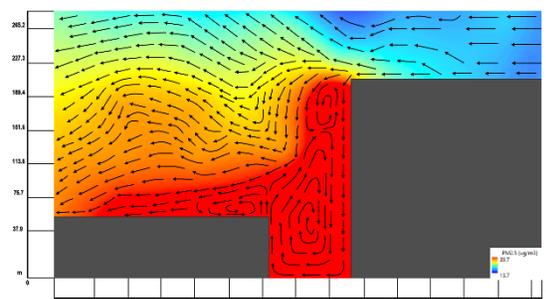
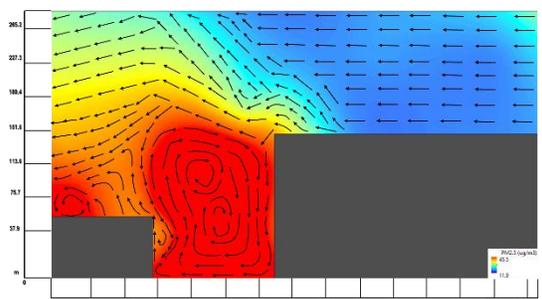


Figura 30. Campo de concentración de PM_{2.5} en el cañón urbano bajo condiciones de 2.0 metros sobre el nivel de la vía, velocidad del viento de 2.03 m/s, temperatura de 22.24°C, dirección del viento de 58.23° y concentración de 12.97 µg/m³.

En comparación con el escenario 1, en el corte X''', la concentración inicial es de 37.95 µg/m³, mientras que, en el escenario 2A, esta concentración disminuye a 21 µg/m³, lo que equivale a una reducción del 44.66%. En el escenario 2B, la concentración se mantiene casi constante en 38.15 µg/m³, lo que representa un ligero incremento del 0.53%.

En el punto X''', para el escenario 1, la concentración inicial es de 24.3 µg/m³, comparando este con el Escenario 2A, esta concentración disminuye a 14.3 µg/m³, lo que implica una reducción del 41.15%. En el Escenario 2B, la concentración aumenta a 28.40 µg/m³, lo que corresponde a un incremento del 16.87%.

Por último, en la sección longitudinal del escenario 1, la concentración inicial es de 36.64 µg/m³. En el Escenario 2A, esta concentración disminuye a 18 µg/m³, lo que significa una reducción del 50.88%. En el Escenario 2B, la concentración aumenta a 44.75 µg/m³, lo que indica un incremento del 22.11%.



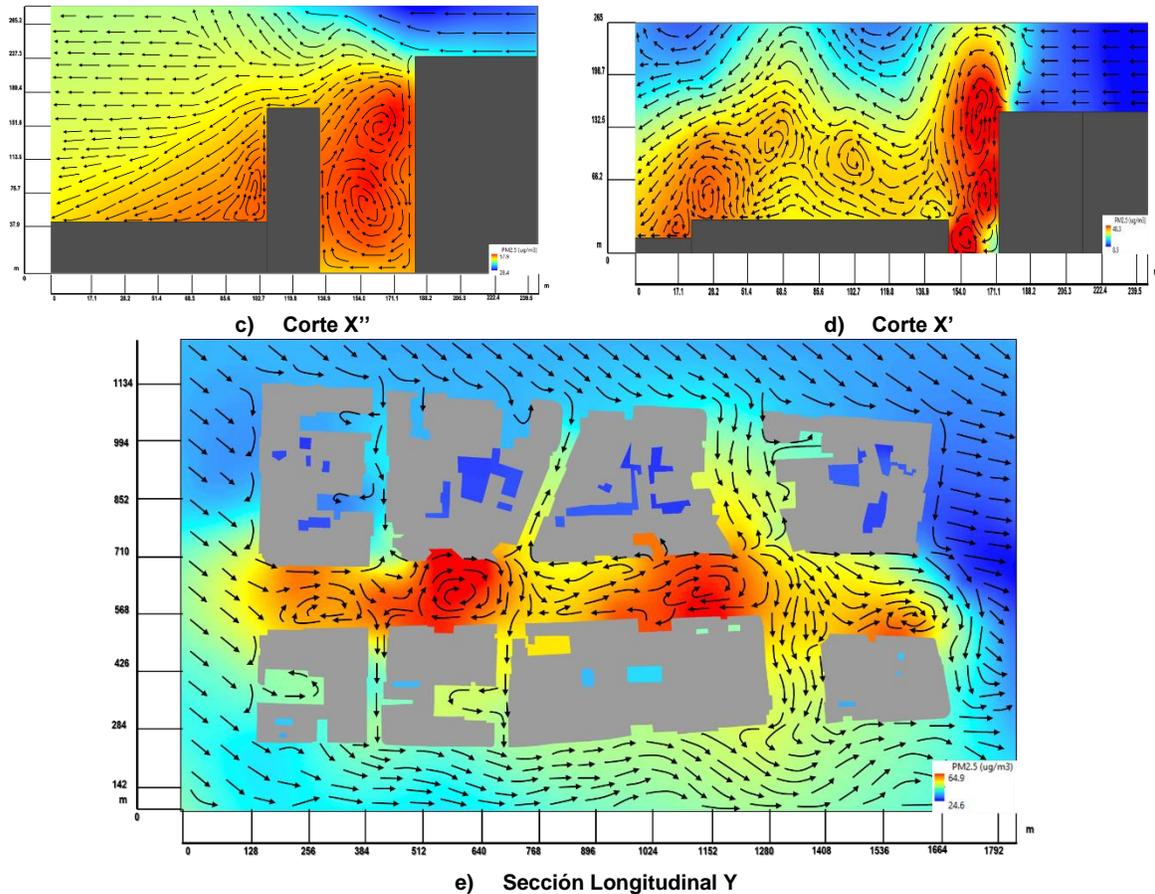


Figura 31. Campo de concentración de PM_{2.5} en el cañón urbano bajo condiciones de 2.0 metros sobre el nivel de la vía, velocidad del viento de 2.03 m/s, temperatura de 22.24°C, dirección del viento de 58.23° y concentración de 68.10 µg/m³.

En el Escenario 2A, al reducir a la mitad la concentración de material particulado, se aprecia una mejora significativa en la calidad del aire en todos los puntos de medición. Esto indica que la disminución de la concentración tiene un impacto positivo en la dispersión del material particulado, reduciendo su presencia en la atmósfera local. Esta reducción se traduce en una variación promedio del 44.29%, lo que significa que al disminuir la emisión de PM_{2.5} a la mitad del valor promedio, se experimenta una reducción de aproximadamente la mitad de la concentración.

En el Escenario 2B, al aumentar la concentración a 68.10 µg/m³, se evidencia un deterioro notable en la calidad del aire en la mayoría de los puntos de medición. Este incremento en la concentración de material particulado conlleva a una mayor presencia y acumulación en la atmósfera, lo que puede tener consecuencias adversas para la salud y el entorno ambiental.

A pesar de haberse multiplicado por 2.62 la concentración de material particulado, la variación en el interior del cañón se limita al 18.83%. Esto significa que el material

particulado en el cañón durante el esquema de integración numérico no se acumula en puntos específicos, sino que se dispersa hacia zonas donde la concentración de material particulado es mínima. Esto sugiere un equilibrio sinérgico debido a las condiciones de frontera. Esta dinámica de dispersión puede contribuir a mitigar los efectos adversos de una alta concentración de material particulado en áreas específicas. Sin embargo, estos resultados muestran efectos importantes para el transporte de contaminantes al interior del cañón urbano frente a diferentes concentraciones de contaminantes, lo que puede contribuir al mejor entendimiento de los efectos de cambios en las emisiones sobre la calidad del aire en puntos específicos al interior de un cañón urbano ubicado en el centro de la ciudad.

Los resultados de comparación entre estos escenarios se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Comparación de la concentración promedio de PM_{2.5} en los escenarios de control.

