



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Implementación y validación de un modelo CFD para simular la dispersión de material particulado PM_{2.5} al interior de buses de transporte público

Fredy Alejandro Guevara Luna

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Bogotá D.C., Colombia

2018

Implementación y validación de un modelo CFD para simular la dispersión de material particulado PM_{2.5} al interior de buses de transporte público

Fredy Alejandro Guevara Luna

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Ambiental

Director (a):

Ph.D. Luis Carlos Belalcázar Cerón

Línea de Investigación:

Modelación de la Calidad del Aire

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Calidad del Aire GICA

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental

Bogotá D.C., Colombia

2018

“Sabemos muy poco, y sin embargo es sorprendente que sepamos tanto, y es todavía más sorprendente que tan poco conocimiento nos dé tanto poder.”

-Bertrand Russell-

Agradecimientos

La realización de este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo y asesoría de la compañía de ingeniería Smart & Simple Engineering S.A.S, al haber brindado la asesoría técnica y el soporte que requería el proyecto. Debo un agradecimiento muy especial al Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá por haber adquirido la licencia de Ansys®, la herramienta principal para llevar a cabo este proyecto. Agradezco al Laboratorio de Calidad del Aire de la Universidad de Los Andes, principalmente al profesor Ricardo Morales y los ingenieros Catalina Pinto y Juan Felipe Méndez, y también a la profesora Lina Chacón de la Universidad Sergio Arboleda por brindar los equipos requeridos para realizar la campaña de medición, recurso primordial para el desarrollo de este proyecto.

Agradezco también a muchos de mis compañeros, colegas, familiares y amigos, quienes estuvieron presentes durante la realización de este proyecto. Dentro de estos, debo especialmente agradecer al ingeniero Willian Quintero, con quien hemos tenido largas discusiones respecto al desarrollo de la maestría y me ha ayudado a despejar muchas interrogantes sobre cómo moldear y llevar a cabo este trabajo. Agradezco al ingeniero Juan David Reyes, por su conocimiento, experiencia y apoyo en la realización de, no sólo este trabajo, sino de toda la maestría. A mi director Luis Carlos Belalcázar, a quien le debo agradecer por hacerme recuperar el interés y pasión por los temas ambientales, tanto, así como para hacer mi maestría en Ingeniería Ambiental, y quien con su paciencia incansable me ha guiado a lo largo de este proceso de realización de este trabajo, aportando con su amplio conocimiento técnico y calidad humana.

Quiero agradecer a una persona en especial, quien me ha acompañado a lo largo de mi vida, aportándome en conocimiento técnico, valores y crecimiento como persona, además de enseñarme todo lo que sabe de CFD y con quien he mantenido las más duras discusiones técnicas y sobre la vida; sin su apoyo incondicional a lo largo de mi pregrado

y maestría, esto no sería posible, mi hermano y colega Marco Andrés Guevara Luna, con quien espero compartir este y muchos más logros y proyectos a venir. También agradezco a todos mis amigos, colegas y compañeros de estudio y trabajo quienes han hecho parte de este proyecto de vida, los cuales han sido parte de mi formación profesional y personal, pero que no podría mencionarlos a todos ya que son demasiados.

También quiero agradecer a mis padres quienes, con su enorme paciencia, consejos de vida y apoyo en todos y cada uno de los días de mi vida (especialmente los más duros), me han impulsado a seguir adelante sin desistir de mis sueños. Debo agradecerles por recogerme en la universidad cuando salía tarde de clase o trabajando en este documento, también porque hablando con ellos he podido esclarecer muchas dudas y probar ideas que ayudaron al desarrollo técnico de este trabajo.

Finalmente agradezco a cualquier persona que se tome el trabajo de leer este documento, al cual le he dedicado casi dos años de mi vida y espero que en él encuentre soluciones, alternativas o ideas que puedan serle útiles para su desarrollo académico y además una motivación para continuar en el desarrollo de la ingeniería con herramientas avanzadas de modelación sin olvidar nunca estar al servicio de la comunidad.

Resumen

La contaminación atmosférica representa una de las grandes problemáticas a enfrentar por la humanidad. Las emisiones de diferentes sustancias contaminantes al aire han afectado la calidad del aire significativamente, principalmente en las grandes zonas urbanas. Estos problemas de calidad del aire hacen que los habitantes se vean expuestos permanentemente a contaminantes que pueden afectar su salud.

Las grandes ciudades requieren la existencia de sistemas de transporte público que puedan soportar la demanda de usuarios que se movilizan a diario. Dependiendo del tipo de sistema de transporte y el combustible que utilice, el transporte público puede ser una fuente importante para las emisiones de contaminantes.

La implementación de sistemas de transporte masivo en ciudades modernas ha sido un aspecto importante en los Planes de Desarrollo de diversas ciudades alrededor del mundo, principalmente en Asia y América Latina. En Bogotá, se implementó el modelo de transporte BRT (Bus Rapid Transit), TransMilenio, a finales del año 2000. Este ha sido uno de los casos más representativos alrededor del mundo.

Un BRT se caracteriza por la existencia de un carril de uso exclusivo de los buses, esto permite al sistema tener la capacidad de realizar largos trayectos en tiempos cortos sin verse afectado por el tráfico vehicular. El modelo BRT ha resultado atractivo en países en vía de desarrollo gracias a sus bajos costos con respecto a un sistema de metro. Sin embargo, en Bogotá se ha encontrado que los usuarios de TransMilenio están expuestos a altos niveles de contaminación. Uno de los principales contaminantes al cual los usuarios del sistema de transporte están expuestos es el material particulado $PM_{2.5}$, el cual está asociado a la quema de diésel, a enfermedades cardiorrespiratorias y cáncer de pulmón.

El Objetivo general del presente trabajo es: Implementar y validar un modelo CFD para simular la dispersión de material particulado $PM_{2.5}$ al interior buses de transporte público. Se utilizó la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) a través del software Ansys

Fluent®. Utilizar este enfoque CFD permite evaluar espacial y temporalmente en detalle el flujo de contaminantes al exterior e interior de buses de transporte público.

El modelo CFD se validó utilizando dos estudios previos. En el primero de ellos se replicó la simulación de un gas trazador al exterior de un bus de transporte escolar, y en el segundo se utilizaron los datos medidos de un gas trazador al interior y exterior del bus. Ambos estudios enfocados a evaluar la auto-contaminación en el bus.

Por otra parte, se realizó una campaña de medición a bordo del sistema BRT de Bogotá para obtener datos y evaluar el modelo CFD del bus articulado. La campaña incluyó registro de GPS y mediciones de Material Particulado $PM_{2.5}$, esto permitió analizar los niveles de $PM_{2.5}$ a los que se exponen de los usuarios del sistema BRT.

La campaña de medición consideró recorridos en 3 troncales de TransMilenio, la Avenida el Dorado se recorrió partiendo desde la estación Las Aguas hasta el Portal el Dorado; la Avenida Calle 80 se recorrió desde el Portal 80 hasta la estación Polo y finalmente, la Avenida Caracas desde la estación Héroes hasta Tercer Milenio.

La evaluación del gas trazador con el modelo CFD se desempeñó adecuadamente y logró reproducir los resultados reportados en la literatura. Para todos los casos evaluados se logró reproducir las tendencias y niveles de concentración de gas trazador en el bus escolar.

El modelo CFD empleado para simular el comportamiento de $PM_{2.5}$ dentro del BRT se desempeñó adecuadamente y reproduce satisfactoriamente los niveles y tendencias de $PM_{2.5}$ medidos. Esto permitió evaluar la dispersión del penacho de emisión y el fenómeno auto-contaminación ocasionada por el bus. En Conjunto con los datos medidos, se logró establecer la exposición de los usuarios a altos niveles de $PM_{2.5}$ dentro del bus y las zonas en donde mayor porcentaje de auto-contaminación existe al interior del bus.

Palabras clave: Modelación de la Calidad del Aire, Sistemas de transporte Masivo, Bus de Tránsito Rápido (BRT), Dinámica Computacional de Fluidos (CFD), Material Particulado ($PM_{2.5}$), Salud pública, Exposición Personal.

Abstract

Air pollution is one of the greatest drawbacks that humanity must overcome. The emissions of different pollutant substances into the air has affected significantly the air quality, mainly in the great urban areas. Deficient air quality makes the habitants to be exposed permanently to pollutants that can affect their health.

Great cities require the existence of public transport systems capable to handle the demand of daily users. Depending on the type of transport system and fuel, the public transport can be an important source of pollution.

The implementation of massive transport models in modern cities has been an important aspect in the Development Planning of many cities around the world, mainly in Asia and Latin America. In Bogotá, the Bus Rapid Transit (BRT), TransMilenio, was implemented in 2000. This is one of the most representative cases worldwide.

A BRT transport system is characterized by the existence of an exclusive lane for the buses, this feature allows the system to have the capacity of perform long trajectories in short times without being affected by the vehicle traffic. This public transport model results attractive for developing countries due to its low costs in comparison to metro or subway systems. However, in Bogotá has been found that the users are exposed to high levels of pollution. One of the main pollutants at which the users are exposed is the particulate matter $PM_{2.5}$, a pollutant associated with diesel burn and with cardiovascular diseases and lung cancer.

The general objective of this work is: To implement and validate a CFD model to simulate the dispersion of particulate matter $PM_{2.5}$ at the interior of public transport buses. The Computational Fluid Dynamics (CFD) was used throughout the Ansys Fluent® software. CFD approach allowed to assess the flow of pollutants spatially and temporarily in detail outside and inside the public transport buses.

CFD model was validated using two previous studies. In the first one, the simulation of a tracer gas inside a school bus was replicated, and in the second one, data measured and collected of a tracer gas inside and outside the bus where used. Both studies aimed to assess the self-pollution from the bus.

A measurement campaign was made in the BRT of Bogotá to obtain data and validate the CFD model of the BRT. The campaign included GPS, speed and $PM_{2.5}$ concentration measurements. Collected data allowed to analyze the level of pollutant at which the users are exposed in the BRT system.

The measurement campaign considered travels made in 3 main segments of TransMilenio system, the 26th Street Segment where the trajectory went from the station Las Aguas to the Portal El Dorado; the 80th Street where the travel went from Portal 80 to Polo station; and finally the Caracas Avenue from the Héroes Station to the Tercer Milenio.

The tracer gas assessment with the CFD model had an accurate performance and achieved to reproduce the results reported on the literature. For all cases considered, the tendencies and concentration levels in the scholar bus were reproduced successfully.

The CFD model used to simulate the $PM_{2.5}$ dispersion inside the BRT had an adequate performance and reproduced satisfactorily the levels and tendencies of $PM_{2.5}$ measured. This allowed to assess of the pollutant dispersion plume from the tailpipe and the self-pollution phenomenon in the bus. Alongside with the measured data, the exposure to high pollution levels was detailed established inside the bus.

Keywords: Air Quality Modeling, Massive Transport Systems, Bus of Rapid Transit (BRT), Computational Fluid Dynamics (CFD), Particulate Matter ($PM_{2.5}$), Public Health, Personal Exposure.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Abstract.....	XI
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XVII
Introducción	1
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
1.1 Contaminación Atmosférica y Movilidad	5
1.1.1 Material Particulado.....	7
1.2 Evaluación de la calidad del aire.....	8
1.2.1 Medición fija de la calidad del aire	8
1.2.2 Medición de exposición personal.....	9
1.2.3 Estudios de auto-contaminación con gas trazador.....	9
1.2.4 Modelación de la calidad del aire.....	13
1.3 Dinámica Computacional de Fluidos CFD.....	14
1.3.1 Pre - Procesamiento.....	15
1.3.2 Procesamiento.....	17
1.3.3 Pos-Procesamiento	18
1.4 Sistemas de transporte masivo tipo BRT.....	18
2. METODOLOGIA	20
2.1 Modelación CFD del exterior del bus escolar	20
2.2 Modelación CFD del interior del bus escolar	25
2.3 Campaña de Medición en el bus articulado BRT	25
2.4 Modelación CFD de bus articulado BRT.....	28
3. RESULTADOS.....	33
3.1 Modelación CFD de bus escolar	33
3.1.1 Validación cualitativa del modelo CFD del bus escolar.....	33
3.1.2 Validación cuantitativa del modelo CFD del bus escolar.....	35
3.1.3 Modelación interna del bus escolar.....	38
3.2 Campaña de medición.....	41
3.3 Modelación CFD del bus BRT articulado.....	43
3.3.1 Modelación CFD.....	43
3.3.2 Validación del modelo CFD con la campaña de medición	50

4. Conclusiones y recomendaciones	53
4.1 Conclusiones	53
4.2 Recomendaciones.....	54
A. Anexo: Base de datos recolectados de la campaña de medición.....	57
Bibliografía	59

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Promedio mensual de Material Particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ desde octubre 2013 en Bogotá y límites recomendados por la OMS. Adaptado de [8].....	7
Figura 1-2: Representación gráfica de las 3 posiciones del tubo de escape en el primer estudio previo. Tomado de [6].....	10
Figura 1-3: Contorno de concentración de SF_6 y líneas de corriente de la emisión de gases por el tubo de escape en la posición 1 a 32 km/h. Tomado de [6].....	10
Figura 1-4: Porcentaje de aire en la cabina proveniente del tubo de escape a las diferentes velocidades estudiadas. Tomado de [6].....	11
Figura 1-5: Etapas en un análisis con modelamiento por CFD. Adaptado de [41]	15
Figura 1-6: Figura de la simulación de aerodinámica de un automóvil. La geometría corresponde al modelo 3D del vehículo, la malla son todos los elementos tetraédricos externos al vehículo y el dominio de flujo es todo el campo de flujo exterior al vehículo donde se encuentra la malla. Tomado de https://www.esacorp.com/mfgflyer/car/	17
Figura 1-7: Representación gráfica de los resultados cualitativos de una simulación CFD de la aerodinámica de un auto de carreras prototipo de Le Mans, al lado izquierdo se observan las líneas de corriente que muestran la magnitud de la velocidad, al lado derecho se muestran los contornos de la presión sobre el auto. Tomado de http://theansweris27.com/cfd-on-a-le-mans-prototype/	18
Figura 2-1: Ubicación de las 3 posiciones de tubo de escape evaluadas en el análisis de gas trazador de bus escolar en la geometría desarrollada. Fuente: Elaboración propia. 20	
Figura 2-2: (a) Geometría y (b) dominio de flujo para simulación de casos de bus escolar. Fuente: Elaboración propia.....	21
Figura 2-3: Comparación de la (a) malla tetraédrica a la (b) malla poliédrica optimizada del bus escolar. Fuente: Elaboración propia.....	22

- Figura 2-4:** Puntos tomados para validación de contornos de concentración de gas trazador SF₆ de estudio de referencia con simulaciones de esta investigación. **Fuente:** Elaboración propia 24
- Figura 2-5:** Ubicación Geoespacial de las troncales Avenida El Dorado-Avenida el Dorado en color rojo, Calle 80 en color verde, Av. Caracas en color naranja, del sistema de transporte masivo de Bogotá. **Fuente:** Elaboración propia..... 26
- Figura 2-6:** Ubicación espacial del sensor DustTrak utilizado en la campaña de medición a bordo del bus articulado durante los recorridos realizados. Puntos tomados para comparaciones de datos de PM_{2.5} de la simulación con los medidos en la campaña. **Fuente:** Elaboración propia..... 28
- Figura 2-7:** Geometría del bus articulado del sistema de transporte masivo BRT. **Fuente:** Elaboración propia 29
- Figura 2-8:** (a) Geometría y (b) dominio de flujo para simulación de casos de bus articulado. **Fuente:** Elaboración propia..... 30
- Figura 2-9:** Comparación de la (a) malla tetraédrica a la (b) malla poliédrica optimizada del bus escolar. **Fuente:** Elaboración propia 31
- Figura 3-1:** Muestra de datos de velocidad y tiempo de uno del recorrido realizado por la troncal de la Avenida el Dorado el 18/12/2017. **Fuente:** Resultados de este trabajo 44
- Figura 3-2:** Muestra de datos de velocidad y tiempo de uno del recorrido realizado por la troncal de la Avenida Caracas el 25/05/2018. **Fuente:** Resultados de este trabajo 45
- Figura 3-3:** Muestra de datos de velocidad y tiempo de uno del recorrido realizado por la troncal de la Calle 80 el 30/05/2018. **Fuente:** Resultados de este trabajo 45

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Listado de experimentos realizados en segundo estudio previo. Los seleccionados para analizar en el presente trabajo resaltados. Adaptado de [16].....	12
Tabla 1-2: Criterios de clasificación de modelos de Calidad del Aire. Adaptado de [29].	14
Tabla 1-3: Características Principales de los sistemas BRT. Adaptado de [45].....	19
Tabla 2-1: Valores de estadísticas y parámetros más importantes de las mallas obtenidas para el bus escolar. Fuente: Resultados de este trabajo.....	23
Tabla 2-2: Resumen general de los recorridos realizados a bordo del sistema de transporte masivo por troncal. Fuente: Elaboración propia.....	27
Tabla 2-3: Valores de estadísticas y parámetros más importantes de las mallas obtenidas para el bus articulado. Fuente: Resultados de este trabajo.....	30
Tabla 3-1: Comparación cualitativa de contornos de concentración de gas trazador del estudio previo y del modelo CFD de este estudio sobre la parte trasera del bus escolar. Fuente: Resultados de este trabajo.....	34
Tabla 3-2: Graficas de dispersión de puntos para correlación de contornos de estudio previo y modelo CFD de este trabajo para validación con regresión lineal. Fuente: Resultados de este trabajo.....	36
Tabla 3-3: Parámetros estadísticos de la correlación para la validación del modelo CFD. Fuente: Resultados de este trabajo.....	38
Tabla 3-4: Datos tomados del estudio [16] para la comparación y cálculo del error con el modelo CFD de la concentración de gas trazador al interior del bus escolar Fuente: Resultados de este trabajo.....	39
Tabla 3-5: Contornos de concentración de gas Trazador SF ₆ al interior y exterior del bus a lo largo de la simulación. Fuente: Resultados de este trabajo	40

Tabla 3-6: Resultados del análisis por velocidad y aceleración de la evaluación de PM _{2.5} por condiciones de conducción en las troncales estudiadas Fuente: Resultados de este trabajo	42
Tabla 3-7: Contorno de concentración de material particulado PM _{2.5} de la modelación CFD para las 3 velocidades estudiadas con el interior y exterior del bus. Fuente: Resultados de este trabajo	46
Tabla 3-8: Contorno de concentración de material particulado PM _{2.5} de la modelación CFD para las 3 velocidades estudiadas con el interior del bus en detalle. Fuente: Resultados de este trabajo	48
Tabla 3-9: Resultados del modelo CFD empleando multifase DPM, trayectorias de la fase lagrangiana. Fuente: Resultados de este trabajo	49
Tabla 3-10: Concentración obtenida del modelo CFD para cada una de las velocidades simuladas en las posiciones donde se realizaron las mediciones. Fuente: Resultados de este trabajo	50
Tabla 3-11: Fraccionamiento para cada una de las posiciones para determinar el porcentaje correspondiente a auto-contaminación a 20 km/h. Fuente: Resultados de este trabajo	51
Tabla 3-12: Fraccionamiento para cada una de las posiciones para determinar el porcentaje correspondiente a auto-contaminación a 36 km/h. Fuente: Resultados de este trabajo	51
Tabla 3-13: Fraccionamiento para cada una de las posiciones para determinar el porcentaje correspondiente a auto-contaminación a 60 km/h. Fuente: Resultados de este trabajo	51

Introducción

La contaminación atmosférica es uno de los mayores problemas a los cuales la humanidad debe enfrentarse. Existen una gran variedad de fuentes de contaminación y también de contaminantes que se emiten a la atmósfera [1]. Debido a la afectación ocasionada por éstos, la composición normal de la atmósfera se ve alterada y, por lo tanto, el ser humano se ve expuesto a condiciones nocivas para su bienestar. La contaminación atmosférica es considerada una problemática de salud pública, ya que se encuentra relacionada con enfermedades cardiorrespiratorias, particularmente en población sensible, como lo son niños y ancianos [2].