Corte	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Variación (%)	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Variación (%)
	Escenario 1	Escenario 2A		Escenario 2B	
X'	22.75	13.6	-37.47	28.65	+31.72
X''	29.6	15.6	-47.29	26.7	+9.79
X'''	37.95	21	-44.66	38.15	+13.70
X''''	24.3	14.3	-41.15	28.40	+16.87
Y	36.64	18	-50.88	44.75	+22.11

Esta similitud en los patrones de flujo de aire en los escenarios 1 y 2 indican que se mantienen presentes vórtices similares. Estos vórtices son corrientes circulares de aire que pueden influir en la dispersión y redistribución de material particulado en el cañón urbano. Es importante destacar que, al mantenerse estos vórtices, se puede esperar una distribución similar del material particulado. Por otro lado, es necesario señalar que la concentración de material particulado se ve fuertemente influenciada por las condiciones de emisión y la interacción con los vórtices presentes en el área. En el Escenario 2A, donde se reduce a la mitad la concentración de material particulado, se observa una mejora significativa en la calidad del aire en todos los puntos de medición, a pesar de la presencia de los vórtices. Por otro lado, en el Escenario 2B, donde se incrementa la concentración a $68.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la presencia de vórtices puede contribuir al aumento de la concentración en ciertas áreas, especialmente en zonas donde la circulación del aire favorece la acumulación de partículas.

4.6.3 Escenario 3: condiciones meteorológicas promedio y morfología urbana actual con vía preferencial del Metroplús

En este caso, se mantienen las condiciones del escenario anterior, pero se incorpora la estación del Metroplús de La Avenida La Playa con la Av. Oriental, como se muestra en la Figura 32.

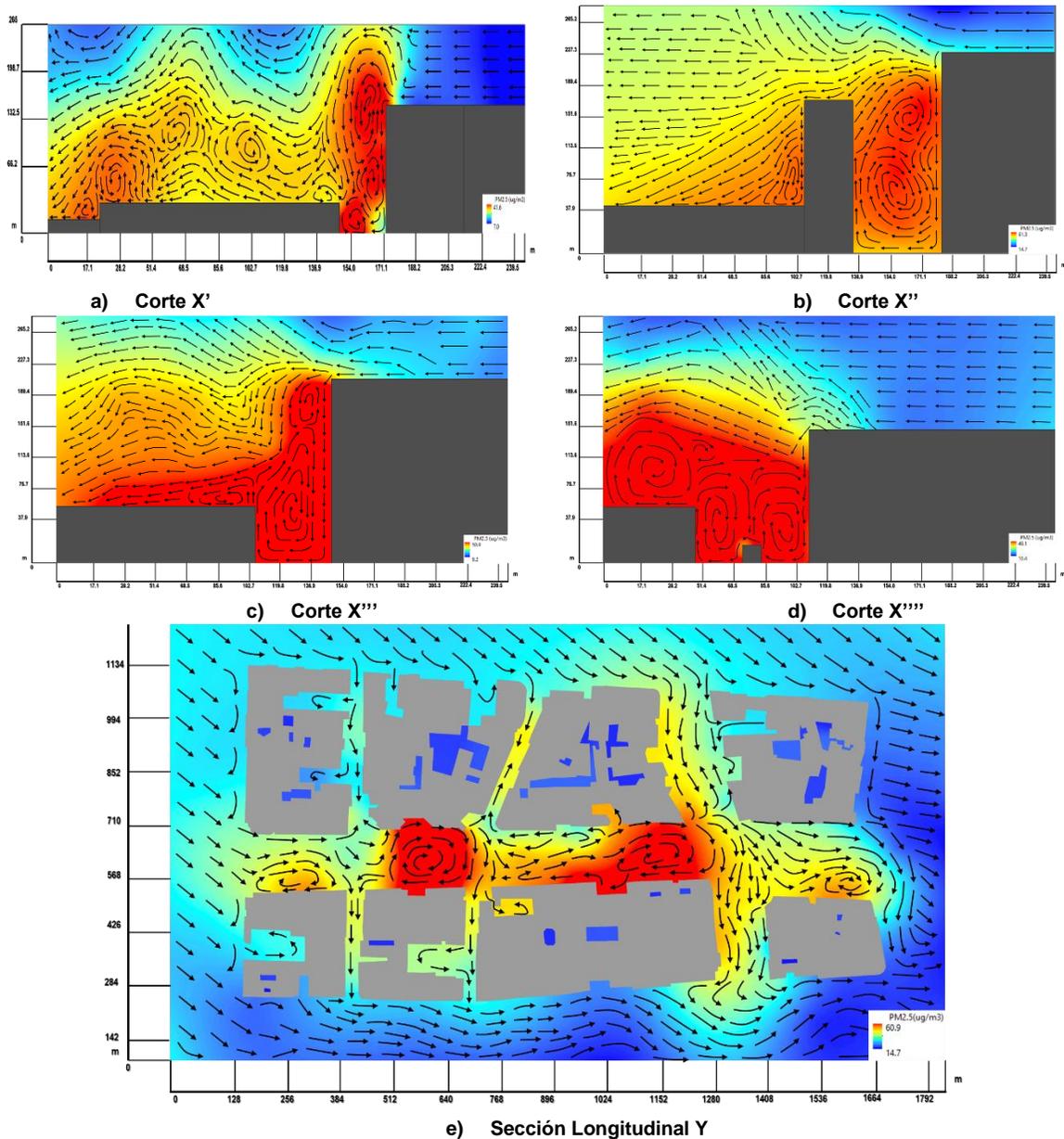


Figura 32. Campo de concentración de PM_{2.5} en el cañón urbano bajo condiciones de 2.0 metros sobre el nivel de la vía, velocidad del viento de 2.03 m/s, temperatura de 22.24°C, dirección del viento de 58.23° y con vía preferencial del Metroplús.

En este escenario, se observa una persistencia en el comportamiento del flujo y la distribución de concentración de material particulado, similar al escenario 1. Sin embargo, se destacan variaciones significativas. La concentración de PM_{2.5} experimenta una redistribución en el interior del cañón urbano, con una disminución promedio de alrededor de 3.6 µg/m³ en comparación con el escenario 1. Este cambio en la concentración está directamente influenciado por la inserción de una estructura en el centro del cañón urbano.

Esta infraestructura tiene un impacto en la distribución en las secciones cercanas, como se aprecia en las representaciones de la Figura 32 (a) y (d).

En la zona donde se encuentra la estación del Metroplús, se forman dos vórtices en sentido horario, ubicados en lados opuestos de la estación. Este fenómeno resulta en la generación de dos corrientes que dirigen el material particulado hacia diferentes salidas de calle, lo que explica la disminución en la concentración. En la salida del cañón, se observa una configuración similar al escenario 1, con una variación del 2.856% respecto a dicho escenario.

En el plano horizontal, representado en la Figura 32 (e), se observa una concentración más notable en el centro y la entrada del cañón urbano. Se mantiene la presencia de dos vórtices contrarrotantes en el centro del cañón urbano, lo que indica una circulación intensa en esta área. Estos vórtices se generan cuando el viento incide en las edificaciones, creando áreas de alta y baja presión en diferentes partes del cañón (Hang et al., 2018). Estos vórtices giran en direcciones opuestas y generan un patrón de circulación complejo en el interior del cañón urbano (Ding et al., 2019). Esta formación del flujo crea un comportamiento asintótico horizontal que impide que se cree una dispersión adecuada del contaminante.

Asimismo, se aprecia una reducción en el fenómeno de recirculación en la Avenida La Playa con la Av. Oriental, lo que implica una disminución en el flujo de aire estancado en esta zona. Este cambio en los patrones de flujo contribuye a un incremento en la concentración de PM_{2.5} alrededor de la estación del Metroplús, como resultado de la menor dispersión de partículas en la atmósfera.

El comportamiento en las demás secciones transversales se mantiene consistente como puede verse en la Figura 32. Esto destaca que la presencia de esta infraestructura, con dimensiones de 10 metros de ancho y 50 metros de largo, ejerce una influencia notable en la dispersión del PM_{2.5} y en el patrón de flujo en un radio de hasta 65 metros. Esto demuestra que cualquier estructura, condicionada por su geometría, tiene una relevante influencia en la dispersión de contaminantes, especialmente en una escala local o de calle.

En la Figura 33, se aprecia la distribución de la concentración de PM_{2.5} según cada eje o sección. Esta distribución sigue un patrón similar al escenario 1, con la diferencia de que se observa una reducción en la concentración promedio. Además, se nota una mayor concentración de PM_{2.5} más centrada en el núcleo del cañón urbano.