Las fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos pueden ser de tipo fija o móvil. En el caso particular de las fuentes móviles, de interés en este trabajo, se encuentran todos los vehículos que funcionan con motores de combustión interna [3]. Dependiendo del tipo de combustible, los gases y sustancias emitidas por el tubo de escape son diferentes, en el caso de los motores que funcionan con combustible diésel, uno de los contaminantes de mayor impacto sobre la salud humana es el material particulado $PM_{2.5}$.

La contaminación atmosférica puede ser estudiada desde diferentes enfoques, ya que es un fenómeno que se presenta a varias escalas. Por este motivo, se han realizado estudios enfocados en evaluar la exposición personal a contaminantes en ambientes a micro-escala [4]. Uno de los principales focos de interés en estos estudios ha sido evaluar la exposición dentro de los vehículos de transporte urbano.

En un estudio previo se evaluó la dosis y concentración de contaminantes a los que se ven expuestos los habitantes de una ciudad, evaluando diferentes modos de transporte: peatón, ciclista, conductor de automóvil, pasajero de bus urbano y pasajero de BRT. Este estudio concluye que el espacio en el cual una persona se expone más a contaminantes es como pasajero de buses urbanos y BRT, cuyo combustible es diésel [5].

Debido a la alta exposición a contaminantes de los pasajeros de bus, surge la necesidad de evaluar la exposición de los pasajeros a los contaminantes dentro de la cabina del bus de forma detallada. Una de las hipótesis que surgen de las mediciones realizadas en estudios previos, es que existe una fracción de emisiones del tubo de escape de los vehículos que se infiltra al interior de la cabina del mismo, generando un fenómeno conocido como *auto-contaminación* [6].

El crecimiento de las ciudades está relacionado con la búsqueda de alternativas de transporte eficientes que permitan a los habitantes desplazarse rápida y cómodamente, de un lugar a otro. Lo anterior buscando mejorar la calidad de vida de los habitantes de las grandes urbes en los países en vía de desarrollo. En la planeación de las ciudades se busca tener en cuenta la organización sectorizada, para que las zonas comerciales, industriales y residenciales se localicen estratégicamente de acuerdo con los requisitos particulares de cada ciudad. No obstante, el crecimiento descontrolado de las urbes trae consigo el surgimiento de megaciudades donde la congestión vehicular y tiempos de desplazamiento afectan negativamente la calidad de vida de los habitantes y la salud pública de las sociedades[7].

Uno de los casos particulares es la ciudad de Bogotá. Durante los últimos años, se ha observado un incremento en la flota vehicular de la ciudad de Bogotá, tanto de servicio particular como servicio público. Se estima que en el 2017 la flota de vehículos es de tres millones de vehículos de servicio particular, servicio público y motocicletas, esto lleva a una situación insostenible desde el punto de vista de movilidad, calidad del aire y salud pública. [8]

El modelo de transporte masivo BRT se ha implementado en países en vía de desarrollo, como en la India, Brasil y Colombia. El caso particular de la ciudad de Bogotá, en donde la estrategia para mejorar la movilidad fue la implementación de un sistema de transporte masivo tipo Bus de Tránsito Rápido (BRT – Bus Rapid Transit), ha sido implementado por etapas desde el año 2000. Los buses articulados de gran capacidad de pasajeros transitan por carriles exclusivos y el sistema se estructura a través de varias troncales interconectadas a lo largo de la ciudad. En Bogotá este sistema tiene una demanda de alrededor de 2.5 millones de personas al día en todas las troncales, teniendo picos de aproximadamente 260.000 personas entre las 5:00 y 8:00 am y las 4:30 a las 6:30 pm, y con un valle promedio de 110.000 usuarios entre las 9:30 am a las 3:30 pm. [9]

La población urbana está diariamente expuesta a micropartículas suspendidas en el aire; estas partículas se pueden clasificar según su tamaño, menor o igual a 10 micras, menor o igual a 2.5 micras, partículas totales suspendidas o partículas ultra finas. Dependiendo su tamaño y composición química, estas se depositan en diferentes partes del tracto respiratorio llevando a problemas graves de salud, principalmente enfermedades respiratorias [1], [2], [5], [10]–[15]. Lo anterior finalmente lleva a que este factor de riesgo tenga un importante impacto en la salud pública, con los costos que esto implica para la ciudad.

Anteriormente se han realizado estudios para evaluar la exposición a contaminantes, en ambientes externos, utilizando modelación de calidad del aire y mediciones [5], [6], [16], [17]. Sin embargo, han sido pocas las aproximaciones que se han hecho a determinar la concentración de contaminantes en ambientes internos, y en especial al interior de vehículos, ya que estos no son solo puntos de exposición para los receptores, sino también fuentes móviles de emisión, haciendo de su estudio y análisis un problema técnicamente complejo.

El Objetivo general del presente trabajo es: Implementar y validar un modelo CFD para simular la dispersión de material particulado $PM_{2.5}$ al interior de buses de transporte público. Se proponen tres objetivos específicos para llegar a conocer y evaluar el fenómeno de la auto-contaminación ocasionada por las emisiones del tubo de escape en un vehículo de transporte público:

1. Desarrollar la modelación CFD de la dispersión de trazadores de otro estudio realizado en un bus de transporte escolar.
2. Realizar mediciones de material particulado $PM_{2.5}$ a bordo de un bus articulado BRT de transporte público.
3. Implementar y validar un modelo CFD para simular la dispersión de material particulado $PM_{2.5}$ a bordo de un bus articulado BRT de transporte público.

Para responder a esta necesidad en el estudio ambiental de exposición a contaminantes en micro-ambientes internos, se han empleado mediciones directas con diferentes tipos de sensores portátiles [5]. Alternativamente para estudiar esta situación ha surgido la modelación de contaminantes utilizando modelos matemáticos y estadísticos. Tal es el caso del CFD, que puede ser empleado como herramienta para evaluar y conocer la

distribución espacial y temporal de contaminantes, tanto en ambientes internos como externos[18]–[20]. El enfoque de este trabajo es la determinación del $PM_{2.5}$. El CFD ha sido utilizada recientemente para determinar flujos de aire y evaluar sistemas de ventilación en el diseño de buses de transporte público[6], [17], [21].

El modelo CFD desarrollado en esta investigación tiene las siguientes características: estado transitorio en el cual se consideran los fenómenos de transferencia de momentum, calor, dispersión de especies y turbulencia, a través del modelo k-epsilon realizable. El modelo fue validado con dos estudios de trazadores previamente publicados [6], [16], en los cual se realiza la evaluación de la dispersión de un gas trazador, Hexafloruro de Azufre (SF_6) con composición conocida mediante modelación CFD y mediciones en campo. Al implementar el CFD como herramienta de modelación de calidad del aire, se obtuvieron los contornos de concentración de contaminantes, esto permite identificar los sitios críticos con alta concentración de contaminantes, en este caso $PM_{2.5}$.

Este trabajo es un avance significativo en los estudios de evaluación de la exposición a contaminantes en micro-ambientes. El CFD permite describir cuantitativamente y en detalle el fenómeno de auto-contaminación de una fuente móvil, teniendo una representación con baja desviación respecto a datos de mediciones.

1.FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Contaminación Atmosférica y Movilidad

La contaminación atmosférica se puede definir como la alteración en la concentración de partículas sólidas o líquidas y gases en la atmósfera debido a causas no naturales que pueden afectar la salud humana y el bienestar de especies de flora y fauna, alterar la visibilidad, atacar distintos materiales y producir olores nocivos[22], [23].

En Colombia se ha encontrado que existen problemas de contaminación atmosférica a escala local, en las áreas urbanas de Bogotá, Medellín y Bucaramanga, gracias a las redes locales de monitoreo de la calidad del aire [24]. Sin embargo, es importante mencionar que muchas ciudades principales e intermedias, así como regiones rurales en todo el territorio nacional, no cuentan con sistemas de vigilancia de la calidad del aire, por lo cual existe un gran desconocimiento aún en este tema [8], [25]

En la ciudad de Bogotá, se han detectado a través de la RMCAB (Red de Monitoreo de la Calidad del Aire Bogotá), episodios de alta contaminación atmosférica por material particulado y, en general, malos Índices de Calidad del Aire [26]. Dentro de los principales factores que afectan la calidad del aire se encuentran las fuentes móviles, que corresponden a todos los vehículos de motores de combustión interna, automóviles, buses, busetas, camiones, etc. Dicha flota en términos de vehículos particulares, se estima es de 2'182.578 en 2017, y 60.816 de servicio público en el año 2015, de los cuales 2.957 pertenecen al sistema de transporte masivo, incluyendo articulados (1.433), biarticulados (310), alimentadores (952) y padrón dual (262). Lo anterior sumado al crecimiento de la flota de motocicletas, que ha alcanzado 464.634 motocicletas en 2017 [8]

Al considerar el volumen de vehículos, el cual está directamente relacionado con el consumo de combustible, diésel y gasolina, las emisiones provenientes de fuentes móviles

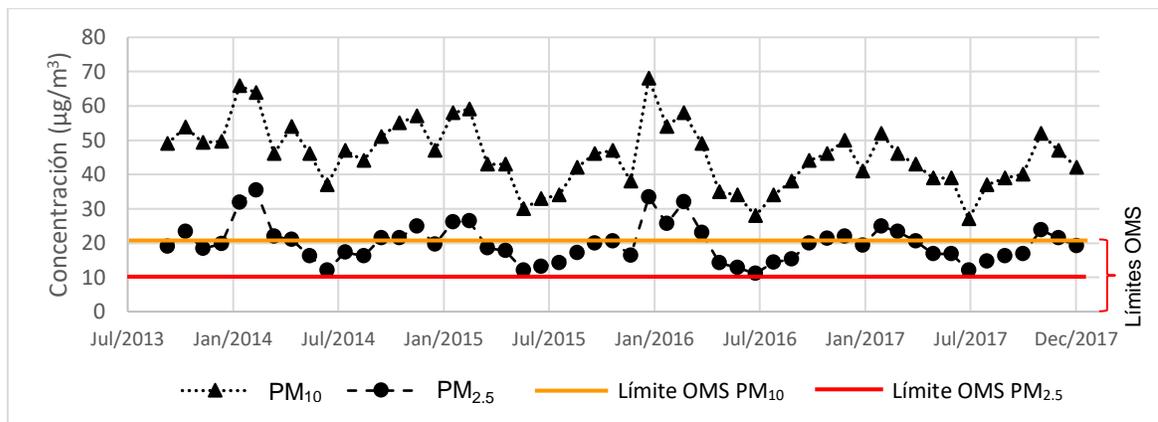
son un factor determinante en el problema de contaminación atmosférica de la ciudad de Bogotá [8], [14], [23], [27]–[29]

Algunos de los productos contaminantes de la quema de combustibles son los Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Óxidos de Azufre (SO_x), Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC - *Volatile Organic Compounds*), Material Particulado PM₁₀ y PM_{2.5} y Carbono Negro (BC - *Black Carbon*). Una de las consideraciones más importantes que se deben tener en cuenta con las fuentes móviles, es que son emisiones contaminantes casi permanentes en la ciudad relacionadas con la variabilidad del tráfico vehicular, presentando picos y valles [27], [30]

Un agravante de los problemas de contaminación atmosférica en las zonas urbanas es su relación con los problemas de salud pública. Se ha demostrado que las altas concentraciones de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} son causa de enfermedades respiratorias, problemas cardiovasculares, desordenes de sueño, asma e incluso cáncer de pulmón [1], [2], [10], [11], [15]. La Organización Mundial de la Salud (OMS) se ha encargado de establecer límites para la concentración de estos contaminantes, sin embargo, la normatividad colombiana, establecida por la Resolución 610 de 2010, se encuentra 30 µg por encima (50 µg/m³) del límite recomendado por la OMS (20 µg/m³) en cuanto a PM₁₀ y por otra parte, el PM_{2.5} se encuentra reglamentado con un valor de 25 µg/m³, el cual está 15 µg por encima del recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (10 µg/m³), con todos los valores dados en promedio anual [14], [31]. La **Figura 1-1** muestra los niveles de concentración de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en la ciudad de Bogotá.

La población se ve permanentemente expuesta a estas concentraciones de contaminantes. Sin embargo, la dosis que recibe cada persona es diferente y única, ya que esta depende de factores particulares de cada uno, por ejemplo, nivel de actividad física, medio de transporte utilizado, frecuencia de respiración, lugar y entorno de trabajo, entre otros [10]

Figura 1-1: Promedio mensual de Material Particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ desde octubre 2013 en Bogotá y límites recomendados por la OMS. Adaptado de [8]



El transporte público es primordial y utilizado por la mayoría de la población de la ciudad, durante el mes de junio de 2018, se movilizaron alrededor de 54'210.000 pasajeros en el sistema BR: TransMilenio. [9]

TransMilenio en Bogotá es un BRT, con troncales en las principales vías de la ciudad y opera con buses articulados, en su mayoría, con motores diésel. Las personas que utilizan el sistema BRT se ven expuestas a altos niveles de contaminación durante sus viajes, normalmente corresponde a tiempos de entre 30 a 180 minutos, con un promedio de 97 minutos [9]. Los buses del sistema corresponden a microambientes que intercambian flujo de contaminantes con el exterior debido a que los buses transitan con las ventanas abiertas.

Esta situación de ventilación e intercambio de material entre el interior del bus y el entorno urbano, sumado a los largos tiempos de viaje, los altos niveles de contaminación atmosférica y altas emisiones de contaminantes de fuentes móviles, resulta en una exposición prolongada a contaminación en los pasajeros del sistema, problemática la cual es objeto de estudio de esta investigación.

1.1.1 Material Particulado

Se denomina material particulado a una mezcla de partículas líquidas y sólidas, de sustancias orgánicas e inorgánicas, que se encuentran en suspensión en el aire. Su composición es muy variada y dichas partículas además producen reacciones químicas en el aire [15], [22], [29]

El material particulado es clasificado en función de su tamaño. En calidad del aire, se habla de Partículas Totales Suspendidas, cuyo tamaño es de hasta 50 μm , material particulado PM₁₀, el cual corresponde a las partículas de tamaño de 10 μm y material particulado PM_{2.5}, el cual corresponde a partículas finas de tamaño 2.5 μm [15], [22], [29]

La combustión de diésel genera aproximadamente un 70% de la fracción de partículas respirables por el humano, las cuales tienen tamaño menor a 10 μm . Las partículas de este tipo se depositan en el tracto respiratorio y pueden ocasionar diversas enfermedades como cáncer, ya que se encuentran compuestas por plomo, sulfatos, hidrocarburos y carbono negro, entre otras sustancias perjudiciales. [8], [10], [16], [29], [30], [32]

1.2 Evaluación de la calidad del aire

Para realizar una evaluación de la calidad del aire, bien sea en tiempo real o por indicadores periódicos, es necesario la realización de mediciones y monitoreos con instrumentos y equipos especializados. La medición directa de contaminantes existentes en el aire es siempre la forma más precisa y exacta para una evaluación del estado de la calidad de este, siempre que los equipos utilizados se encuentren debidamente calibrados y en buen estado.[12], [21]

1.2.1 Medición fija de la calidad del aire

Algunas de las metodologías de monitoreo de calidad del aire, consisten en la realización de medición estáticas o fijas en un sitio determinado, a través de la instalación de sensores para diversos contaminantes, este tipo de medición es normalmente utilizado en las redes de monitoreo de calidad del aire, como la RMCAB. [8]

Este tipo de mediciones tiene un propósito definido, dependiendo de la escala a la cual son implementados y la función para la cual fueron definidos sus componentes. En el diseño de un Sistema de Vigilancia de calidad del aire, normalmente se busca cumplir con uno o varios de los siguientes objetivos: [24]

- Determinar el cumplimiento de las normas nacionales de calidad del aire
- Evaluar las estrategias de control de las autoridades ambientales
- Observar las tendencias a largo y mediano plazo

-
- Evaluar el riesgo para la salud humana
 - Determinar posibles riesgos para el medio ambiente
 - Activar los procedimientos de control en episodios de contaminación
 - Estudiar fuentes de contaminación e investigar quejas concretas
 - Validar modelos de dispersión de calidad del aire

1.2.2 Medición de exposición personal

Otra metodología utilizada para la determinación de la calidad del aire es la realización de mediciones móviles utilizando sensores portátiles que pueden ser transportados en vehículos o personas, esto permite conocer la concentración de contaminantes de forma espacialmente continua a lo largo de recorridos en zonas de interés. Esta metodología es normalmente utilizada para determinar la exposición a contaminantes en medios de transporte o durante viajes urbanos, y es útil para la realización de mapas de calidad del aire.[5], [6], [16], [33], [34].