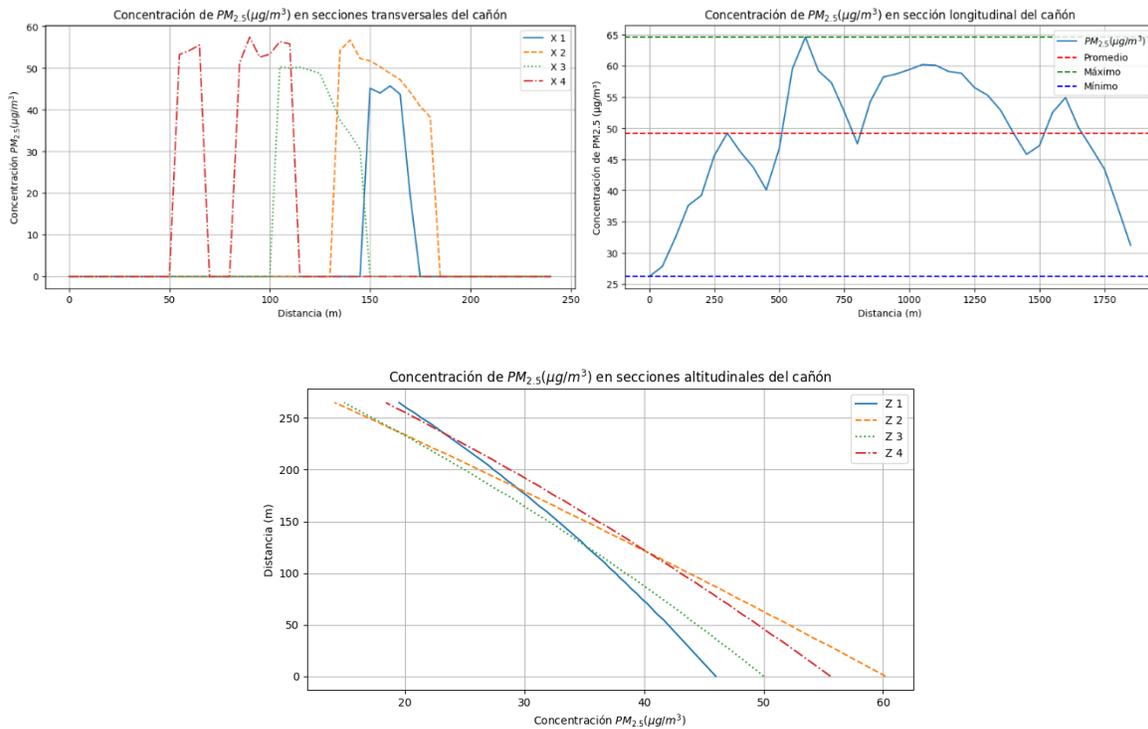


Figura 33. Concentración de PM_{2.5} en el cañón urbano para las secciones transversales (X) y longitudinal (Y) para el escenario 2.

En este escenario, se muestra que, a altitudes superiores a los 200 m, únicamente se registra, en promedio, el 33.6% de la concentración de material particulado con respecto a la superficie. Además, se ha identificado un punto de equilibrio entre los 234-242 m, donde la concentración promedio de PM_{2.5} se sitúa en alrededor de 20 -22 µg/m³.

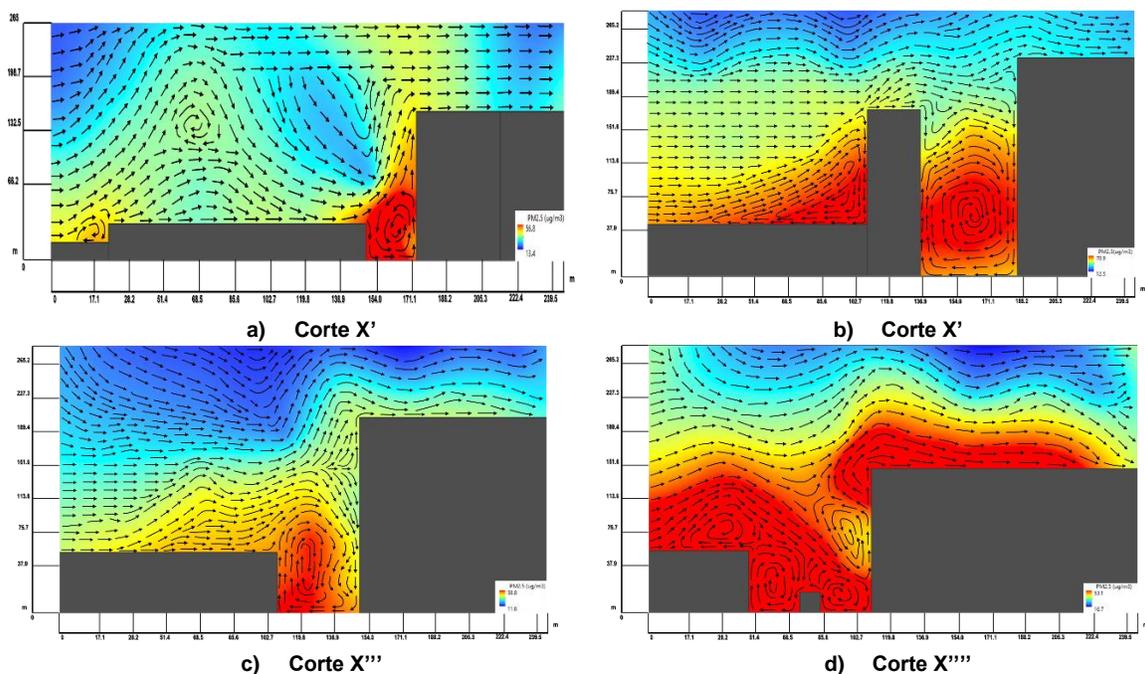
Cuando se introduce la estación del Metroplús en el centro del cañón urbano, se generan interferencias significativas en la dispersión de contaminantes. Estas interferencias se manifiestan en varios aspectos como la redistribución de concentraciones creando zonas de alta concentración en ciertas áreas cercanas a la infraestructura, especialmente en la superficie, mientras que en otras regiones se observa una disminución de la concentración. Estas estructuras propician la formación de vórtices. Estos vórtices pueden afectar la circulación del aire y la dispersión de contaminantes, concentrando o desplazando los contaminantes en direcciones específicas (Li et al., 2021). Además, se observa que esta estructura afecta el flujo y la dispersión de contaminantes en un radio de hasta varias decenas de metros alrededor de la estructura.

4.6.4 Escenario 4: condiciones meteorológicas desfavorables, calidad del aire promedio y morfología urbana actual con vía preferencial del Metroplús

En este escenario, se examinan las condiciones meteorológicas que han sido registradas en las estaciones y caracterizadas como desfavorables. Estas condiciones se traducen en una dirección del viento de 238.23° (G), una velocidad de 0.467 m/s y una concentración de PM_{2.5} de 25.94 µg/m³. En la Figura 34, se observan las diferentes secciones transversales y la distribución del PM_{2.5}. En este caso, se observa que, cuando la velocidad del viento disminuye y su dirección se vuelve perpendicular al cañón urbano, se generan fenómenos atmosféricos que tienen un papel significativo en la concentración de contaminantes.

Es importante destacar que la velocidad del viento influye directamente en la dispersión de contaminantes. De acuerdo con estudios atmosféricos, a velocidades bajas, como la registrada de 0.467 m/s, la capacidad de dispersión disminuye notablemente. Esto se debe a que, a menor velocidad del viento, las partículas tienen una mayor tendencia a permanecer en la atmósfera y a depositarse en el suelo, lo que resulta en una acumulación de contaminantes en el cañón urbano (Hang et al., 2018 & Lim et al., 2022).

Por otro lado, la dirección del viento perpendicular al cañón urbano crea condiciones ideales para la formación de vórtices locales (Bo et al., 2020). Estos vórtices actúan como trampas, confinando la contaminación en el área y dificultando su dispersión vertical y horizontal.