En este estudio se realizaron mediciones de la exposición personal con el fin de medir valores reales que puedan validar los modelos CFD simulados. Este tipo de estudios se ha realizado previamente y han arrojado hipótesis o conclusiones respecto a los niveles de exposición a contaminantes en los pasajeros de diversos tipos de transporte. [5], [6], [16], [17], [35].

1.2.3 Estudios de auto-contaminación con gas trazador

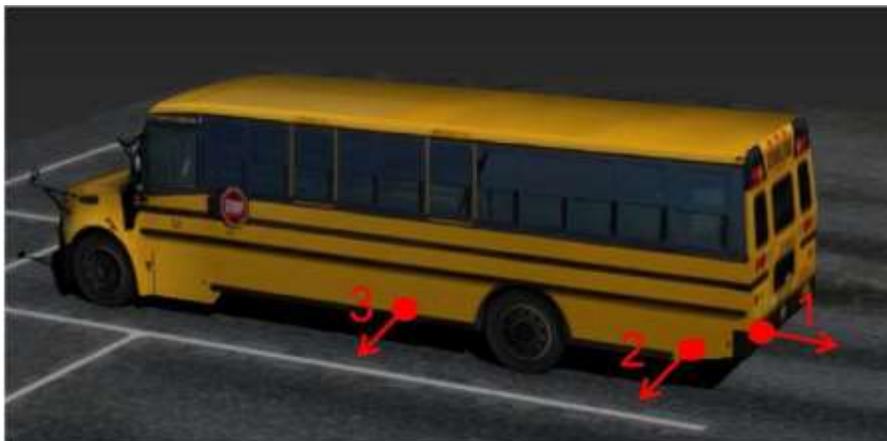
El fenómeno de auto-contaminación es producido cuando los gases del tubo de escape de un vehículo son transportados al interior de él mismo. Una de las maneras de evaluar este fenómeno es utilizando un gas trazador inerte en las emisiones del vehículo, el cual puede ser medido directamente al interior y exterior del bus.[6], [16], [35]

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron como recurso dos estudios previos. Los casos de interés utilizados fueron enfocados a la utilización de Hexafluoruro de Azufre, SF₆, como gas trazador para evaluar la auto-contaminación en buses escolares en Estados Unidos.

El primer estudio previo [6], utilizó el método de gas trazador y CFD acoplados, para determinar las concentraciones del gas en la superficie exterior del bus y luego, con un

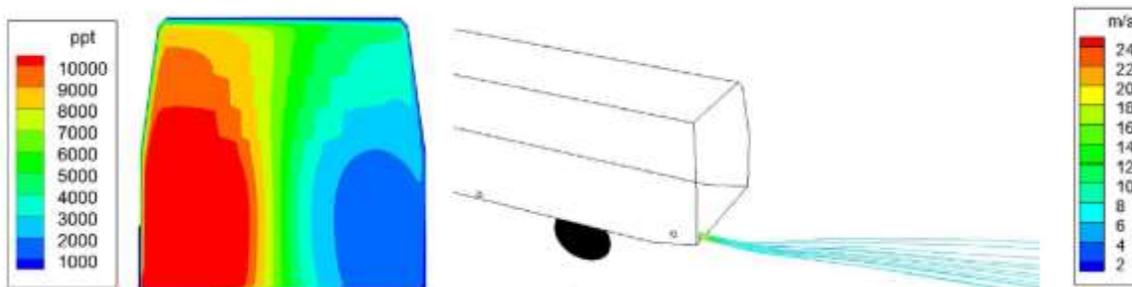
modelo estadístico evaluar la concentración de gas trazador en el interior del bus, es decir, la cantidad de auto-contaminación. En este estudio se utilizaron tres diferentes posiciones del tubo de escape en el bus (**Figura 1-2**). No obstante, no se brindan detalles sobre el modelo CFD empleado, tales como, cantidad de elementos en la malla, calidad de la malla, setup de cálculo ni modelos de energía y turbulencia. En el estudio se reporta que la modelación se hizo para tres velocidades, 32 km/h, 64 km/h y 100 km/h.

Figura 1-2: Representación gráfica de las 3 posiciones del tubo de escape en el primer estudio previo. Tomado de [6]



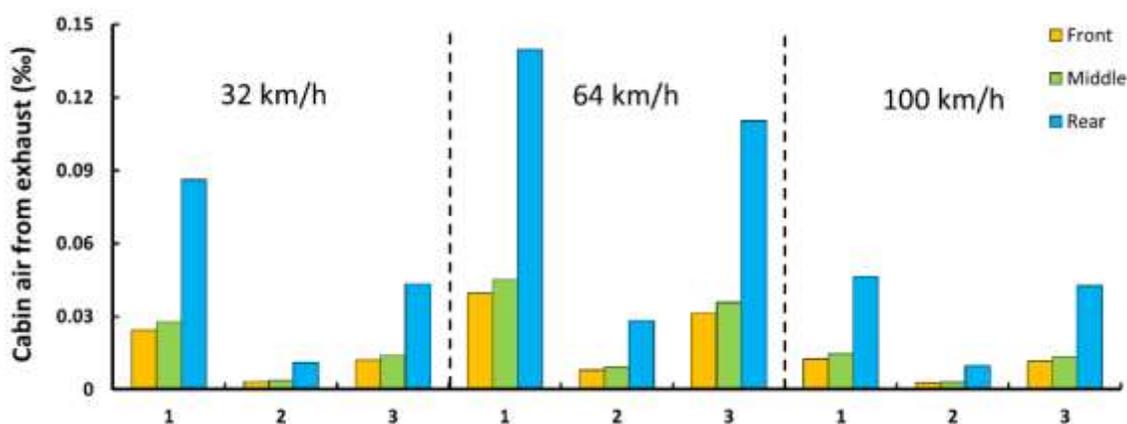
Los autores de este artículo reportaron como resultados únicamente los contornos de concentración de SF_6 sobre la parte trasera del bus, y las líneas de corriente de la emisión del tubo de escape (**Figura 1-3**). Con estos contornos de concentración se realiza la validación cualitativa y cuantitativa del modelo CFD propuesto en esta tesis.

Figura 1-3: Contorno de concentración de SF_6 y líneas de corriente de la emisión de gases por el tubo de escape en la posición 1 a 32 km/h. Tomado de [6]



En este estudio previo se demostró que la velocidad y la posición del tubo de escape son factores determinantes en la dispersión de contaminantes emitidos por el tubo de escape del bus y en la cantidad de auto-contaminación al interior del bus. Se determinó que la posición en la que menos auto-contaminación se presenta es en la posición 2. La **Figura 1-4** muestra el porcentaje de aire que proviene del tubo de escape dentro de la cabina del bus para las 3 velocidades estudiadas en las partes delantera, media y trasera del interior del bus. En todos los casos se puede observar que la mayor cantidad de auto-contaminación es la parte trasera del bus.

Figura 1-4: Porcentaje de aire en la cabina proveniente del tubo de escape a las diferentes velocidades estudiadas. Tomado de [6]



En el segundo estudio previo [16] se realiza la medición directa del gas trazador, SF_6 , dentro de la cabina del bus escolar y en el exterior. Se utilizaron buses con motores de diferente cilindraje, con las ventanas abiertas y cerradas, en la mañana y en la tarde, concentraciones diferentes de trazador y flujo de gases de escape. Se seleccionaron los casos que tuvieran las condiciones similares a las del primer estudio previo. Se inyectó el gas trazador en el tubo escape del bus y se midió en la cabina del bus en la parte delantera y trasera utilizando un AeroVironment CTA-1000. De este estudio se obtuvo la concentración promedio de SF_6 al interior de la cabina del bus, lo cual permite determinar la cantidad de gases que provienen del tubo de escape que entran en la cabina del bus. En la **Tabla 1-1** se listan todos los experimentos realizados en el segundo estudio previo y los seleccionados para analizar en el presente trabajo.

Tabla 1-1: Listado de experimentos realizados en segundo estudio previo. Los seleccionados para analizar en el presente trabajo resaltados. Adaptado de [16]

Tipo de Bus	Cilindraje (l)	Ciclos	Velocidad de Flujo de tubo de escape (lpm)	SF ₆ en el cilindro (ppm)	Número de Corrida	Posición de Ventanas (Mañana AM o Tarde PM)	Concentración promedio de SF ₆ en el exterior (ppm)	Concentración promedio de SF ₆ en la cabina (ppt)	Aire en la cabina proveniente de tubo de escape (%)
HE2	6	2	13500	5000	5	Cerrado (AM)	0,7	922	0,13
	6	2	13500	5000	6	Abierto (PM)	1,63	620	0,04
HE3	6	2	13500	5000	8	Cerrado (AM)	0,41	1184	0,29
	6	2	13500	5000	10	Abierto (PM)	0,41	439	0,11
RE1	8,3	4	9338	5000	15	Abierto (PM)	2,95	966	0,03
RE2	6,6	4	7425	10020	17	Cerrado (AM)	5,13	1026	0,02
	6,6	4	7425	10020	18	Abierto (PM)	5,26	304	0,01
	6,6	4	74205	10020	19	Cerrado (AM)	5,26	815	0,02
	6,6	4	7425	10020	20	Abierto (PM)	5,26	868	0,02
	6,6	4	7425	10020	23	Cerrado (AM)	5,26	997	0,02
	6,6	4	7425	10020	24	Abierto (PM)	5,26	741	0,01
	6,6	4	7425	10020	25	Cerrado (AM)	3,64	1134	0,03
TO1	8,3	4	9338	10020	28	Cerrado (AM)	2,15	827	0,04
	8,3	4	9338	10020	30	Abierto (PM)	4,61	848	0,02
	8,3	4	9338	10020	31	Cerrado (AM)	2,45	801	0,03
	8,3	4	9338	10020	33	Abierto (PM)	4,15	519	0,02
CNG	8,1	4	9113	10020	35	Cerrado (AM)	3,19	1164	0,04
	8,1	4	9113	10020	36	Abierto (PM)	3,19	807	0,03

En ambos estudios se concluye que existe un fenómeno de auto-contaminación ocasionada por la emisión de gases en el tubo de escape, lo cual puede llevar a una exposición permanente a contaminantes altamente tóxicos para la salud, como lo son los Compuestos Volátiles Orgánicos, combustible no quemado, y material particulado entre otros, a los pasajeros. Por lo cual, en el presente trabajo se busca verificar este hecho y determinar la fracción correspondiente a auto-contaminación para el contaminante Material Particulado $PM_{2.5}$ en buses articulados BRT.

1.2.4 Modelación de la calidad del aire

La modelación de la calidad del aire es un conjunto de herramientas matemáticas y computacionales que han tomado importancia durante los últimos años para la toma de decisiones de carácter regulatorio. La modelación busca dar respuesta a las siguientes necesidades:

- Identificar áreas de mayor impacto ambiental
- Identificar y evaluar la efectividad de las políticas de control de la contaminación
- Selección de los sitios más adecuados para ubicar estaciones de monitoreo de calidad del aire
- Predecir fenómenos meteorológicos y episodios de contaminación
- Identificar fuentes de emisión
- Determinación de factores de emisión

Los avances en tecnologías de medición y en computación han permitido el desarrollo de modelos matemáticos y computacionales más complejos que ayudan a comprender los fenómenos atmosféricos y la calidad del aire. [19], [20], [36], [37]

La dinámica atmosférica, la dispersión de contaminantes y los fenómenos de transporte se describen por medio de ecuaciones matemáticas, estas ecuaciones se distinguen por no tener, en la mayoría de los casos, soluciones analíticas, por lo tanto, se requiere de métodos numéricos para su resolución. [19], [36]

Los modelos de calidad del aire son aproximaciones numéricas que describen la dinámica atmosférica y pueden ser clasificados bajo varios criterios. La **Tabla 1-2** muestra algunos de los criterios de clasificación más comunes para los tipos de modelos de calidad del aire

Tabla 1-2: Criterios de clasificación de modelos de Calidad del Aire. Adaptado de [29]

Criterio	Ejemplo
Relación fuente – receptor	Orientado a la fuente (puntual, móvil) Orientado al receptor
Estructura básica del modelo	Determinístico o No determinístico Estado Estable o Estado estacionario
Marco de referencia	Euleriano o Lagrangiano
Dimensionalidad del dominio computacional	Una, dos, tres o multidimensional
Escala	Micro escala (1m, seg, min) Sinóptica pequeña (100 km, hora, día) Meso escala (5-10 km, hora) Sinóptica amplia (100 – 1000 km, días) Planetaria (>1000 km, semanas)
Estructura del modelo	Numérica, Estadística, Física
Nivel de sofisticación	Nivel 1 (Modelos screening) Nivel 2 (Modelos refinados)

En la realización de este trabajo se emplea el modelo de simulación numérica conocido como Dinámica Computacional de Fluidos (CFD). En estos modelos se resuelve numéricamente las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos, son considerados los más exactos y su mayor desventaja es que requieren de gran capacidad de cómputo y no apropiados para modelar a distancias mayores de 1 km.

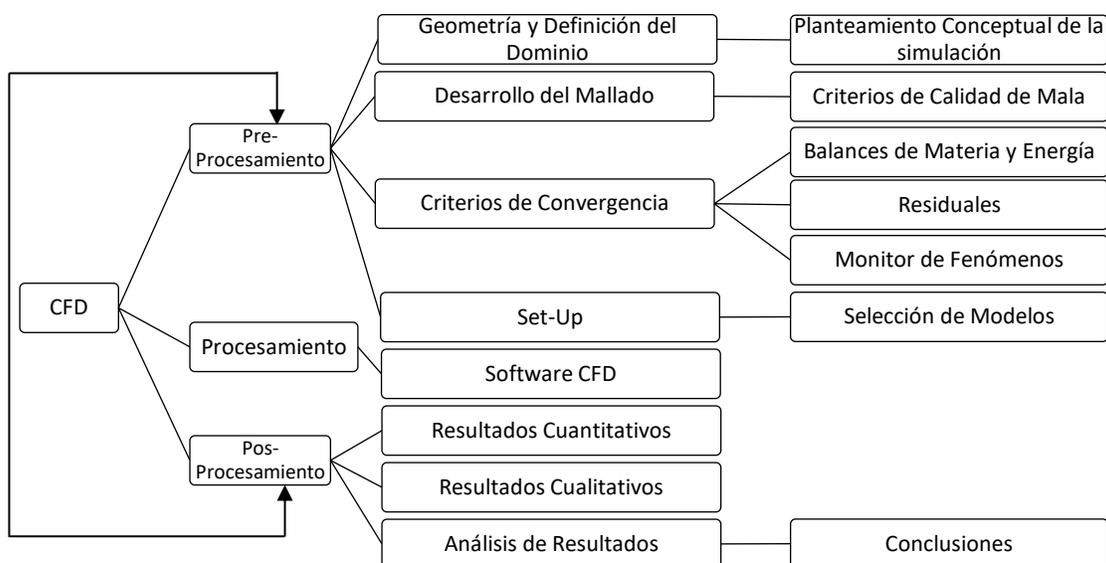
1.3 Dinámica Computacional de Fluidos CFD

La dinámica computacional de fluidos surge como la herramienta para resolver los problemas de flujo de fluidos, en los cuales, como base para la solución, se toman las ecuaciones de Navier-Stokes, permitiendo resolverlos en forma detallada. Este enfoque permite conocer el comportamiento complejo de los fluidos en situaciones y sistemas reales. [38], [39]

Sin embargo, debido a la complejidad del sistema de ecuaciones diferenciales parciales que describen los fenómenos de transporte, se requiere el uso de herramientas computacionales de gran capacidad para dar una solución a través de métodos numéricos al problema de flujo, este tipo de solución se conoce como CFD. [21], [38], [40]

Un modelamiento CFD comprende 3 etapas principales: pre - procesamiento, procesamiento y pos - procesamiento. Estas etapas conforman una estructura iterativa para llevar a cabo el modelamiento con CFD, la **Figura 1-5** muestra los subprocesos inherentes a cada una de las etapas y su propia interacción:

Figura 1-5: Etapas en un análisis con modelamiento por CFD. Adaptado de [41]



Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el flujo de fluidos teniendo en cuenta los efectos difusos y convectivos de transferencia de calor.