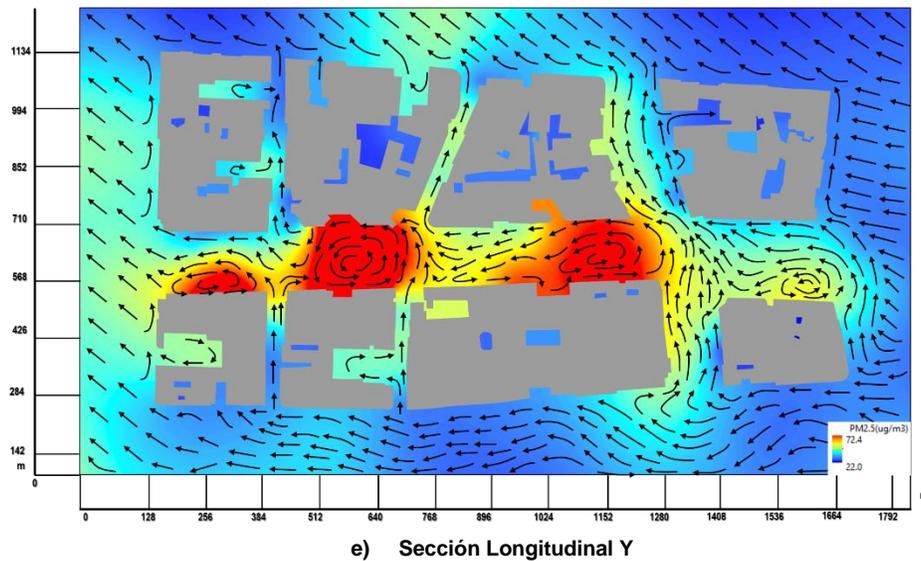


Figura 34. Campo de concentración de PM_{2.5} en el cañón urbano bajo condiciones de 2.0 metros sobre el nivel de la vía, velocidad del viento de 0.467 m/s, temperatura de 22.24°C, dirección del viento de 238.23° y con vía preferencial del Metroplús.

En las secciones transversales de estudio, se evidencian la formación de diferentes vórtices rotantes y contrarrotantes. Cuando el viento incide sobre los obstáculos en el cañón urbano, la velocidad del aire disminuye en el espacio confinado entre los edificios, siguiendo el principio del efecto Venturi. Esto provoca un aumento de la presión en el área, lo que puede dar lugar a la formación de vórtices. Además, en este escenario la dirección del viento es perpendicular al cañón urbano, por lo que el aire que fluye entre los edificios se ve forzado a girar alrededor de un eje vertical, generando vórtices rotantes (Shen et al., 2020). Por otro lado, la dirección del viento cambia repentinamente debido a los choques y giros en direcciones opuestas sobre los paramentos y edificios del cañón dando lugar a vórtices contrarrotantes.

La baja velocidad del viento y una dirección inversa con respecto a la dirección del viento predominante, crea una estabilidad atmosférica, que está relacionada con la tendencia del aire a ascender o descender, generando un impacto en la formación de vórtices. En condiciones de estabilidad atmosférica, es más probable que se formen vórtices debido a la menor mezcla vertical del aire.

En la Figura 35, se aprecia la distribución de la concentración de PM_{2.5} según cada eje o sección. Esta distribución sigue un patrón similar a los escenarios anteriores, con la diferencia de que se observa un incremento en la concentración promedio. Además, se nota una mayor concentración de PM_{2.5} más homogénea en el cañón urbano, diferencia crucial con respecto a los demás escenarios, la cual se distribuía en el centro del cañón urbano.

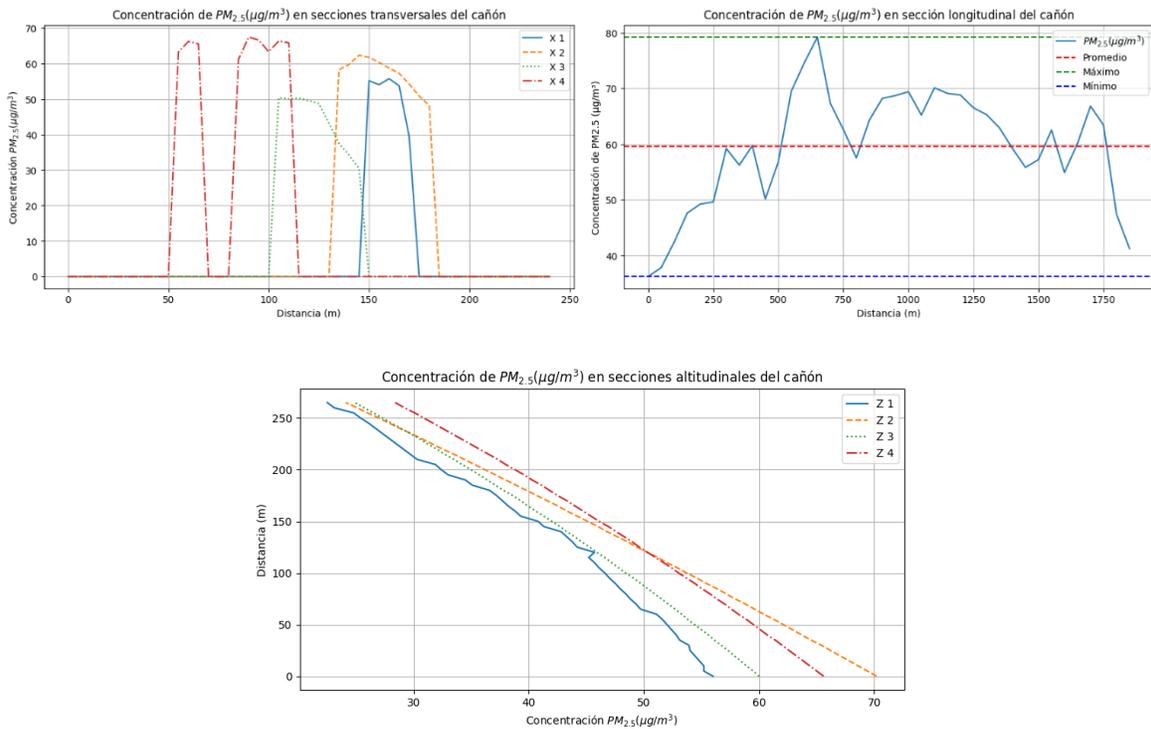


Figura 35. Concentración de PM_{2.5} en el cañón urbano para las secciones transversales (X) y longitudinal (Y) para el escenario 3.

En este escenario, se muestra que, a altitudes inferiores a los 150 m se registra, en promedio, el 73.5% de la concentración de material particulado con respecto a la superficie donde la concentración promedio de PM_{2.5} oscila alrededor de 67 -78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

4.6.5 Análisis de Estabilidad Atmosférica

La Figura 39 presenta la distribución de la estabilidad atmosférica determinada mediante el número de Richardson en distintos escenarios. El número de Richardson es un parámetro crucial en meteorología que indica el equilibrio entre la fuerza de flotación y la resistencia del fluido (en este caso, el aire) a la aceleración. Una alta inestabilidad indica una tendencia a la turbulencia y a la mezcla vertical, mientras que una alta estabilidad sugiere una atmósfera más tranquila y estratificada.

En el escenario 1, se observa una distribución relativamente similar de los diferentes estados de estabilidad atmosférica. Los estados de inestabilidad (muy inestable, inestable y condicionalmente inestable) suman un total del 48.1%, lo que indica una atmósfera propensa a la mezcla vertical y la turbulencia.

En el escenario 2A, se observa una mayor presencia de estados de estabilidad intermedia (condicionalmente inestable y neutral), lo que indica una atmósfera menos propensa a la turbulencia y la mezcla vertical en comparación con el Escenario 1. En el escenario B, se observa un aumento en la inestabilidad, con un 42.3% de la atmósfera clasificada como

muy inestable o inestable. Esto sugiere una mayor tendencia a la turbulencia y a la mezcla vertical en comparación con los escenarios anteriores.

El escenario 3, muestra una mayor presencia de inestabilidad, con un 55.9% de la atmósfera clasificada como muy inestable o Inestable. Esto indica una mayor tendencia a la turbulencia y la mezcla vertical. Por último, en el escenario 4 se observa una alta presencia de estabilidad, con un 54.6% de la atmósfera clasificada como Condicionalmente Estable o Estable. Esto sugiere una atmósfera relativamente tranquila y estratificada.

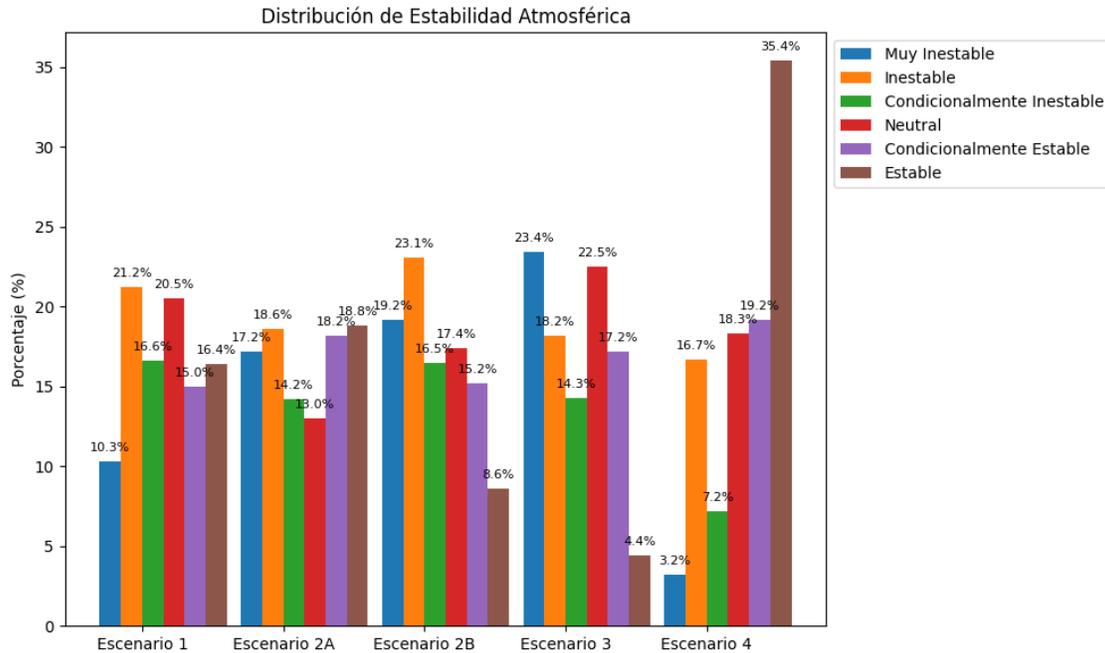


Figura 36. Distribución de la estabilidad atmosférica en el cañón urbano para cada escenario objeto de estudio.

5. Recomendaciones

Los resultados que se presentan en este trabajo de investigación, así como la discusión proveniente del análisis y evaluación del modelo CFD para los diferentes escenarios representan una aproximación al estudio sobre el comportamiento de los contaminantes a escala fina o microescala. La relevancia de este tipo de estudios radica en que es en esta escala en la que las personas realizan actividades en el entorno de ciudad o vecindario, y por lo tanto se requiere un mayor ejercicio de monitoreo y evaluación. Particularmente, el tiempo de permanencia de los habitantes urbanos en estas zonas debería revisarse pues, logra alcanzar el 90% de las actividades diarias, ocasionando altos niveles de exposición a contaminantes como el PM_{2.5}. Este tipo de estudios es novedoso para la región y proporciona elementos para el desarrollo de estudios futuros usando modelos CFD a microescala.

El ejercicio de modelación CFD sobre la distribución de PM_{2.5} en el cañón urbano de la Avenida Oriental en la ciudad de Medellín proporciona resultados reveladores que ofrecen una comprensión detallada de la compleja dinámica atmosférica y la dispersión de contaminantes en un cañón urbano.

Estudios previos sobre la dispersión de contaminantes en cañones urbanos han demostrado que los vórtices formados por la interacción del flujo de aire con las edificaciones pueden llevar a puntos de estancamiento y concentraciones elevadas de contaminantes. Por ejemplo, investigaciones realizadas por Ahmad et al. (2012) y Buccolieri et al. (2011) muestran cómo los vórtices y las corrientes de aire descendentes afectan la dispersión de PM_{2.5}, coincidiendo con nuestros hallazgos que indican la formación de vórtices primarios en sentido horario y corrientes descendentes intensas en el cañón urbano de la Avenida Oriental. Estos estudios también resaltan la influencia de la geometría del cañón, la altura de los edificios y la velocidad del viento en la persistencia y formación de vórtices, lo cual se refleja en nuestros resultados.

La modelación revela la presencia de múltiples vórtices. Estos vórtices se forman debido a la interacción del flujo de aire con los edificios, generando puntos de estancamiento notables. La diferencia de altura entre los edificios contribuye a la persistencia y formación de vórtices, siguiendo patrones específicos. Se identifican corrientes descendentes intensas debajo de los puntos de estancamiento, contribuyendo a la formación de vórtices primarios en sentido horario.

La persistencia de los vórtices y su relación con la relación de aspecto longitud-edificio han sido discutidas en la literatura. Tanto Hang et al. (2012) como Liu et al. (2017) han documentado que a medida que aumenta la relación de aspecto, los vórtices se vuelven más estables y persistentes, lo que se traduce en una menor dispersión de los contaminantes y mayores concentraciones en ciertas áreas del cañón urbano. Este comportamiento se ha observado en nuestro estudio, donde las diferencias de altura entre los edificios contribuyen a la formación de vórtices y puntos de estancamiento, lo que impacta negativamente la calidad del aire.

El uso del modelo CFD en este estudio se justifica dado que proporciona una comprensión detallada de la dispersión de contaminantes a microescala, información que es crítica para evaluar la exposición de la población a PM_{2.5} en entornos urbanos. Aunque la literatura sugiere limitaciones asociadas con la resolución espacial y la necesidad de datos experimentales para validación, como señalan Wang et al. (2018) y Park et al. (2020), los resultados obtenidos aquí son consistentes con estudios previos que utilizan modelos CFD para análisis de calidad del aire en cañones urbanos.

Los resultados respaldan hallazgos previos de que a medida que aumenta la relación de aspecto longitud-edificio, los vórtices en el cañón de la calle se vuelven más persistentes. Esto tiene implicaciones directas en la calidad del aire y en la capacidad de dispersión de contaminantes. El análisis de la concentración de PM_{2.5} en diferentes altitudes muestra un

comportamiento característico de dispersión y dilución de partículas. La influencia de la altitud se correlaciona con estudios previos, destacando la capacidad del viento para dispersar partículas y reducir su concentración a altitudes superiores.

Los resultados de este estudio tienen importantes implicaciones para la planificación urbana y la gestión de la calidad del aire. La comprensión detallada de cómo los vórtices y las corrientes de aire descendentes afectan la dispersión de PM_{2.5} puede informar estrategias de diseño urbano que minimicen la exposición a contaminantes. Estudios futuros podrían enfocarse en mejorar la resolución espacial y en integrar modelos de tráfico dinámico, lo que permitiría una representación más precisa de las emisiones de contaminantes y su dispersión en diferentes condiciones de tráfico y meteorológicas. Además, la validación del modelo con datos experimentales específicos de la región proporcionará una base sólida para mejorar la fiabilidad de las predicciones y optimizar las estrategias de mitigación de la contaminación del aire.

El comportamiento general del contaminante en el cañón urbano de la Avenida Oriental, bajo las condiciones actuales modeladas, se caracteriza por fenómenos complejos de circulación del aire y distribución de partículas PM_{2.5}. Las corrientes descendentes intensas debajo de los puntos de estancamiento contribuyen a la formación de vórtices primarios en sentido horario. Este fenómeno es significativo, ya que las corrientes descendentes pueden influir en la concentración de material particulado y su dispersión en altitudes inferiores. La persistencia de los vórtices y la formación de corrientes descendentes están directamente relacionadas con la relación de aspecto longitud-edificio. A medida que esta relación aumenta, los vórtices se vuelven más persistentes, lo cual tiene implicaciones importantes para la dispersión de contaminantes en el cañón urbano. Se observó una complejidad en la recirculación del aire en la intersección de la Avenida La Playa con la Avenida Oriental. Este proceso contribuyó a la acumulación de material particulado en el cañón urbano y destaca la influencia de las condiciones locales en la distribución de contaminantes.