1.3.1 Pre - Procesamiento

El pre procesamiento es la etapa en la cual se definen los aspectos y parámetros más importantes de la simulación, es importante la fijación de los objetivos para los cuales se realiza la simulación, lo cual permitirá enfocarla adecuadamente y obtener resultados, y conclusiones pertinentes. Se debe definir en esta etapa entonces, los objetivos de la simulación, criterios de convergencia y otros aspectos requeridos para la modelación.[41]–[43]

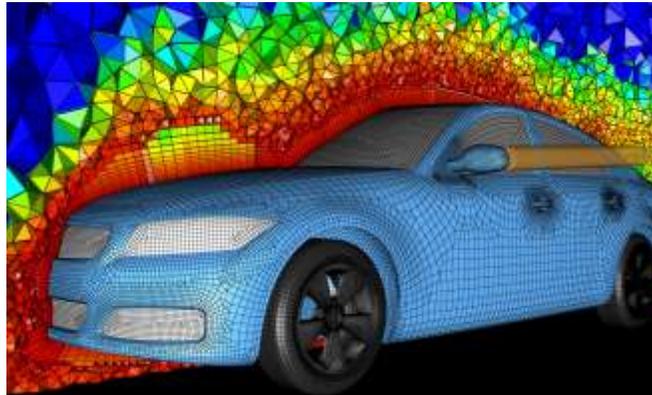
- Creación de la geometría: La elaboración de la geometría es el primer paso importante en la modelación CFD. La geometría es normalmente un modelo 3D de lo que se busca simular, bien sea un equipo industrial, una calle con edificios o una red de tubería. Es importante considerar la eliminación de detalles innecesarios en la geometría, lo cual

podría conducir a un requerimiento excesivo de recursos computacionales para la simulación, estos detalles pueden ser tornillos, agujeros muy pequeños, labrados en el material, entre otros. La **Figura 1-6** muestra la geometría de un automóvil azul con detalles, como se observa en la parte de la llanta delantera los detalles internos de la suspensión y parte del motor no son incluidos en la geometría ya que son irrelevantes para la aerodinámica del auto. [38], [41]–[44]

- Extracción del dominio de flujo: El dominio puede definirse como el volumen de flujo correspondiente de la geometría, el área por la cual el fluido se mueve. El dominio puede ser único o un sistema de subdominios que se encuentren acoplados, la definición de este depende del mismo carácter de la simulación y el tamaño del dominio. Por ejemplo, cuando un dominio es de tamaño grande y presenta simetría, se puede dividir el dominio con un eje de simetría, lo cual reduce a la mitad la geometría original de simulación, sin embargo, se deben tener en cuenta excepciones para este tipo de reducciones, el comportamiento turbulento o laminar del flujo es un aspecto importante a tener en cuenta. Un ejemplo de un sistema real con subsistemas puede ser una piscina de sedimentación de lodos, el cual se puede analizar compuesto de 3 subsistemas, el agua de la piscina con sedimentos, las tuberías de desagüe que pueden ser analizadas por erosión y el aire circundante que se ve afectado por malos olores. La **Figura 1-6** muestra al mismo tiempo el dominio de flujo y malla; el dominio de flujo corresponde en este caso a todo el campo de flujo de aire al exterior del vehículo. [38], [41]–[44]
- Mallado: El proceso de mallado es clave en el modelamiento CFD. Debido al enfoque numérico de resolución de las ecuaciones de Navier Stokes en volúmenes finitos, el dominio de flujo debe ser discretizado en pequeños volúmenes que conforman una malla tridimensional, a este proceso de discretización se le llama mallado. Este proceso es de gran importancia, ya que las ecuaciones diferenciales a ser resueltas numéricamente, se calcula su solución en cada uno de los elementos, lo cual quiere decir que un elemento de mala calidad puede afectar la convergencia y precisión de los resultados de la simulación. En la **Figura 1-6** se observan los elementos de la malla en todo el dominio de flujo del sistema, es decir, el campo de flujo del aire exterior del auto. La malla son los elementos de volumen finito, en este caso de forma tetraédrica, los cuales, al acercarse a la geometría donde puede haber fenómenos de capa límite

y se requiere mayor precisión en el cálculo, se hacen cada vez más finos. [38], [41]–[44]

Figura 1-6: Figura de la simulación de aerodinámica de un automóvil. La geometría corresponde al modelo 3D del vehículo, la malla son todos los elementos tetraédricos externos al vehículo y el dominio de flujo es todo el campo de flujo exterior al vehículo donde se encuentra la malla. Tomado de <https://www.esacorp.com/mfgflyer/car/>



- Criterios de convergencia: Son los indicadores de que la simulación se encuentra convergiendo y determinan si la simulación ha terminado. Estos criterios también sirven para identificar a lo largo del cálculo si hay inestabilidades o se requieren modificaciones a los parámetros de simulación o si es necesario un modelo físico que sea más riguroso, a fin de obtener mejores resultados. Dentro de los criterios de simulación, se encuentran normalmente, mínimo tres, los cuales son las *residuales*, *monitor de fenómenos* y *balance de materia y energía*. [38], [41]–[44]
- Set-up: Es la configuración correspondiente a los detalles conceptuales del modelo CFD. En este se definen los fluidos de trabajo y propiedades, modelos de turbulencia, modelos multifásicos, composiciones de mezclas, entre otros. [38], [41]–[44]

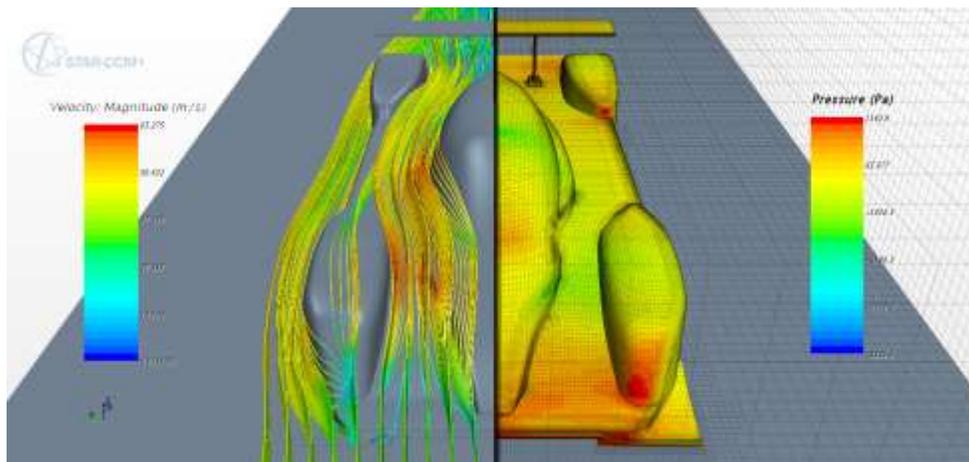
1.3.2 Procesamiento

El procesamiento es la etapa en la cual se ejecuta la simulación y se obtiene la solución numérica a los fenómenos, acá es donde se hace seguimiento a los criterios de convergencia mientras el computador realiza el cálculo. [38], [41]–[44]

1.3.3 Pos-Procesamiento

Los resultados de una simulación CFD pueden ser mostrados de forma cualitativa, como se observa en la **Figura 1-7**, o cuantitativa según el análisis requerido. Comúnmente se muestran los resultados de las variables de interés de forma cualitativa en modo gráfico, se utilizan contornos, líneas de flujo o vectores de flujo, inicialmente y se utilizan los resultados cualitativos a fin de identificar inconsistencias en el modelo y previo a realizar análisis más rigurosos de forma cuantitativa. [38], [41]–[44]

Figura 1-7: Representación gráfica de los resultados cualitativos de una simulación CFD de la aerodinámica de un auto de carreras prototipo de Le Mans, al lado izquierdo se observan las líneas de corriente que muestran la magnitud de la velocidad, al lado derecho se muestran los contornos de la presión sobre el auto. Tomado de <http://theanswers27.com/cfd-on-a-le-mans-prototype/>



1.4 Sistemas de transporte masivo tipo BRT

Un sistema BRT (por sus siglas en inglés Bus Rapid Transit) es un modo de operación de transporte público que puede tomar formas diferentes. Esto tiene que ver con que puede adaptarse a las necesidades de cada ciudad y ser construido a medida, es por esto que existe una gran variabilidad entre los sistemas BRT de distintas ciudades. Esta discrepancia de la definición proviene de los modelos implementados en Bogotá, Colombia y en Curitiba, Brasil, ambos modelos son referente a nivel mundial y se consideran modelos a seguir. Sin embargo, un sistema BRT puede definirse como “*Un sistema de alta calidad basado en buses que proporcionan movilidad urbana rápida, cómoda y de relación favorable costo-beneficio a través de la provisión de infraestructura de carriles segregados,*

operación rápida y frecuente y excelencia en el mercadeo y servicio al cliente". [45], [46],[47]

Un sistema de buses BRT tendrá un costo hasta 20 veces menor que un sistema de tren ligero y hasta 100 veces menor que un sistema de metro. Algunas de las características de un sistema BRT se muestran en la **Tabla 1-3**. [45], [48]

Tabla 1-3: Características Principales de los sistemas BRT. Adaptado de [45]

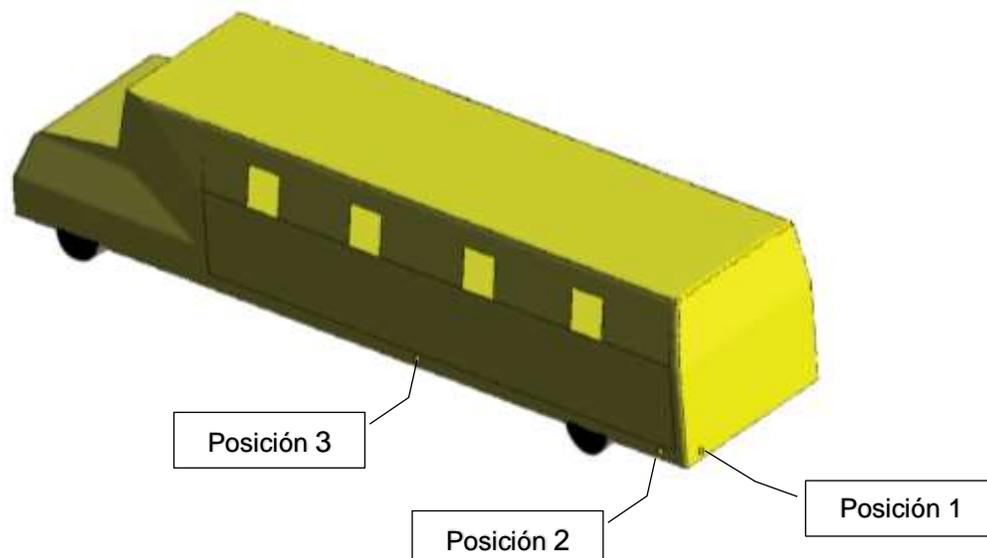
Infraestructura Física	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Carriles segregados exclusivos, normalmente en el centro. ▪ Red integrada de Rutas y corredores ▪ Estaciones cómodas, seguras y protegidas de condiciones climáticas con acceso de nivel de plataforma a piso del vehículo. ▪ Estaciones de fácil integración de rutas troncales, servicios de alimentación y otros sistemas de transporte masivo. ▪ Mejorías del espacio público circundante.
Operaciones	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Servicio frecuente y rápido entre orígenes y destinos principales. ▪ Capacidad amplia para demanda de pasajeros a lo largo de los corredores ▪ Abordaje y desembarque rápido de pasajeros ▪ Recaudo y verificación de la tarifa antes de abordar ▪ Integración de tarifas entre rutas, alimentadores y corredores
Estructura de Negocios e Institucional	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entrada al sistema restringida a operadores prescritos bajo un negocio y estructura administrativa reformada ▪ Procesos licitados competitivamente y totalmente transparentes para la adjudicación de contratos y concesiones ▪ Gestión eficiente que resulta en eliminación o minimización de subsidios del sector público hacia la operación del sistema ▪ Sistema de recaudo de la tarifa operado y gestionado independientemente ▪ Seguimiento del control de calidad por parte de una entidad o agencia independiente
Tecnología	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tecnologías de vehículos de bajas emisiones y ruido ▪ Recaudo y verificación de tarifa automáticos ▪ Gestión del sistema a través de un centro de control mediante aplicaciones de Sistemas de transporte inteligentes, como localización automática de vehículos ▪ Prioridad semafórica o separación de nivel de intersecciones
Mercadeo y servicio al cliente	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identidad distintiva para el sistema ▪ Excelencia de servicio al cliente y provisión de facilidades clave para los usuarios ▪ Facilidad de acceso entre el sistema y otros medios de transporte ▪ Infraestructura especial para facilitar movilidad a grupos en desventaja física ▪ Mapas de rutas, señalización, pantallas de información en tiempo real

2.METODOLOGIA

2.1 Modelación CFD del exterior del bus escolar

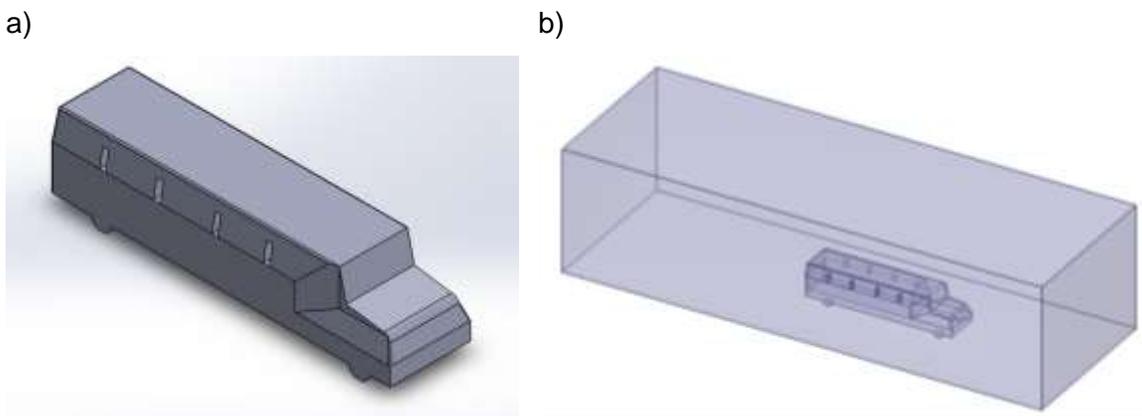
La etapa inicial del proyecto consistió en la validación del modelo desarrollado con CFD Ansys Fluent®, esta validación se hizo a través de la reproducción de los resultados obtenidos en un artículo científico publicado previamente, lo cual permitió establecer las condiciones y set-up más adecuado. El estudio seleccionado para reproducir[6], muestra los resultados de la evaluación de la auto-contaminación de un bus escolar bajo diferentes condiciones de velocidad y posición del tubo de escape de gases de combustión, a través de la inyección de un gas trazador, Hexafluoruro de Azufre (SF_6), en los gases de tubo de escape. Se seleccionó ya que fue desarrollado en el mismo software de simulación. Las diferentes posiciones del tubo de escape se muestran en la **Figura 2-1**.

Figura 2-1: Ubicación de las 3 posiciones de tubo de escape evaluadas en el análisis de gas trazador de bus escolar en la geometría desarrollada. **Fuente:** Elaboración propia



Inicialmente se realizó la construcción de la geometría y definición de dominio de flujo para todos los casos a ser simulados. A continuación, se muestra en la **Figura 2-2**, la geometría y dominio de flujo para el caso del bus escolar. Se realizaron estas operaciones en el software de modelamiento Space Claim de la suite de Ansys®.

Figura 2-2: (a) Geometría y (b) dominio de flujo para simulación de casos de bus escolar.
Fuente: Elaboración propia



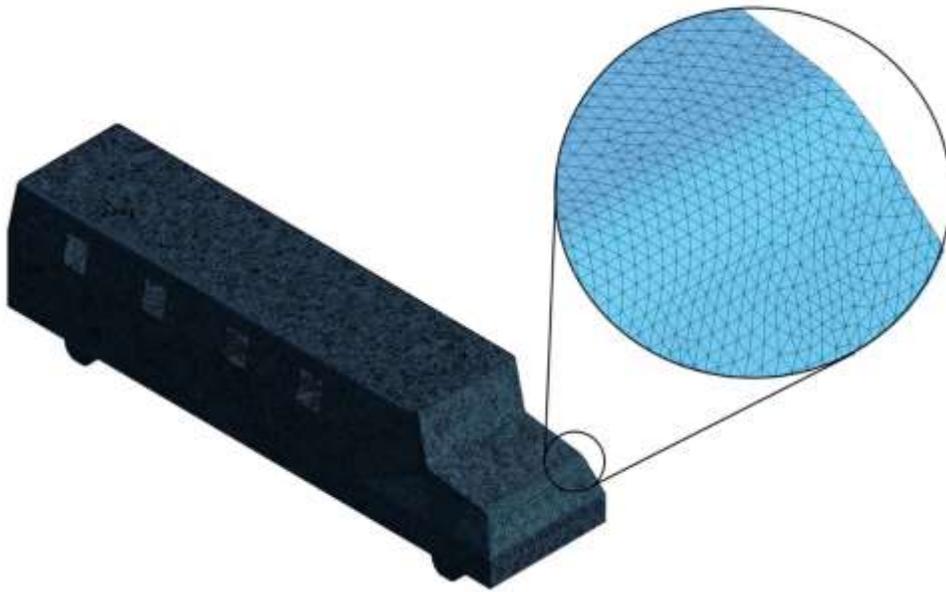
Posterior a la definición del dominio de flujo, se realizó la etapa de mallado en elementos tetraédricos en el software Ansys Meshing®, utilizando el criterio de calidad de malla basado en la ortogonalidad de los elementos [38], [41], Este criterio funciona para definir si la malla construida es una malla de buena calidad y, por ende, llevará a una buena convergencia y resultados fiables del modelo. El criterio de ortogonalidad de malla consiste en la comparación de los elementos tetraédricos de la malla, de diferentes tamaños y aristas, con un elemento tetraédrico perfecto, así, el elemento con el menor valor de ortogonalidad definirá el criterio: una malla con un elemento con una ortogonalidad mínima de 0.01 es una malla considerada de buena calidad.

Se obtuvo en esta etapa inicial de mallado una malla de 11'124.910 elementos con una calidad ortogonal mínima de 0,219, indicando que es una malla adecuada para la simulación (ortogonalidad > 0,01). No obstante, a través de la herramienta de optimización de malla de Ansys Fluent® se llevó a cabo la optimización de ésta transformándola a malla de tipo poliédrica, en el proceso se disminuyó la cantidad de elementos a 2'508.656 elementos con una calidad ortogonal mínima de 0,149 siendo aún adecuada para la simulación. La optimización de la malla mejoró considerablemente el tiempo requerido para el cómputo de las simulaciones manteniendo una buena calidad en la malla. La **Figura 2-3**

muestra la diferencia entre una malla de elementos tetraédricos (a) con otra de elementos poliédricos (b), mostrada desde la vista posterior del bus. Adicionalmente, la **Tabla 2-1** muestra las estadísticas y parámetros más importantes de ambas mallas.

Figura 2-3: Comparación de la (a) malla tetraédrica a la (b) malla poliédrica optimizada del bus escolar. **Fuente:** Elaboración propia

a)



b)

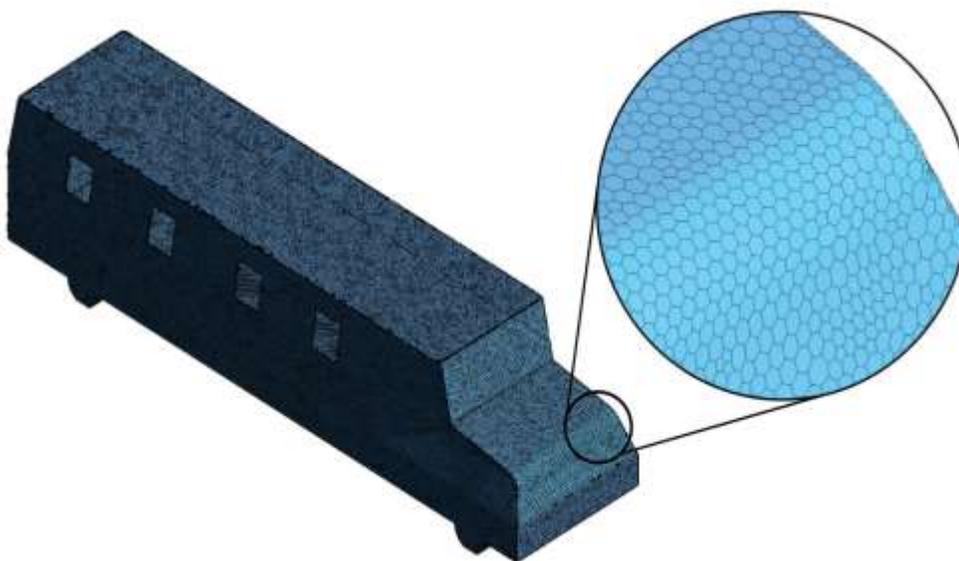


Tabla 2-1: Valores de estadísticas y parámetros más importantes de las mallas obtenidas para el bus escolar. **Fuente:** Resultados de este trabajo

Malla tetraédrica		Malla poliédrica	
Cantidad de elementos	11'124.910	Cantidad de elementos	2'508.656
Calidad ortogonal mínima	0.220	Calidad ortogonal mínima	0.150
Calidad ortogonal máxima	0.995	Calidad ortogonal máxima	0.850

La malla poliédrica fue la utilizada para la modelación de todos los casos simulados de bus escolar, los cuales se enumeran a continuación:

- Caso 1: Posición 1 de tubo de escape a velocidad de 32 km/h
- Caso 2: Posición 1 de tubo de escape a velocidad de 64 km/h
- Caso 3: Posición 1 de tubo de escape a velocidad de 100 km/h
- Caso 4: Posición 2 de tubo de escape a velocidad de 64 km/h
- Caso 5: Posición 3 de tubo de escape a velocidad de 64 km/h

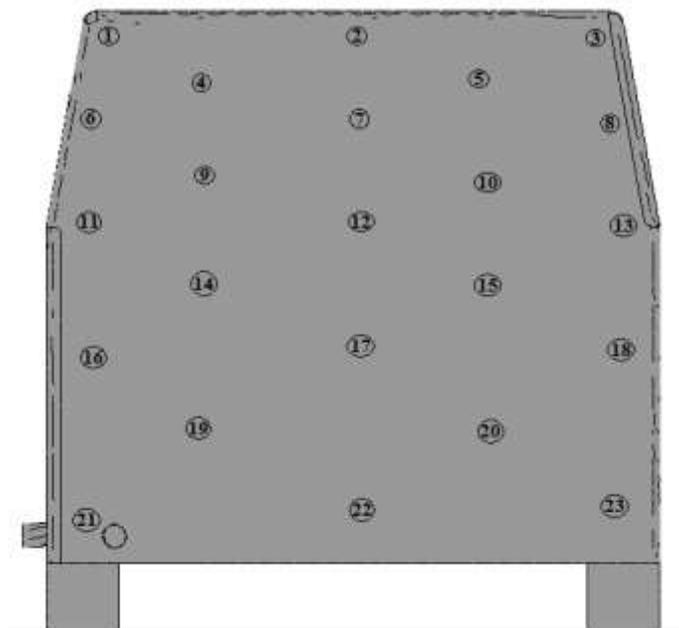
Para todos los casos reportados en el artículo, no se menciona ninguna especificación sobre la configuración o parametrización del modelo CFD utilizado, ni de la malla que fue empleada para sus simulaciones, por lo cual se desarrollaron las propias y luego se compararon los resultados publicados

Para la modelación de estos casos se consideró un modelo de turbulencia k-epsilon realizable, transferencia de calor a través de la ecuación de energía, y concentración local del trazador con el modelo multicomponente “especies” del solver Ansys Fluent®. Las simulaciones se desarrollaron transitorias para pasos de tiempo de 0.05 segundos, un total de 200 pasos para cada simulación y así obtener un tiempo de 10 segundos de resultados en cada caso, tiempo en el cual, los resultados comenzaban a mostrar signos de estabilización estacionaria. Es importante mencionar que en estas simulaciones la única fuente de emisión de gases contaminantes es la propia del tubo de escape del bus, no se considera concentración de fondo ni otros emisores, ya que el objetivo es evaluar la auto-contaminación ocasionada por el mismo bus. El flujo de gas trazador se hizo a través de la siguiente ecuación:

$$9338 \frac{l_{aire}}{min} * 10020 \frac{mg_{SF_6}}{kg_{aire}} * \frac{m^3}{1000 l} * 75 \frac{kg}{m^3} * \frac{min}{60 s} * \frac{kg_{SF_6}}{1000000 mg_{SF_6}} = 0.117 \frac{kg_{SF_6}}{s}$$

La validación del modelo se realizó correlacionando los valores del contorno de concentración de gas trazador obtenidos de las simulaciones y los contornos reportados en los estudios de referencia [6], [16]. Para esto se tomaron puntos distribuidos espacialmente en el contorno de la parte de atrás del bus, ya que estos son los reportados en la literatura (Sección 1.2.3), como se observa en la **Figura 2-4**, y en estos puntos se toma el valor correspondiente a la concentración de trazador, tanto en el contorno reportado en el artículo como en el obtenido de la simulación en este trabajo. Con estos datos se busca obtener una correlación lineal. Si correlación tiene un valor de R^2 y coeficiente de Pearson cercano a 1, es evidencia que el modelo utilizado para la simulación es representativo de los resultados reportados en el artículo. Adicionalmente se implementó el análisis estadístico por medio de: Root Mean Square Error (RMSE) y Mean-Bias (MB), lo anterior con el fin de determinar la desviación y grado de subestimación o sobreestimación del modelo CFD implementado frente a los datos reportados en la bibliografía.

Figura 2-4: Puntos tomados para validación de contornos de concentración de gas trazador SF_6 de estudio de referencia con simulaciones de esta investigación. **Fuente:** Elaboración propia



2.2 Modelación CFD del interior del bus escolar

Utilizando la misma geometría y malla definidas para la simulación del exterior del bus escolar en la **sección 2.1** de este documento se realizan las simulaciones teniendo en cuenta el interior del bus. Con estas simulaciones se busca evaluar el fenómeno de auto-contaminación por el gas trazador emitido desde el tubo de escape del bus hacia su habitáculo. Se consideró en todos los casos que las ventanas están abiertas. La simulación se realiza en estado transitorio, y como resultado se obtienen los contornos de concentración de SF₆ en el tiempo tanto en el exterior como en el interior del bus.

Los resultados obtenidos de la modelación se comparan con los datos experimentales reportados en el segundo estudio previo [16]. Se tomaron los experimentos que tuvieran mayor similitud en sus condiciones con los del primer estudio previo [6]. Se seleccionaron los experimentos realizados en buses de motor con cilindraje de 8.3 y 8.1 litros que funcionaran en ciclos de 4 tiempos y con un flujo de gases de tubo de escape de 9338 y 9113 litros por minuto. Finalmente, se consideran únicamente los casos en los que las ventanas se encontraban abiertas.

De los resultados del modelo CFD se toma la concentración promedio de SF₆ en la cabina del bus y al exterior del bus para ser comparados con los resultados de las mediciones de los casos referencia. Debido a que en el estudio previo no se menciona la posición exacta en dónde se midió la concentración de SF₆ en el interior del bus, se asume que fue en la parte trasera de la cabina. Para la concentración en el exterior del bus se tomó el valor promediado sobre el área del contorno que se ve en la **Tabla 3-5**. Con estos valores, se puede conocer la diferencia entre las mediciones experimentales y el modelo CFD propuesto en este trabajo.

2.3 Campaña de Medición en el bus articulado BRT

La campaña de medición se estableció como una herramienta-objetivo del presente proyecto, a fin de conocer las concentraciones de contaminantes a bordo del bus articulado y como herramienta de validación al modelo CFD. Los datos fueron tomados como se describe en esta sección del documento, en diferentes lugares y troncales del sistema de transporte masivo.

Posterior a la toma de datos se realizó un análisis estadístico a cada una de las series, a fin de determinar bloques de aceleración, bloques de velocidad, concentración instantánea y asociar la velocidad y aceleración con la concentración de material particulado.

Figura 2-5: Ubicación Geoespacial de las troncales Avenida El Dorado-Avenida el Dorado en color rojo, Calle 80 en color verde, Av. Caracas en color naranja, del sistema de transporte masivo de Bogotá. **Fuente:** Elaboración propia



La campaña de medición se realizó en la ciudad de Bogotá, Colombia, en las troncales de la Avenida El Dorado-Avenida el Dorado, Calle 80, Av. Caracas, la ubicación geográfica es mostrada en la Figura 2-5.

La troncal de la avenida el Dorado correspondió a la construcción de la fase III del sistema de transporte masivo de la ciudad, la cual fue puesta en funcionamiento en el año 2012, siendo la más reciente construida en la ciudad. Esta troncal es seleccionada ya que cuenta con una confluencia importante de pasajeros, entorno urbano mixto, conectividad con otras troncales y buses de diferentes generaciones.

Las troncales de la Calle 80 y Avenida Caracas, corresponden a la Fase I de la implementación del sistema integrado de transporte de la ciudad de Bogotá. Siendo estas las más antiguas del sistema, con inicio de funcionamiento el año 2000.

Estas tres troncales representan un porcentaje significativo del sistema y mueven una gran cantidad de pasajeros, y tienen una localización geográfica centran dentro del casco urbano. En las troncales seleccionadas se realizaron recorridos a bordo de buses articulados tecnología Euro IV mayormente, o anterior, con paradas en todas las estaciones de la troncal.

En la troncal de la Avenida el Dorado, las mediciones se hicieron partiendo desde el Portal El Dorado hasta la Estación Universidades. En la troncal Avenida Calle 80, se recorrió desde el portal hasta la estación Polo y finalmente en la Avenida Caracas desde la estación Héroes hasta Tercer Milenio. Se realizaron en total 52 recorridos a bordo de buses de los cuales, con los equipos y herramientas especializadas, se obtuvieron los datos simultáneos de las variables medidas (Tabla 2-2). Para las mediciones se usó un DustTrak 8530 para medir la concentración de PM_{2.5} y la aplicación MyCarTracks para el GPS en todas las troncales.

Tabla 2-2: Resumen general de los recorridos realizados a bordo del sistema de transporte masivo por troncal. **Fuente:** Elaboración propia

Troncal: Avenida el Dorado	
Fecha	18/12/2017; 19/12/2017; 23/05/2018; 24/05/2018
Cantidad Horas	16
Tipo de Bus	Articulado
Estaciones	Universidades - Portal Dorado
Hora	13:30 a 19:00
Troncal: Calle 80	
Fecha	30/05/2018
Cantidad Horas	6
Tipo de Bus	Articulado
Estaciones	Polo - Portal 80
Hora	14:30 a 19:00
Troncal: Caracas	
Fecha	25/05/2018; 26/05/2018
Cantidad Horas	8
Tipo de Bus	Articulado
Estaciones	Héroes - Tercer Milenio
Hora	13:30 a 18:00

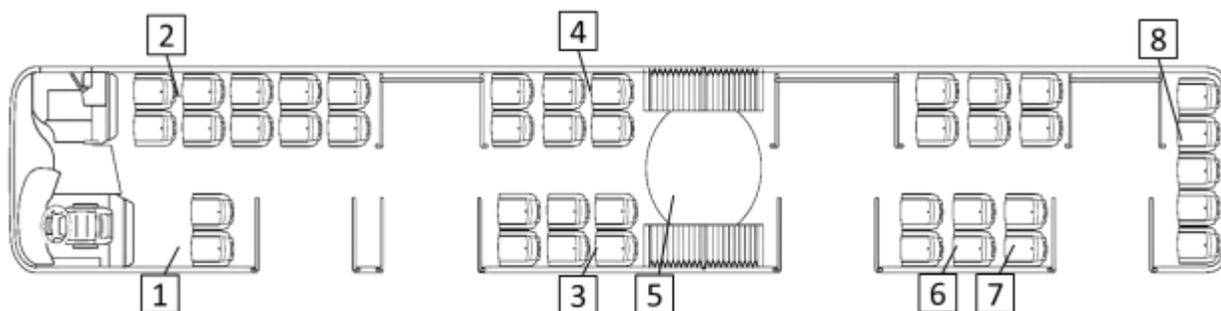
Se desarrollaron las mediciones para un tiempo total de 30 horas, se hicieron recorridos en ambos sentidos de cada una de las troncales, ida y vuelta. Estos recorridos fueron realizados entre la 1:00 pm hasta las 6:00 pm, entre los meses de diciembre de 2017 y abril de 2018. Las condiciones de tráfico y cantidad de pasajeros a bordo en este horario

se consideran uniformes y bajas, ya que corresponden a un momento de bajo tránsito en el día, por otra parte, la cantidad de ventanas abiertas pudieron ser controladas y conocidas en cada recorrido. Al ser realizados todos los recorridos dentro del mismo horario, se puede considerar que son comparables.

En cada uno de los recorridos realizados, el DustTrak fue ubicado estratégicamente en 8 diferentes posiciones del bus articulado, de tal modo que se pudiera obtener una caracterización espacial de la distribución de la concentración de los contaminantes a bordo del bus. La **Figura 2-6** ilustra las diferentes ubicaciones en los recorridos.

Figura 2-6: Ubicación espacial del sensor DustTrak utilizado en la campaña de medición a bordo del bus articulado durante los recorridos realizados. Puntos tomados para comparaciones de datos de $PM_{2.5}$ de la simulación con los medidos en la campaña.

Fuente: Elaboración propia



De las mediciones realizados se obtuvieron sets de datos de GPS y concentración de $PM_{2.5}$ en $\mu g/m^3$. Se cruzaron los datos de concentración de $PM_{2.5}$ con el instante correspondiente en el tiempo y posición. Las tablas con los datos se encuentran en el **Anexo: Base de datos recolectados de la campaña de medición**.

2.4 Modelación CFD de bus articulado BRT

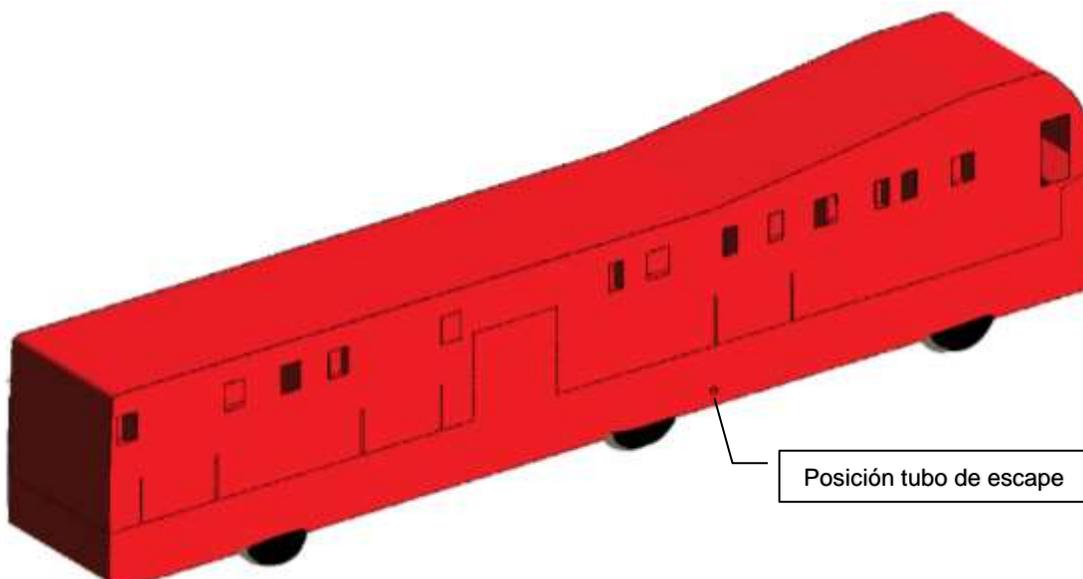
Posterior a la campaña de medición a bordo del sistema de transporte, se realizó la modelación CFD en Ansys Fluent® del bus articulado, el mismo sistema en el cual se llevaron a cabo las mediciones y toma de datos. El modelo CFD se implementó bajo las condiciones de set-up establecidas y validadas para el modelo del bus escolar, considerando el material particulado $PM_{2.5}$ en vez del trazador como el contaminante a seguir, y con 3 velocidades consideradas (20, 36 y 60 km/h). Estas 3 velocidades son

seleccionadas como representación de la condición de arranque, promedio de velocidad y velocidad crucero, respectivamente.