En el entorno urbano de la Avenida Oriental, las condiciones meteorológicas desfavorables delineadas por una dirección del viento de 238.23° (G), una velocidad de 0.467 m/s y una concentración de PM_{2.5} de 25.94 µg/m³ generan efectos notables tanto a nivel del cañón como en la exposición de la población circundante. Bajo esta configuración atmosférica, la velocidad del viento, registrada en un rango relativamente bajo, inhibe la dispersión eficaz de los contaminantes. El PM_{2.5}, tienden a acumularse en el cañón urbano debido a la falta de fuerzas suficientes para dispersarlas. La dirección del viento contraria a la dirección predominante, por su parte, propicia la formación de vórtices locales, creando áreas donde la contaminación queda atrapada, dificultando su movimiento tanto vertical como horizontal.

Este escenario da lugar a condiciones de estancamiento atmosférico, generando puntos específicos de acumulación de contaminantes. La combinación de vórtices y corrientes descendentes contribuye a la formación de áreas críticas de alta concentración de PM_{2.5}. Los riesgos asociados con la salud pública se intensifican, ya que la inhalación prolongada de partículas finas puede tener efectos perjudiciales en el sistema respiratorio y

cardiovascular. La población del cañón urbano se ve directamente afectada por esta situación, experimentando un aumento en la exposición a niveles elevados de contaminantes atmosféricos. Este escenario representa una preocupación particular para grupos sensibles como niños, ancianos y personas con enfermedades respiratorias preexistentes, quienes enfrentan riesgos mayores frente a condiciones de calidad del aire comprometida.

El uso de simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para estudiar la dispersión de PM_{2.5}, aunque valioso, presenta limitaciones que deben ser consideradas para una interpretación adecuada de los resultados. Una de las limitaciones clave radica en la resolución espacial, ya que las simulaciones a menudo operan con una resolución limitada. Esto implica que fenómenos locales y detallados en entornos urbanos pueden no ser representados con la precisión necesaria. Para superar esta limitación, futuras investigaciones podrían enfocarse en mejorar la resolución espacial a través de técnicas avanzadas de malla adaptativa y el aprovechamiento de capacidades computacionales más potentes.

Otro desafío importante es el modelado de la turbulencia, ya que la precisión en la predicción de la dispersión de contaminantes está directamente influenciada por la representación adecuada de los flujos turbulentos en la atmósfera. Futuros trabajos pueden avanzar en este aspecto mediante la implementación de modelos de turbulencia más sofisticados y validados experimentalmente, lo que contribuiría a una simulación más fiel a la realidad.

Por otro lado, la falta de datos experimentales detallados para validar las simulaciones también representa una limitación significativa. Sin una validación robusta, la confiabilidad de los resultados puede verse comprometida. Para superar este obstáculo, investigaciones futuras pueden enfocarse en la recopilación de datos experimentales específicos para las condiciones del estudio, proporcionando una base sólida para la validación y mejora de las simulaciones.

De los análisis y la discusión realizados se proponen las siguientes recomendaciones para trabajos futuros o para tomadores de decisiones en los temas relacionados con esta investigación:

Estudios futuros pueden realizarse considerando escenarios CFD adicionales a los realizados en este trabajo de investigación con un mayor refinamiento y a través de un modelo multifase en completo estado transitorio. Esto permitirá observar el comportamiento de la fase lagrangiana de las partículas frente a las diferentes condiciones de movimiento, contribuyendo, no solo a mejorar el modelo en cuestión, sino que permitirá conocer a mayor detalle la comprensión del fenómeno y acercarse a un modelo más realista.

Dada la importancia del flujo vehicular en la distribución de contaminantes atmosféricos en entornos urbanos, se recomienda la integración de datos y simulaciones de tráfico en futuros estudios. Esto permitirá una comprensión más completa de la interacción entre el

tráfico, la morfología urbana y la dispersión de contaminantes, lo que puede conducir a estrategias más efectivas de gestión de la calidad del aire.

Para validar y mejorar la precisión de los modelos CFD, se sugiere realizar mediciones en campo para obtener datos reales de concentración de PM_{2.5} en el interior del cañón urbano de la Avenida Oriental de la ciudad de Medellín. Estos datos pueden utilizarse para calibrar y validar los modelos, lo que garantizará una mayor fiabilidad en las predicciones y una mejor comprensión de los patrones de dispersión.

Se recomienda complementar los enfoques numéricos con estudios experimentales de detalle que proporcionen información valiosa sobre la dinámica del flujo y la distribución de contaminantes en situaciones reales. Los estudios experimentales pueden incluir la colocación de sensores de partículas y la realización de mediciones de velocidad y dirección del viento en ubicaciones estratégicas dentro del cañón urbano.

Dado que las vías preferenciales, como el sistema Metroplús, pueden influir significativamente en la distribución de contaminantes, se recomienda investigar cómo estas infraestructuras interactúan con la morfología urbana y afectan la dispersión de contaminantes en el cañón urbano, especialmente, cuando se diseñan sistemas urbanos de transporte masivo en áreas densamente urbanizadas.

Es recomendable considerar la variabilidad en el flujo vehicular a lo largo del día y la semana, así como eventos especiales, esto permitirá una comprensión más completa de la dinámica de tráfico y su impacto en la calidad del aire. Los modelos de tráfico dinámico pueden ser una herramienta útil en este sentido.

Por último, la variación en los patrones de emisión de contaminantes a lo largo del tiempo y en diferentes condiciones de tráfico debe ser considerada en futuros estudios. Esto proporcionaría una visión más precisa de la contribución del tráfico a la concentración de PM_{2.5}.

6. Conclusiones

A partir de la implementación del modelo CFD fue posible, evaluar la distribución, dispersión y concentración del PM_{2.5} en el tramo de cañón urbano de la Avenida Oriental en la ciudad de Medellín, permitiendo analizar los diferentes escenarios y comparar los resultados con lo descrito por los diferentes autores. El desarrollo del trabajo de investigación permitió conocer las siguientes conclusiones:

1. El análisis del ciclo anual y diurno promedio de concentración de PM_{2.5}, velocidad del viento y temperatura en las estaciones estudiadas revela una serie de relaciones significativas. Durante ciertos meses, se observa un aumento en la concentración de PM_{2.5}, coincidiendo con eventos de contingencia ambiental reportados en estudios anteriores. A nivel diurno, se registra un máximo de concentración de PM_{2.5} en la mañana y un mínimo en la tarde, atribuido al ciclo de convección y advección

atmosférica, influido por la temperatura y la velocidad del viento. Además, se evidencia un fenómeno de arrastre de material particulado desde el cañón urbano de La Avenida Oriental hacia el centro de la ciudad debido a la influencia del viento, la geometría urbana y la interacción con las edificaciones, resultando en una mayor acumulación de material particulado en áreas urbanas.

2. En general, el cañón urbano de la Avenida Oriental presenta una configuración con edificios altos en relación con el ancho de la vía, un cañón largo y una proporción entre longitud y altura que indica una mayor extensión horizontal en comparación con la verticalidad de los edificios. Estas características pueden influir en la circulación del aire, la distribución de contaminantes y la calidad del ambiente en el cañón urbano en cuestión. En este sentido, es importante considerar estos aspectos morfométricos al planificar y diseñar entornos urbanos alrededor de la Avenida Oriental, especialmente en relación con la calidad del aire y la salud ambiental. En general, el cañón urbano de la Avenida Oriental, es susceptible a la formación de vórtices contribuyendo a la acumulación de contaminantes, especialmente durante condiciones de estabilidad atmosférica. Esto puede resultar en concentraciones más altas de PM_{2.5} en estas zonas.
3. Al comparar los resultados con la resolución 2254 de 2017, en la que se establece un límite diario promedio de 25 µg/m³ para PM_{2.5}, se encuentra que, las áreas más congestionadas superan el límite establecido por la resolución en cuanto a la concentración de PM_{2.5}. Esto indica una preocupación en términos de calidad del aire y señala la necesidad de implementar medidas para reducir la contaminación.
4. El estudio destaca la necesidad de una planificación urbana estratégica que considere la gestión de la calidad del aire como un elemento central, además de la distribución de patrones arquitectónico en la planificación de densificación urbana y en el control del flujo vehicular. La distribución de espacios urbanos, la ubicación de vías preferenciales y la implementación de medidas de mitigación son factores cruciales para reducir la exposición a la contaminación.
5. La introducción de un sistema de transporte público eficiente, como el sistema Metroplús, demostró ser una estrategia efectiva para reducir la concentración de PM_{2.5}. Se registró una disminución promedio del 10% en la contaminación en las áreas cercanas a las rutas del sistema. La concentración promedio de PM_{2.5} antes de la implementación de Metroplús es de 30 µg/m³ y la concentración promedio de PM_{2.5} después de la implementación de Metroplús es de 27 µg/m³, teniendo un radio de influencia en el interior del cañón de 6.0 m.