Adicionalmente, simuló el BRT utilizando el modelo DPM (Discrete Phase Model) para observar el comportamiento de las partículas como fase lagrangiana en términos de sus trayectorias.

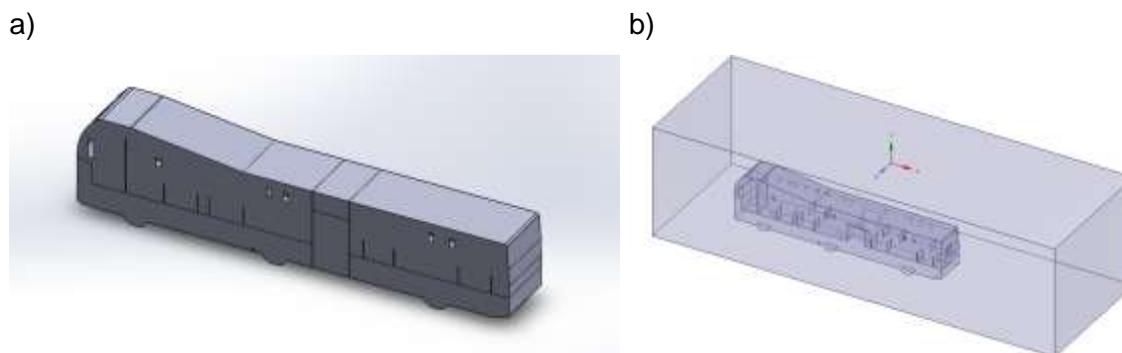
El primer paso para llevar a cabo esta modelación fue la digitalización de la geometría del bus articulado, para esto se consideraron las características de la hoja de especificaciones de un modelo de bus BRT de marca Volvo ® [49]. La digitalización de la geometría se hizo en 3D considerando las dimensiones del bus y los detalles importantes para esta modelación, tales como, la aerodinámica del bus, ubicación de ventanas, altura de llantas y ubicación del tubo de escape. La geometría 3D obtenida se muestra en la **Figura 2-7**.

Figura 2-7: Geometría del bus articulado del sistema de transporte masivo BRT. **Fuente:** Elaboración propia



Posterior a la construcción de la geometría se procedió con la definición de dominio de flujo para todos los casos a ser simulados. A continuación, se muestra en la **Figura 2-8**, la geometría y dominio de flujo para el caso del bus articulado. Se realizaron estas operaciones en el software de modelamiento Ansys® Space Claim.

Figura 2-8: (a) Geometría y (b) dominio de flujo para simulación de casos de bus articulado. **Fuente:** Elaboración propia



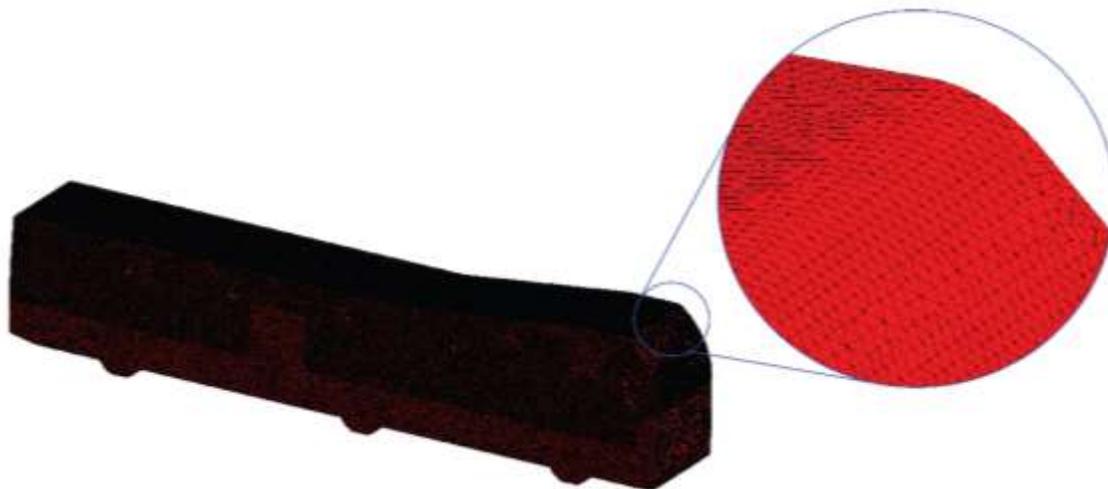
Posterior a la definición del dominio de flujo, se realizó la etapa de mallado en elementos tetraédricos en el software Ansys Meshing®, utilizando el criterio de calidad de malla de ortogonalidad, obteniendo inicialmente una malla de 14'025.910 elementos con una calidad ortogonal mínima de 0,206, siendo una malla adecuada para su implementación en la simulación. A través de la herramienta de optimización de malla de Ansys Fluent®, se desarrolló la conversión a malla tipo poliédrica, y en el proceso se disminuyó la cantidad de elementos a 2'915,668 con una calidad ortogonal mínima de 0.117, lo cual mejoró considerablemente el tiempo requerido para el cómputo de las simulaciones. La muestra la diferencia entre una malla de elementos tetraédricos con otra de elementos poliédricos en el caso del bus articulado, mostrada desde la vista frontal del bus. Adicionalmente, la **Tabla 2-3** presenta las estadísticas y parámetros más importantes de ambas mallas.

Tabla 2-3: Valores de estadísticas y parámetros más importantes de las mallas obtenidas para el bus articulado. **Fuente:** Resultados de este trabajo

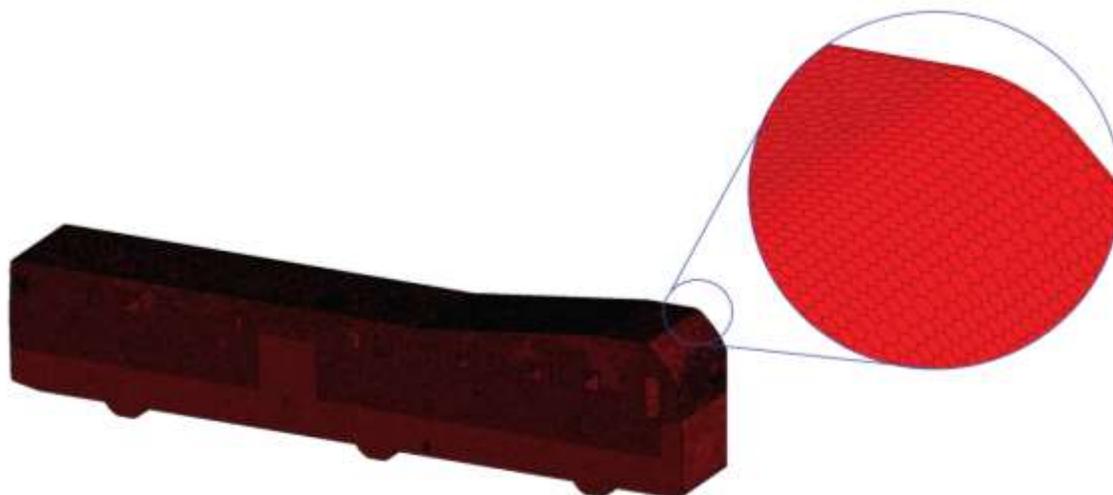
Malla tetraédrica		Malla poliédrica	
Cantidad de elementos	14'025.910	Cantidad de elementos	2'915.668
Calidad ortogonal mínima	0.206	Calidad ortogonal mínima	0.117
Calidad ortogonal máxima	0.992	Calidad ortogonal máxima	0.882

Figura 2-9: Comparación de la (a) malla tetraédrica a la (b) malla poliédrica optimizada del bus escolar. **Fuente:** Elaboración propia

a)



b)



La malla poliédrica fue la utilizada para la modelación de todos los casos simulados de bus articulado, los cuales se enumeran a continuación:

- Caso 1: Velocidad a 20 km/h
- Caso 2: Velocidad a 36 km/h
- Caso 3: Velocidad a 60 km/h

En la simulación del articulado la posición del tubo de escape fue la misma en los 3 casos simulados, ubicado en la parte inferior lateral derecha del primer vagón, como se muestra en la **Figura 2-7**.

Para la modelación de estos casos se consideró un modelo de turbulencia k-epsilon realizable, transferencia de calor a través de la ecuación de energía, y concentración del material particulado $PM_{2.5}$ con el modelo multicomponente “especies” y con el modelo multifase DPM. Las simulaciones se hicieron para pasos de tiempo de 0.01 segundos, un total de 500 pasos para cada simulación y así obtener un tiempo de 5 segundos de resultados en cada caso, estas simulaciones tomaron entre 8 a 20 horas para completarse. Para el desarrollo de las simulaciones se utilizó un servidor con un procesador Intel® Xeon de 12 núcleos y 16 Gb de memoria RAM. Es importante mencionar que en estas simulaciones la única fuente de emisión es la propia del tubo de escape del bus, no se considera concentración de fondo ni otros emisores, ya que el objetivo es evaluar la auto-contaminación ocasionada por el mismo bus.

La simulación se realizó empleando el setup de simulación validado con los casos del bus escolar, de las secciones **2.1** y **2.2** del documento, para así conocer la concentración de contaminante $PM_{2.5}$ al interior del bus. Para esto, se tomaron puntos distribuidos espacialmente en el contorno de concentración de material particulado en el interior del bus, de tal forma que estuvieran ubicados en las mismas posiciones en las cuales se tomaron datos durante la campaña. En estos puntos, mostrados en la **Figura 2-6**, se toma el valor correspondiente a la concentración promedio de material particulado medido en cada punto en todas las troncales, y de la simulación, para de este modo realizar una estimación de la fracción correspondiente a auto-contaminación del BRT de la concentración medida experimentalmente.

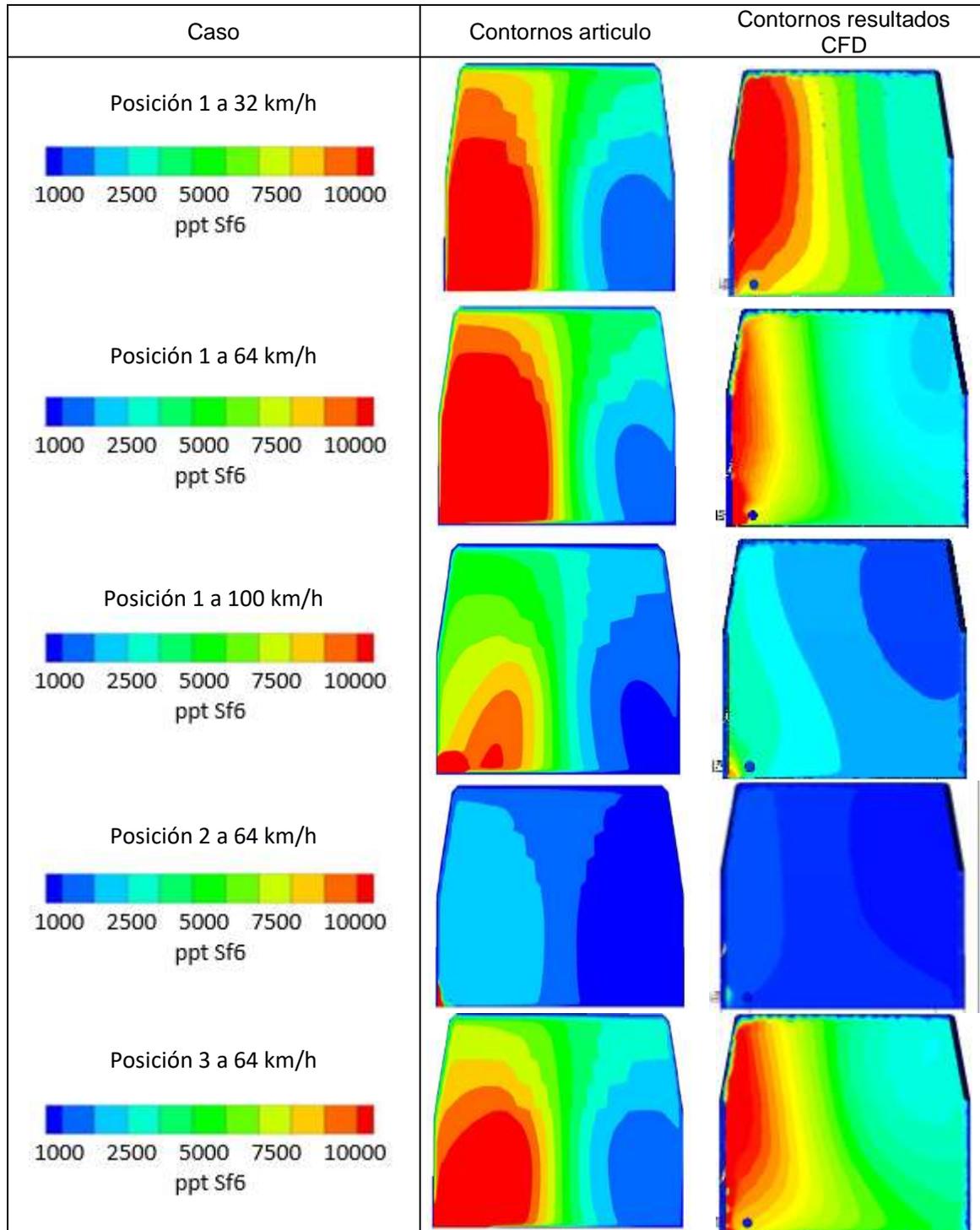
3.RESULTADOS

3.1 Modelación CFD de bus escolar

Se desarrolló la modelación CFD del bus escolar de los artículos [6] y [16] con el fin de validar el modelo que se aplicó para la modelación de los contaminantes dentro de los buses articulados del sistema de transporte masivo de la ciudad. El primer estudio de tomado para validación es una modelación CFD para predecir la auto-contaminación de gases de tubo de escape en buses escolares utilizando el gas trazador Hexafloruro de Azufre, SF₆. Para todos los casos reportados en el artículo, no se menciona ninguna especificación sobre la configuración o parametrización del modelo CFD utilizado, ni de la malla que fue empleada para sus simulaciones, por lo cual se desarrollaron las propias y luego se compararon los resultados publicados. Por otra parte, el segundo estudio fue enfocado a mediciones reales en buses escolares utilizando el mismo gas trazador para determinar la concentración de este al interior del bus. El mismo modelo CFD desarrollado en este trabajo para recrear y validar con el primer estudio, fue utilizado para el segundo, buscando determinar la capacidad del modelo CFD para simular el transporte de contaminantes del exterior al interior del bus [16].

3.1.1 Validación cualitativa del modelo CFD del bus escolar

En el artículo [6] se presentan los resultados de su modelo CFD como contornos de concentración del gas trazador SF₆, en el exterior del bus, los cuales son la mejor forma para realizar evaluaciones espaciales sobre el comportamiento y estabilidad del modelo CFD, así como para realizar análisis del fenómeno que se está estudiando. De los contornos obtenidos se toman los datos para la validación del modelo propuesto utilizando los puntos establecidos en la figura **Figura 2-4**. Los contornos de la literatura y los obtenidos en este trabajo se comparan en la **Tabla 3-1**. Es importante notar que los contornos reportan la fracción másica en unidades de ppt que se encuentra sobre la superficie del bus en la parte trasera.

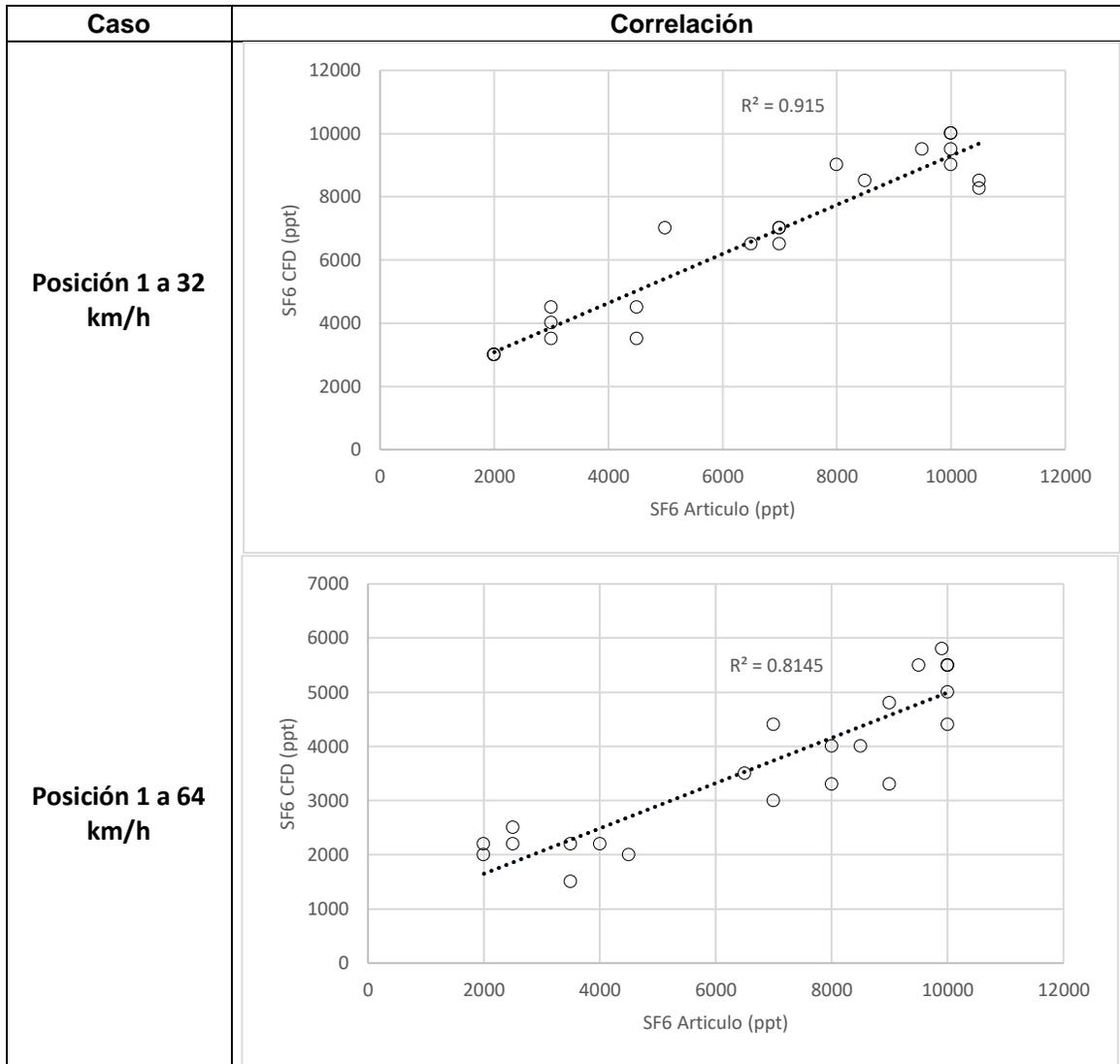
Tabla 3-1: Comparación cualitativa de contornos de concentración de gas trazador del estudio previo y del modelo CFD de este estudio sobre la parte trasera del bus escolar.**Fuente:** Resultados de este trabajo

Se puede observar que al colocar lado a lado cada uno de los contornos de los casos, existe cualitativamente una similitud entre los resultados obtenidos por los autores del estudio previo y los resultados obtenidos por el modelo CFD aplicado en este trabajo. Se logra describir que existe una tendencia hacia la disminución de concentración a medida que la velocidad de desplazamiento del bus es mayor, esto puede ser debido a las corrientes y turbulencia generada en el aire debido al mismo desplazamiento del bus, lo cual ayuda a la dispersión del contaminante. También se determina que la posición del tubo de escape es un factor con alto impacto en la dispersión de los gases de tubo de escape del bus, ya que en las posiciones 1 y 3 es donde se evidencia una mayor concentración de gas trazador en la superficie del bus, mientras que en la posición 2, la proporción es hasta 10 veces menor.

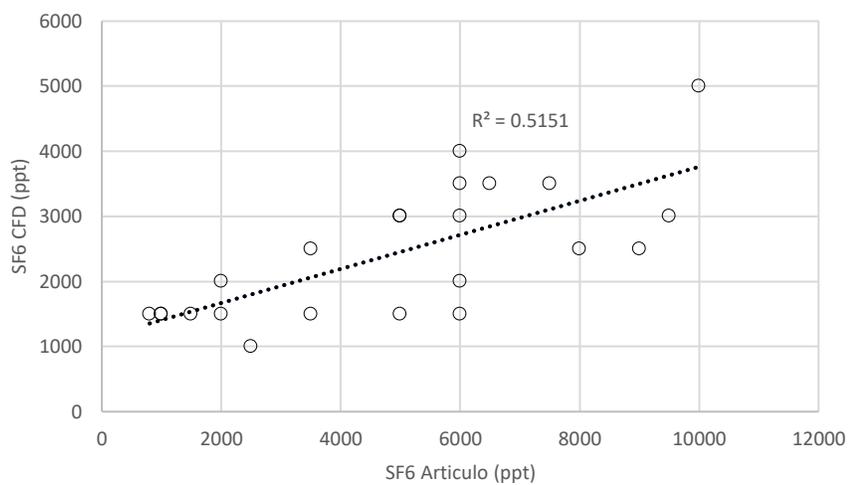
3.1.2 Validación cuantitativa del modelo CFD del bus escolar

Al utilizar los contornos de la **Tabla 3-1** para realizar la validación con los puntos de la **Figura 2-4**, se busca obtener una correlación lineal y calcular el valor del coeficiente de Pearson para evaluar que el modelo propuesto y aplicado en este trabajo logra reproducir los resultados del modelo del primer estudio previo [6] y que permitirá predecir las concentraciones al interior del bus para ser comparadas con los datos obtenidos experimentalmente en el segundo estudio previo [16]. Para esto se realizaron las gráficas de dispersión de puntos y se realizó la regresión lineal para cada uno de los casos, mostradas en la **Tabla 3-2**, obteniendo valores de R^2 mayores a 0.5 y Coeficientes de Pearson cercanos a 1.0 en todos los casos, los valores para cada uno de los casos están reportados en su respectiva gráfica, y son el indicador requerido para determinar si el modelo tiene un buen comportamiento a la hora de representar el fenómeno de interés para este estudio.

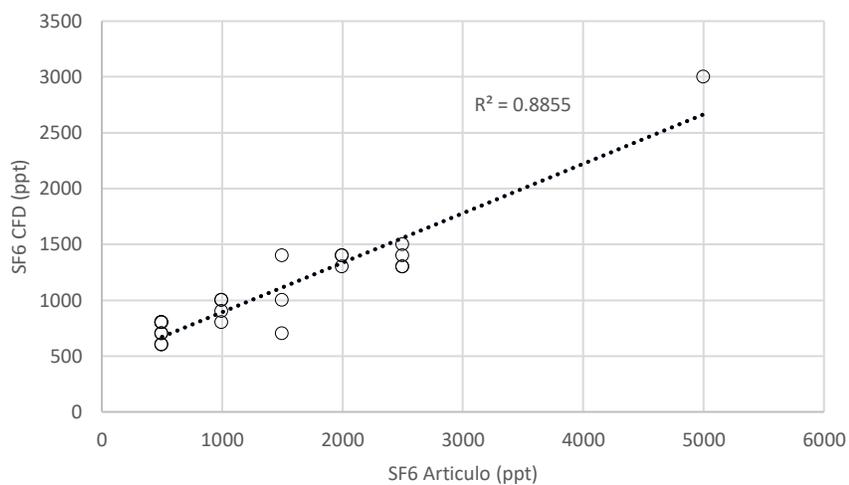
Tabla 3-2: Graficas de dispersión de puntos para correlación de contornos de estudio previo y modelo CFD de este trabajo para validación con regresión lineal. **Fuente:** Resultados de este trabajo



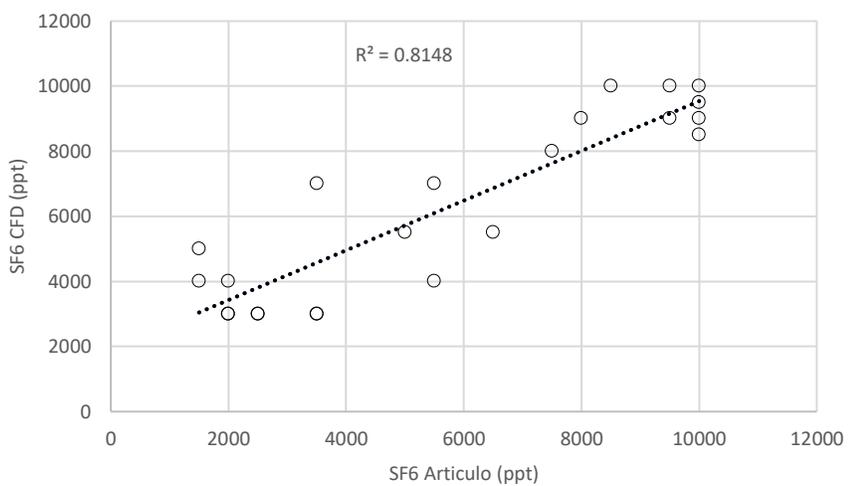
**Posición 1 a 100
km/h**



**Posición 2 a 64
km/h**



**Posición 3 a 64
km/h**



La **Tabla 3-3** muestra los parámetros estadísticos calculados para la correlación de los modelos del estudio previo y el de este trabajo. Se observa que los valores el coeficiente de Pearson y R^2 son cercanos a 1.0 en todos los casos, lo cual es indicador de una alta correlación y por lo tanto, de que el modelo es válido para la simulación del fenómeno de dispersión de contaminantes emitidos por el tipo de escape de vehículos automotores, en este caso, de buses. El Mean Bias indica en qué casos el modelo sobrestimó o subestimó las concentraciones de gas trazador respecto al estudio previo, un valor negativo indica subestimación y un valor positivo indica sobre estimación.

Una de las diferencias más significativas entre el estudio previo y este trabajo, es el hecho de considerar el tubo de escape y las llantas del vehículo, ya que, en la revisión en detalle del artículo, se observa que no se consideran estos aspectos. Esto puede verse numéricamente en las gráficas de dispersión en los puntos que para un mismo valor de X hay varios de Y, esto significa que, para varios puntos de la **Figura 2-4**, existe un mismo valor en el contorno reportado en el estudio previo. Si en este estudio no se consideraran las llantas y tubo de escape del vehículo en la geometría, la correlación de los casos podría tener valores más altos, lo cual estadísticamente sería más significativo. Sin embargo, la situación real no es así, por lo que sería incurrir en un error conceptual de la situación real que se busca representar, de este modo, mejorar la correlación estadísticamente alterando el modelo, no es necesariamente correcto conceptualmente, como en este trabajo.

Tabla 3-3: Parámetros estadísticos de la correlación para la validación del modelo CFD.
Fuente: Resultados de este trabajo

Caso	R-Pearson	R^2	MB	RMSE
Posición 1 a 32 km/h	0.957	0.915	-119.57	1022.84
Posición 1 a 64 km/h	0.902	0.814	3156.52	3644.29
Posición 1 a 100 km/h	0.718	0.515	2491.30	3290.24
Posición 2 a 64 km/h	0.941	0.885	360.87	713.53
Posición 3 a 64 km/h	0.903	0.815	-565.22	1489.09

3.1.3 Modelación interna del bus escolar

El modelo CFD que fue validado en la primera parte de este trabajo, fue empleado para realizar la modelación de la auto-contaminación del bus escolar, para así determinar si el modelo propuesto representaba adecuadamente este fenómeno. Para esto, se tomaron los datos listados en la **Tabla 3-4** del estudio previo [16], en los cuales se utilizó el mismo

gas trazador SF₆. Con las mediciones reportadas de ese estudio, se comparó con los resultados arrojados por el modelo CFD y se estimó el error del mismo.

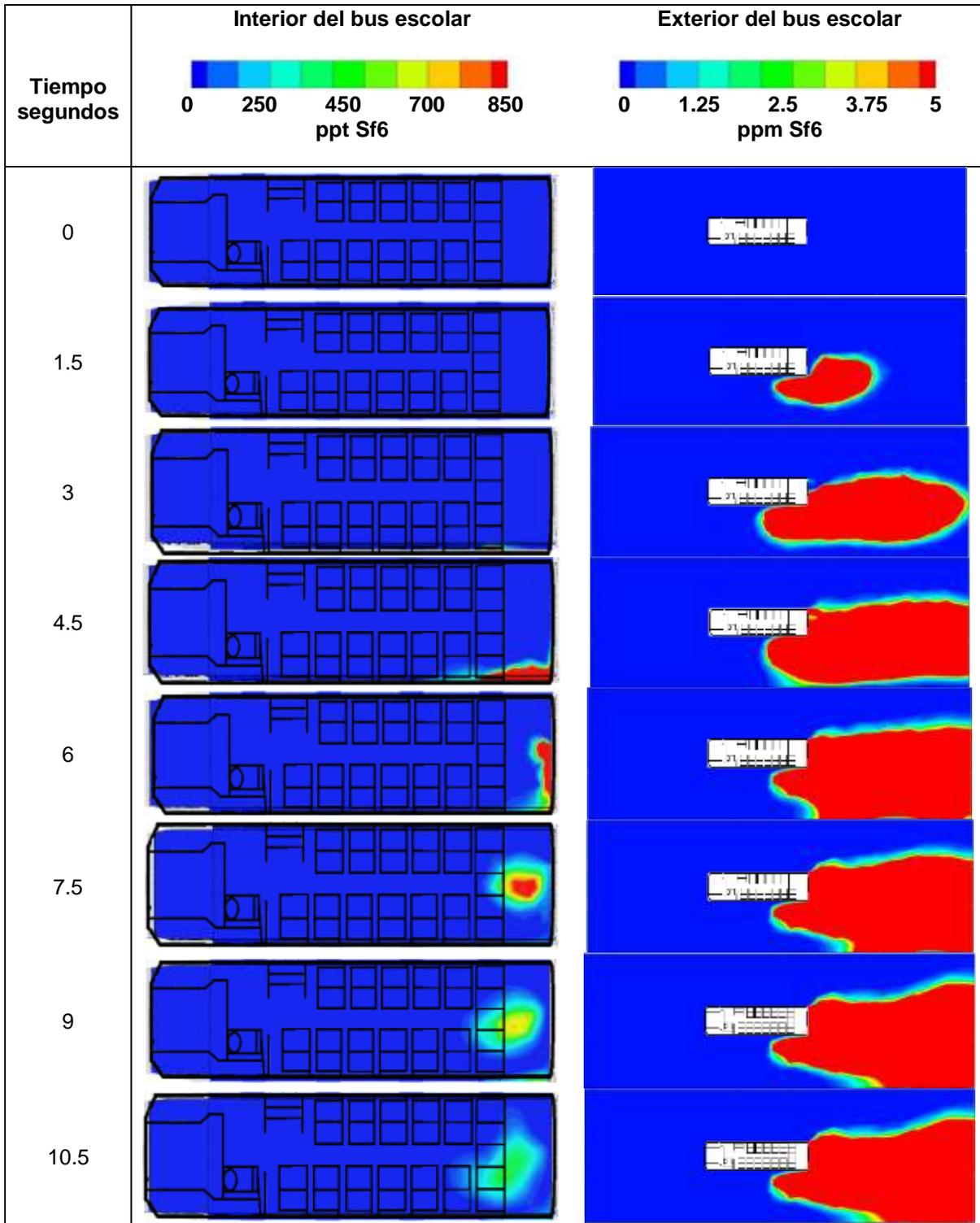
Tabla 3-4: Datos tomados del estudio [16] para la comparación y cálculo del error con el modelo CFD de la concentración de gas trazador al interior del bus escolar **Fuente:** Resultados de este trabajo

Dato Experimental, Tomado de [16] “Tabla 2 – Número de Corrida”	Concentración media de SF ₆ en interior del bus (ppt)	Concentración media de SF ₆ en exterior (ppm)
30*	848	4.61
33*	519	2.15
36*	807	3.19
promedio	725	3.32
CFD resultados	845	3.7
Error	17%	12%

*Estos datos se reportan en este documento en la **Tabla 1-1**

En el estudio previo [16] se encontraron datos para 3 casos medidos que corresponden a condiciones similares y comparables con las condiciones del caso modelado en CFD en este trabajo. Se tomaron estos 3 casos y se calculó la concentración media tanto al interior, en ppt, como al exterior, en ppm, del bus y luego, de los resultados del modelo CFD, se tomó la concentración promedio adentro y afuera del bus para ser comparados y calculado el error con respecto a los reportados en el artículo. Se obtuvo del cálculo del error, una medida de error absoluto de 12% para la concentración externa y 17% para la concentración interna, este error puede deberse a diferentes factores no controlados por el modelo, como humedad, temperatura ambiente, ventilación o irregularidades en flujo de gases de combustión debido a eficiencia del motor u otros factores relativos al ciclo de conducción. No obstante, el comportamiento del modelo no presenta desviaciones significativas y sirve para predecir el fenómeno que se busca estudiar.

Tabla 3-5: Contornos de concentración de gas Trazador SF_6 al interior y exterior del bus a lo largo de la simulación. **Fuente:** Resultados de este trabajo



Se puede determinar fácilmente de los contornos de concentración presentados en las figuras en la **Tabla 3-5**, que en el interior del bus escolar el fenómeno de auto-contaminación genera una acumulación en la parte trasera del bus, esto puede ser debido a la baja circulación y turbulencia del aire una vez entra a la cabina, generando que los pasajeros ubicados en esa parte del bus se vean más expuestos a contaminantes.

3.2 Campaña de medición

De las mediciones realizadas a bordo del sistema de transporte masivo se obtuvo una base de datos de concentración de material particulado $PM_{2.5}$, geolocalización, hora, velocidad instantánea y aceleración de cada uno de los 8 recorridos. Los datos se encuentran en el **Anexo**.

A partir de estos datos se buscó correlacionar las condiciones de aceleración, desaceleración, parada y velocidad del articulado con la concentración de material particulado $PM_{2.5}$ realizando la agrupación de los datos bajo estas condiciones. Se consideraron las condiciones de aceleración igual a 0 m/s^2 , aceleración entre 0 m/s^2 a 0.5 m/s^2 , aceleración mayor a 0.5 m/s^2 , desaceleración entre 0 m/s^2 a -0.5 m/s^2 y desaceleración mayor a -0.5 m/s^2 . Y en el caso de la velocidad se consideraron bloques de velocidad mayor a 0 y menor a 10 km/h, entre 10 km/h y 30 km/h, entre 30 km/h y 45 km/h, y mayor a 45 km/h. Este análisis se realizó para establecer el porcentaje correspondiente en cada condición en cada uno de los recorridos y la concentración promedio y máxima de contaminantes en cada condición en cada uno de los recorridos.

En la **Tabla 3-6** se utilizó la herramienta de escala de color para identificar fácilmente la condición de mayor contaminación en cada caso. El porcentaje de tiempo en la condición de recorrido (columna 3 de la tabla) es la fracción correspondiente a la cantidad de tiempo que el vehículo estuvo en esa condición durante el total del trayecto, por ejemplo, si en velocidad igual a 0 km/h corresponde un porcentaje del 9% para la troncal de la Caracas, quiere decir que, del total del recorrido, el BRT estuvo detenido un 9% del tiempo. Se observa que en las tres troncales la condición que presenta menor porcentaje es con el bus detenido y las de mayor porcentaje, son la aceleración y desaceleración moderada (valores $0 \text{ m/s}^2 < a < 0.5 \text{ m/s}^2$ y $-0.5 \text{ m/s}^2 < a < 0 \text{ m/s}^2$). Para la velocidad, en la Avenida el Dorado la condición que mayor porcentaje presenta es en velocidades mayores a 45 km/h, en la Calle 80 y Avenida Caracas es con velocidades de entre 10 km/h a 45 km/h.