7. Bibliografía

1. Alcaldía de Medellín. Distrito de Ciencia, Tecnología e Innovación OpenData (2020).
2. Alcaldía de Medellín. Plan de Ordenamiento Territorial (2014).
3. AMVA. Área Metropolitana del Valle de Aburrá – POECA (2018).
4. Ayturan, Y. A., Ayturan, Z. C., & Altun, H. O. (2018). Air pollution modelling with deep learning: a review. *International Journal of Environmental Pollution and Environmental Modelling*, 1(3), 58-62.
5. Badas, M. G., Salvadori, L., Garau, M., Querzoli, G., & Ferrari, S. (2019). Urban areas parameterisation for CFD simulation and cities air quality analysis.
6. Baldauf, R. W., Isakov, V., Deshmukh, P., Venkatram, A., Yang, B., and Zhang, K. M. (2016). Influence of solid noise barriers on near-road and on-road air quality. *Atmospheric Environment*, 129:265-276.
7. Ballesteros-Gonzalez, K., Sullivan, A. P., and Morales-Betancourt, R. (2020). Estimating the air quality and health impacts of biomass burning in northern south america using a chemical transport model. *Science of The Total Environment*, 739:139755.
8. Beig, G., Sahu, S. K., Singh, V., Tikle, S., Sobhana, S. B., Gargeva, P., Ramakrishna, K., Rathod, A., and Murthy, B. (2020). Objective evaluation of stubble emission of north india and quantifying impact on air quality of delhi. *Science of The Total Environment*, 709:136126.
9. Bo, M., Charvolin-Volta, P., Clerico, M., Nguyen, C. V., Pognant, F., Soulhac, L., and Salizzoni, P. (2020). Urban air quality and meteorology on opposite sides of the alps: The lyon and torino case studies. *Urban Climate*, 34:100698.
10. Brusca, S., Famoso, F., Lanzafame, R., Mauro, S., Messina, M., and Strano, S. (2016). Pm10 dispersion modeling by means of CFD 3d and eulerian-lagrangian models: analysis and comparison with experiments. *Energy Procedia*, 101:329-336.
11. Buccolieri, R., Santiago, J.-L., Rivas, E., and Sánchez, B. (2019). Reprint of: Review on urban tree modelling in CFD simulations: Aerodynamic, deposition and thermal effects. *Urban Forestry & Urban Greening*, 37:56-64.
12. Cai, M., Huang, Y., and Wang, Z. (2020). Dynamic three-dimensional distribution of trac pollutant at urban viaduct with the governance strategy. *Atmospheric Pollution Research*, 11(8):1418-1428.
13. COMSOL Multiphysics Software, <https://www.comsol.com/>
14. Multiphysics, C. O. M. S. O. L. (2014). Comsol Multiphysics Reference Manual: Version 5.5.
15. Duan, J., Chen, Y., Wang, W., Li, J., Zhang, X., Lu, G., ... & Fu, P. (2021). Cable-car measurements of vertical aerosol profiles impacted by mountain-valley breezes in Lushan Mountain, East China. *Science of The Total Environment*, 768, 144198.
16. Ding, S., Huang, Y., Cui, P., Wu, J., Li, M., and Liu, D. (2019). Impact of viaduct on ow reversion and pollutant dispersion in 2d urban street canyon with different roof shapes-numerical simulation and wind tunnel experiment. *Science of The Total Environment*, 671:976-991.

17. Eisenman, T. S., Churkina, G., Jariwala, S. P., Kumar, P., Lovasi, G. S., Pataki, D. E., Weinberger, K. R., and Whitlow, T. H. (2019). Urban trees, air quality, and asthma: An interdisciplinary review. *Landscape and Urban Planning*, 187:47-59.
18. El Colombiano (2019). La Oriental, el trazado que partió en dos el centro de Medellín. <https://www.elcolombiano.com/antioquia/historia-de-la-avenida-oriental-de-medellin-CC11752451>
19. Ferrón Rísquez, J. (2022). Effect of the diurnal heating on urban street canyons: a CFD study (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
20. Ghasemian, M., Amini, S., and Princevac, M. (2017). The influence of roadside solid and vegetation barriers on near-road air quality. *Atmospheric Environment*, 170:108-117.
21. Gonzalez Olivardia, F. G., Zhang, Q., Matsuo, T., Shimadera, H., & Kondo, A. (2019). Analysis of pollutant dispersion in a realistic urban street canyon using coupled CFD and chemical reaction modeling. *Atmosphere*, 10(9), 479.
22. Hagler, G. S., Tang, W., Freeman, M. J., Heist, D. K., Perry, S. G., and Vette, A. F. (2011). Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. *Atmospheric Environment*, 45(15):2522-2530.
23. Hang, J., Lin, M., Wong, D. C., Wang, X., Wang, B., and Buccolieri, R. (2016). On the influence of viaduct and ground heating on pollutant dispersion in 2d street canyons and toward single-sided ventilated buildings. *Atmospheric Pollution Research*, 7(5):817-832.
24. Hang, J., Xian, Z., Wang, D., Mak, C. M., Wang, B., and Fan, Y. (2018). The impacts of viaduct settings and street aspect ratios on personal intake fraction in three-dimensional urban-like geometries. *Building and Environment*, 143:138- 162.
25. Hao, C., Xie, X., Huang, Y., and Huang, Z. (2019). Study on influence of viaduct and noise barriers on the particulate matter dispersion in street canyons by CFD modeling. *Atmospheric Pollution Research*, 10(6):1723-1735.
26. Hassan, A. M., El Mokadem, A. A. F., Megahed, N. A., and Eleinen, O. M. A. (2020a). Improving outdoor air quality based on building morphology: Numerical investigation. *Frontiers of Architectural Research*, 9(2):319-334
27. Hassan, A. M., ELMokadem, A. A., Megahed, N. A., and Eleinen, O. M. A. (2020b). Urban morphology as a passive strategy in promoting outdoor air quality. *Journal of Building Engineering*, 29:101-204.
28. He, L., Hang, J., Wang, X., Lin, B., Li, X., and Lan, G. (2017). Numerical investigations of low and passive pollutant exposure in high-rise deep street canyons with various street aspect ratios and viaduct settings. *Science of the Total Environment*, 584:189-206.
29. Herrera Mejía, L. (2015). Caracterización de la capa límite atmosférica en el Valle de Aburrá a partir de la información de sensores remotos y radiosondeos (Doctoral dissertation).
30. Huertas, J. I., & Prato, D. F. (2020). CFD modeling of near-roadway air pollution. *Environmental Modeling & Assessment*, 25(1), 129-145.

31. Issakhov, A. and Omarova, P. (2021). Modeling and analysis of the effects of barrier height on automobiles emission dispersion. *Journal of Cleaner Production*, 296:126450.
32. Jorquera, H., Montoya, L. D., and Rojas, N. Y. (2019). Urban air pollution. In *Urban climates in Latin America*, pages 137-165. Springer.
33. Kadaverugu, R., Sharma, A., Matli, C., & Biniwale, R. (2019). High resolution urban air quality modeling by coupling CFD and mesoscale models: A review. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 55(4), 539-556.
34. Kumar, P., Abhijith, K. V., Rai, A. C., Di Sabatino, S., Pulvirenti, B., Pilla, F., ... & Jylhä, K. (2018, January). Exposure Reduction by Green Vegetation Barriers in Near-Road Environments: The Guildford Iscape Case Study. In *98th American Meteorological Society Annual Meeting*. AMS.
35. Ladino Moreno, E. O., Santos Granados, G. R., & García-Ubaque, C. A. (2018). Simulación numérica CFD de la estructura de control y del sistema de compuertas radiales-represa El Quimbo. *Tecnura*, 22(58), 65-78.
36. Lazzari, S., Perini, K., di Schio, E. R., & Roccotiello, E. (2016, October). Simplified CFD modeling of air pollution reduction by means of greenery in urban canyons. In *Proceedings of the 2016 COMSOL Conference, Munich, Germany* (pp. 12-14).
37. Lauriks, T., Longo, R., Baetens, D., Derudi, M., Parente, A., Bellemans, A., ... & Denys, S. (2021). Application of improved CFD modeling for prediction and mitigation of traffic-related air pollution hotspots in a realistic urban street. *Atmospheric Environment*, 246, 118127.
38. Li, B., Qiu, Z., and Zheng, J. (2021). Impacts of noise barriers on near-viaduct air quality in a city: A case study in xi'an. *Building and Environment*, 196:107751.
39. Li, X.-B., Lu, Q.-C., Lu, S.-J., He, H.-D., Peng, Z.-R., Gao, Y., and Wang, Z.-Y. (2016). The impacts of roadside vegetation barriers on the dispersion of gaseous traffic pollution in urban street canyons. *Urban Forestry & Urban Greening*, 17:80-91.
40. Li, Z., Ming, T., Liu, S., Peng, C., de Richter, R., Li, W., Zhang, H., and Wen, C.-Y. (2020). Review on pollutant dispersion in urban areas-part a: Effects of mechanical factors and urban morphology. *Building and Environment*, page 107534.
41. Lim, H. D., Hertwig, D., Grylls, T., Gough, H., Reeuwijk, M. V., Grimmond, S., & Vanderwel, C. (2022). Pollutant dispersion by tall buildings: Laboratory experiments and Large-Eddy Simulation. *Experiments in Fluids*, 63(6), 1-20.
42. Lv, Y., Chen, X., Wei, S., Zhu, R., Wang, B., Chen, B., Kong, M., and Zhang, J. J. (2020). Sources, concentrations, and transport models of ultrafine particles nearhighways: a literature review. *Building and Environment*, page 107-325.
43. Londoño-Ciro, L. A., Cañón-Barriga, J. E., & Giraldo-Ocampo, J. D. (2017). Modelo de proximidad espacial para definir sitios de muestreo en redes urbanas de calidad de aire. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 35(1), 112-122.
44. Maroufpoor, S., Bozorg-Haddad, O., & Chu, X. (2020). Geostatistics: principles and methods. In *Handbook of Probabilistic Models* (pp. 229-242). Butterworth-Heinemann.

45. Marulanda Tobón, A., Moncho-Esteve, I. J., Martínez-Corral, J., & Palau-Salvador, G. (2020). Dispersion of co using computational fluid dynamics in a real urban canyon in the city center of valencia (spain). *Atmosphere*, 11(7), 693.
46. Ming, T., Shi, T., Han, H., Liu, S., Wu, Y., Li, W., and Peng, C. (2021). Assessment of pollutant dispersion in urban street canyons based on field synergy theory. *Atmospheric Pollution Research*, 12(2):341-356.
47. Niu, H., Wang, B., Liu, B., Liu, Y., Liu, J., & Wang, Z. (2018). Numerical simulations of the effect of building configurations and wind direction on fine particulate matters dispersion in a street canyon. *Environmental Fluid Mechanics*, 18, 829-847.
48. Ouyang, X., Wei, X., Li, Y., Wang, X.-C., and Klemefs, J. J. (2021). Impacts of urban land morphology on pm_{2.5} concentration in the urban agglomerations of china. *Journal of Environmental Management*, 283:112000.
49. Pantusheva, M., Mitkov, R., Hristov, P. O., & Petrova-Antonova, D. (2022). Air Pollution Dispersion Modelling in Urban Environment Using CFD: A Systematic Review. *Atmosphere*, 13(10), 1640.
50. Park, S. J., Kim, J. J., Choi, W., Kim, E. R., Song, C. K., & Pardyjak, E. R. (2020). Flow characteristics around step-up street canyons with various building aspect ratios. *Boundary-Layer Meteorology*, 174, 411-431.
51. Rafael, S., Correia, L. P., Lopes, D., Bandeira, J., Coelho, M. C., Andrade, M., ... & Miranda, A. I. (2020). Autonomous vehicles opportunities for cities air quality. *Science of the Total Environment*, 712, 136546.
52. Reiminger, N., Jurado, X., Vazquez, J., Wemmert, C., Blond, N., Dufresne, M., and Wertel, J. (2020). Effects of wind speed and atmospheric stability on the air pollution reduction rate induced by noise barriers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 200:104160.
53. San José, R., & Perez-Camanyo, J. L. (2022). Modelling effects of type of trees on urban air pollution with a computational fluid dynamics model. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 7(3), 381-389.
54. Santiago, J.-L., Buccolieri, R., Rivas, E., Calvete-Sogo, H., Sanchez, B., Martilli, A., Alonso, R., Elustondo, D., Santamaría, J. M., and Martin, F. (2019). CFD modelling of vegetation barrier effects on the reduction of traffic-related pollutant concentration in an avenue of pamplona, spain. *Sustainable Cities and Society*, 48:101559.
55. Sendra, S., García-Navas, J. L., Romero-Díaz, P., and Lloret, J. (2019). Collaborative lora-based sensor network for pollution monitoring in smart cities. In *2019 Fourth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)*, pages 318-323. IEEE.
56. Shen, R., Jiao, Z., Parker, T., Sun, Y., and Wang, Q. (2020). Recent application of computational fluid dynamics (CFD) in process safety and loss prevention: A review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, page 104252.
57. Sin, C. H., Cui, P. Y., Luo, Y., Jon, K. S., & Huang, Y. D. (2022). CFD modeling on the canyon ventilation and pollutant exposure in asymmetric street canyons with continuity/discontinuity balconies. *Atmospheric Pollution Research*, 101641.

58. Sofowote, U., Healy, R., Su, Y., Debosz, J., Noble, M., Munoz, A., Jeong, C.-H., Wang, J., Hilker, N., Evans, G., et al. (2021). Sources, variability and parameterizations of intra-city factors obtained from dispersion-normalized multi-time resolution factor analyses of PM_{2.5} in an urban environment. *Science of The Total Environment*, 761:143225.
59. Steffens, J. T., Heist, D. K., Perry, S. G., and Zhang, K. M. (2013). Modeling the effects of a solid barrier on pollutant dispersion under various atmospheric stability conditions. *Atmospheric Environment*, 69:76-85.
60. Taleghani, M., Clark, A., Swan, W., and Mohegh, A. (2020). Air pollution in a microclimate; the impact of different green barriers on the dispersion. *Science of the Total Environment*, 711:134649.
61. Thogmartin, W. E., Wiederholt, R., Oberhauser, K., Drum, R. G., Diendorfer, J. E., Altizer, S., Taylor, O. R., Pleasants, J., Semmens, D., Semmens, B., et al. (2017). Air quality in america meteorological forecasting. *Royal Society open science*, 4(9):170760.
62. Vardoulakis, S., Fisher, B. E., Pericleous, K., & Gonzalez-Flesca, N. (2003). Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric environment*, 37(2), 155-182.
63. Wang, S. and Wang, X. (2021). Modeling and analysis of highway emission dispersion due to noise barrier and automobile wake effects. *Atmospheric Pollution Research*, 12(1):67-75.
64. Wang, Y., Zhou, Y., Zuo, J., & Rameezdeen, R. (2018). A computational fluid dynamic (CFD) simulation of PM₁₀ dispersion caused by rail transit construction activity: a real urban street canyon model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(3), 482.
65. Woo, M., Nishida, R. T., Schrie, M. A., Stettler, M. E., and Boies, A. M. (2021). Open-source modelling of aerosol dynamics and computational fluid dynamics: Nodal method for nucleation, coagulation, and surface growth. *Computer physics communications*, 261:107765.
66. Ysebaert, T., Koch, K., Samson, R., and Denys, S. (2021). Green walls for mitigating urban particulate matter pollution-a review. *Urban Forestry & Urban Greening*, page 127014.
67. Zhi, H., Qiu, Z., Wang, W., Wang, G., Hao, Y., and Liu, Y. (2020). The influence of a viaduct on pm dispersion in a typical street: field experiment and numerical simulations. *Atmospheric Pollution Research*, 11(4):815-824.
68. Zhou, S. and Lin, R. (2019). Spatial-temporal heterogeneity of air pollution: The relationship between built environment and on-road PM_{2.5} at micro scale. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 76:305-322.