Tabla 3-6: Resultados del análisis por velocidad y aceleración de la evaluación de PM_{2.5} por condiciones de conducción en las troncales estudiadas **Fuente:** Resultados de este trabajo

Troncal Avenida el Dorado				
Condición	Unidades	% de tiempo en la condición durante el recorrido	PM _{2.5} (µg/m ³)	
			Promedio	Máximo
Análisis por aceleración				
a=0	m/s ²	7%	63	340
0<a<0.5	m/s ²	27%	59	322
a>0.5	m/s ²	22%	56	278
-0.5<a<0	m/s ²	26%	60	298
a<-0.5	m/s ²	19%	60	307
Análisis por velocidad				
V=0	km/h	8%	30	142
0<V<10	km/h	9%	31	131
10<V<30	km/h	12%	30	211
30<V<45	km/h	30%	26	123
V>45	km/h	41%	29	149
TODOS LOS RECORRIDOS			54	590
Troncal Calle 80				
Condición	Unidades	% de tiempo en la condición durante el recorrido	PM _{2.5} (µg/m ³)	
			Promedio	Máximo
Análisis por aceleración				
a=0	m/s ²	7%	238	4510
0<a<0.5	m/s ²	30%	208	4510
a>0.5	m/s ²	23%	204	3810
-0.5<a<0	m/s ²	20%	218	3240
a<-0.5	m/s ²	19%	228	4690
Análisis por velocidad				
V=0	km/h	8%	238	4510
0<V<10	km/h	20%	211	4690
10<V<30	km/h	29%	191	2100
30<V<45	km/h	25%	234	2200
V>45	km/h	19%	213	1880
TODOS LOS RECORRIDOS			214	4690
Troncal Caracas				
Condición	Unidades	% de tiempo en la condición durante el recorrido	PM _{2.5} (µg/m ³)	
			Promedio	Máximo
Análisis por aceleración				
a=0	m/s ²	9%	230	2045
0<a<0.5	m/s ²	25%	228	1929
a>0.5	m/s ²	25%	229	2095
-0.5<a<0	m/s ²	20%	223	2405
a<-0.5	m/s ²	21%	227	3070
Análisis por velocidad				
V=0	km/h	9%	273	2045
0<V<10	km/h	23%	280	3100
10<V<30	km/h	32%	265	1654
30<V<45	km/h	24%	233	977
V>45	km/h	12%	232	719
TODOS LOS RECORRIDOS			226	4770

Por otra parte, se observa en los tres recorridos, que la mayor concentración en promedio, se encuentra cuando el vehículo está detenido, esto significa que al momento de parada en las estaciones para recoger o dejar pasajeros, los usuarios que se encuentran dentro del bus, se ven expuestos a mayor concentración de $PM_{2.5}$. También se observa que en general, cuando la velocidad va en aumento, las concentraciones de $PM_{2.5}$ disminuyen.

La troncal en donde menor concentración de $PM_{2.5}$ se encuentra, es en la troncal de la Avenida el Dorado, mientras que, en las troncales Caracas y Calle 80, se observan niveles mucho más altos. Las concentraciones máximas detectadas se encuentran en valores extremadamente altos comparados con las recomendaciones de la OMS. No obstante, a pesar de que la Avenida el Dorado es la que presenta menor concentración, también sobrepasa los límites recomendados.

3.3 Modelación CFD del bus BRT articulado

La modelación CFD del bus articulado se realiza teniendo en cuenta el exterior e interior del bus, la emisión del tubo de escape se ubica en la mitad del bus (**Figura 2-7**). Para esto, se utiliza la malla establecida en la metodología, los casos determinados y el modelo CFD establecido para la simulación del caso del bus escolar, es decir, el mismo set-up en cuanto a modelos de energía, turbulencia y emisión, pero teniendo en cuenta el factor de emisión del bus articulado, el cual fue estimado teniendo en cuenta el cálculo realizado por [50] [51]. Este factor fue calculado a partir de la siguiente ecuación.

$$286 \frac{mg}{km} * 28 \frac{km}{h} * \frac{h}{3600s} * \frac{1000m}{km} * \frac{km}{1000m} * \frac{kg}{1000000mg} = 2.29 \times 10^{-6} \frac{kg}{s}$$

Este valor es ingresado al simulador como una condición de frontera de tipo entrada de velocidad (velocity_inlet). A continuación, se muestran los resultados que fueron obtenidos luego de correr el modelo para los diferentes casos.

3.3.1 Modelación CFD

Los resultados del modelo CFD para el bus articulado, son presentados como contornos de concentración de $PM_{2.5}$, en un plano que corta en una sección horizontal a una altura de 1.70 m de altura desde el piso del bus, la cual es la altura promedio de la población colombiana. Los contornos se presentan para las 3 velocidades establecidas.

Las **Figura 3-1** a **Figura 3-3** muestran la velocidad instantánea en km/h y concentración de $PM_{2.5}$ en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para uno de los recorridos realizados en cada troncal. La concentración de $PM_{2.5}$ se muestra en escala logarítmica. Se puede comprobar que el bus nunca supera la velocidad de 60 km/h. De esta misma figura, se puede notar que en general, los momentos donde se encuentra mayor concentración de $PM_{2.5}$ es a bajas velocidades, lo cual se evidenció en la **Tabla 3-6**.

Una observación importante de las **Figura 3-1** a **Figura 3-3**, es la existencia de una permanente concentración de fondo, la cual varía para cada troncal, resaltada en promedio con la línea horizontal roja, alrededor de los $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado $PM_{2.5}$ para la troncal Avenida el Dorado, $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la Avenida Caracas y $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la Calle 80. Esto quiere decir que esa fracción $PM_{2.5}$ medida es concentración de fondo, y la otra fracción corresponde a otras fuentes de material particulado y al fenómeno de auto-contaminación del bus articulado.

Figura 3-1: Muestra de datos de velocidad y tiempo de uno del recorrido realizado por la troncal de la Avenida el Dorado el 18/12/2017. **Fuente:** Resultados de este trabajo

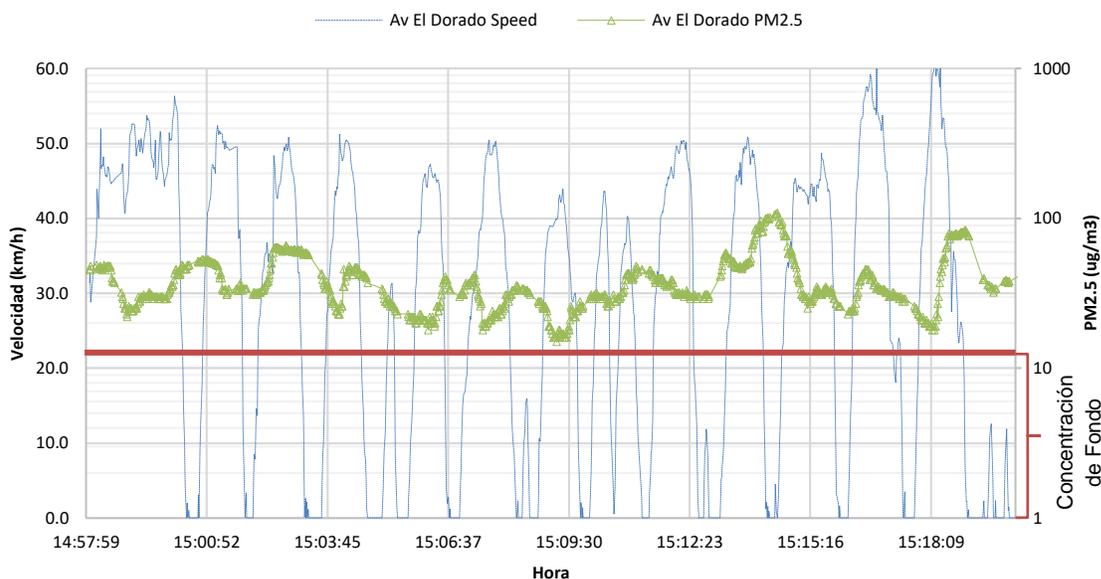


Figura 3-2: Muestra de datos de velocidad y tiempo de uno del recorrido realizado por la troncal de la Avenida Caracas el 25/05/2018. **Fuente:** Resultados de este trabajo

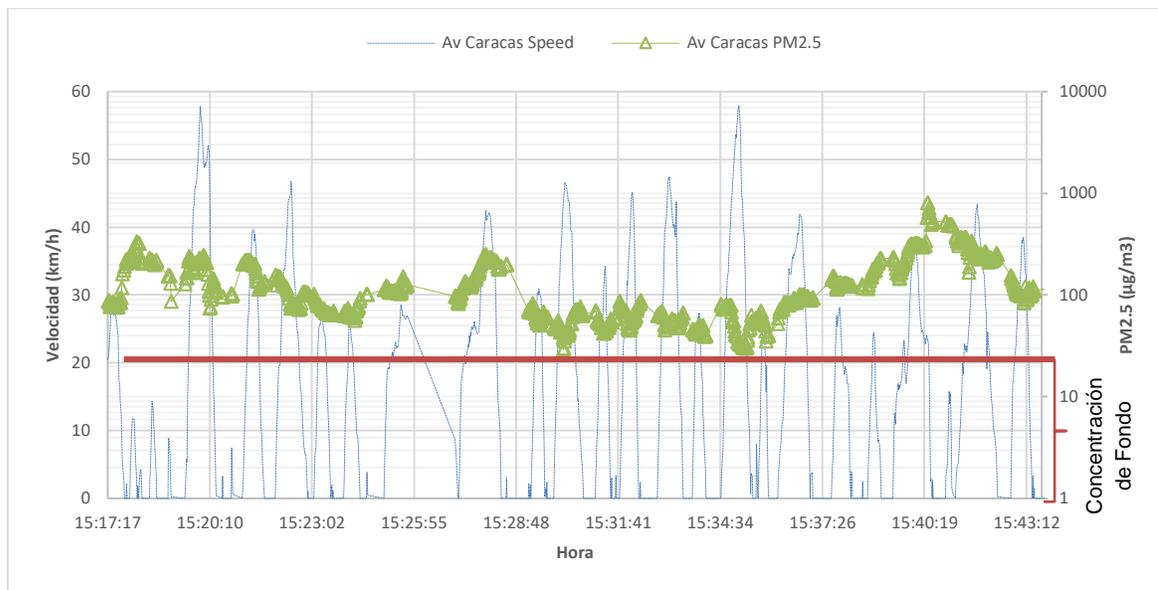
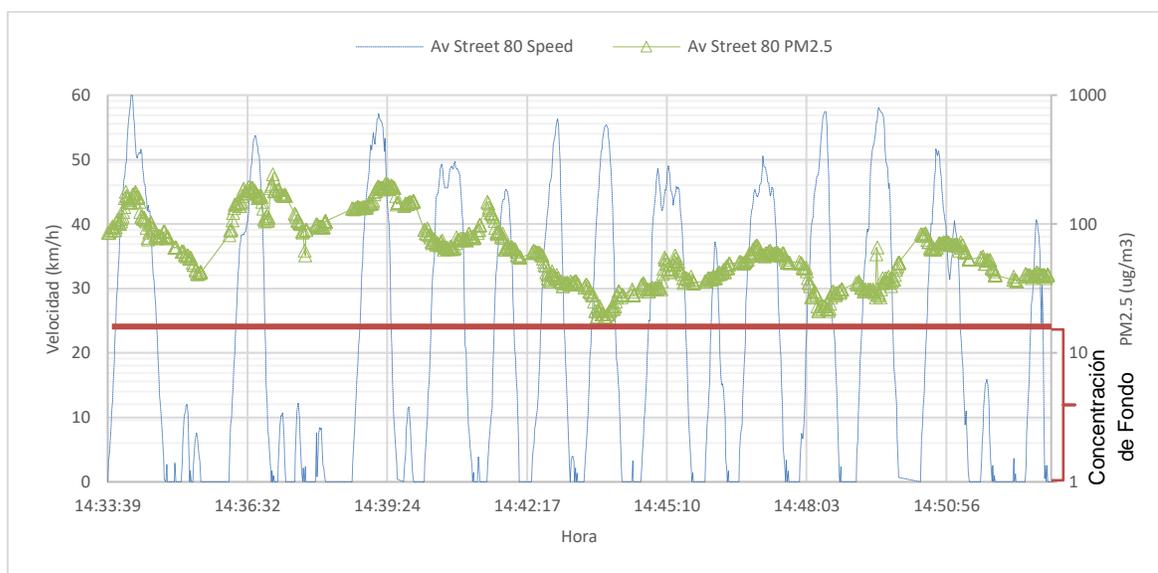


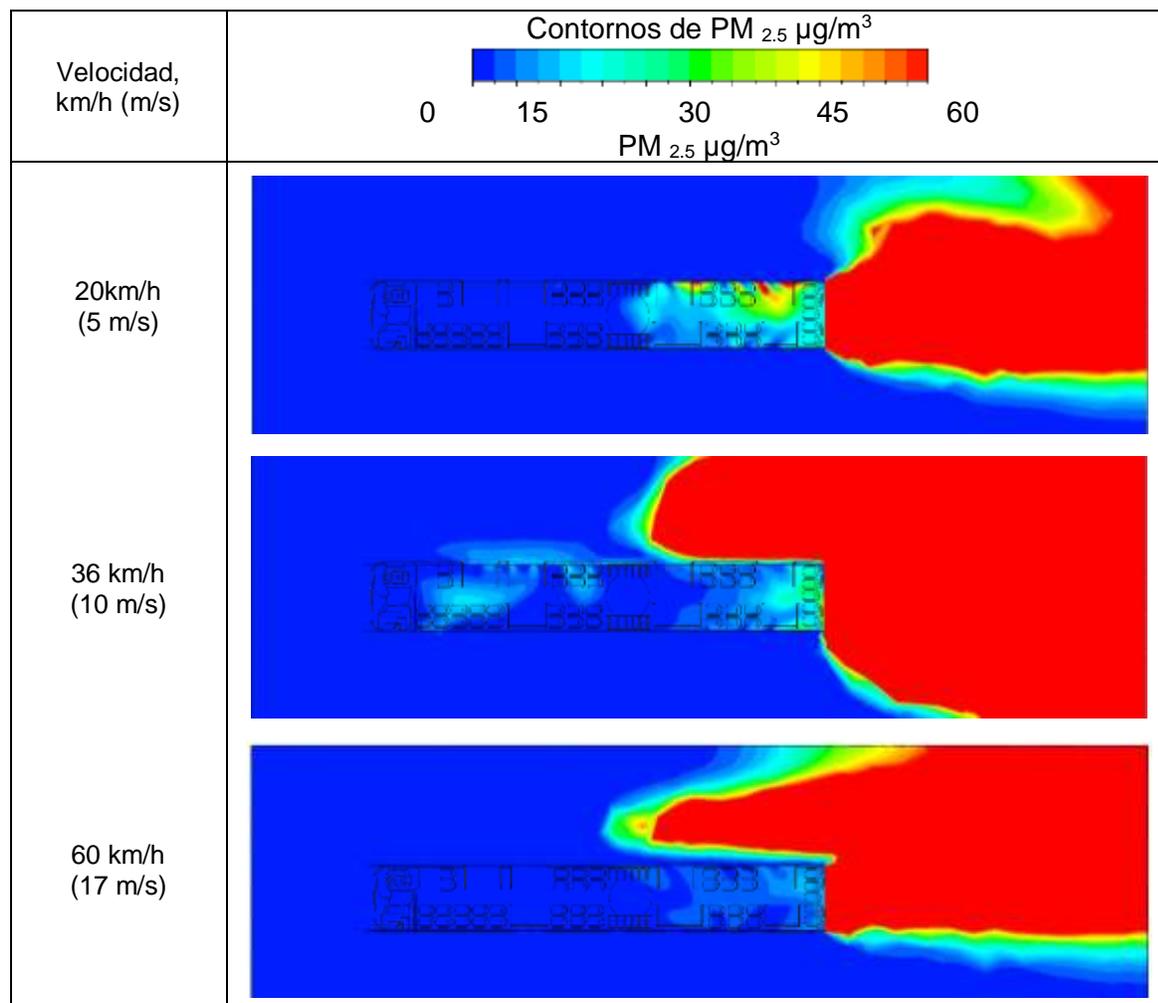
Figura 3-3: Muestra de datos de velocidad y tiempo de uno del recorrido realizado por la troncal de la Calle 80 el 30/05/2018. **Fuente:** Resultados de este trabajo



De los contornos mostrados en la **Tabla 3-7** como resultado de la simulación del modelo CFD, se evidencia que existe una mayor cantidad de flujo de contaminantes al interior del bus a velocidades bajas, también que la dispersión del penacho de gases de combustión es mejor a mayor velocidad, lo cual concuerda con lo visto en el modelo del bus escolar.

Para poder comprender mejor el fenómeno de flujo de contaminante al interior del bus, se analizan en detalle los contornos de concentración de material particulado en la parte interna del bus y de esta forma, se puede determinar los puntos donde más auto-contaminación se presenta.

Tabla 3-7: Contorno de concentración de material particulado $PM_{2.5}$ de la modelación CFD para las 3 velocidades estudiadas con el interior y exterior del bus. **Fuente:** Resultados de este trabajo



En los contornos de la **Tabla 3-7**, se puede ver el comportamiento del material particulado emitido por el bus, tanto en la parte externa como en la parte interna del bus. Estos resultados corresponden únicamente a la dispersión del contaminante emitido por el articulado, pues no se incluyó concentración de fondo del contaminante en el modelo CFD.

El penacho de emisión de material particulado puede compararse directamente entre las 3 velocidades establecidas para la modelación, y se observa que el contorno de concentraciones es menor a medida que la velocidad aumenta, este mismo parámetro puede ser un factor que determina también la auto-contaminación del bus.

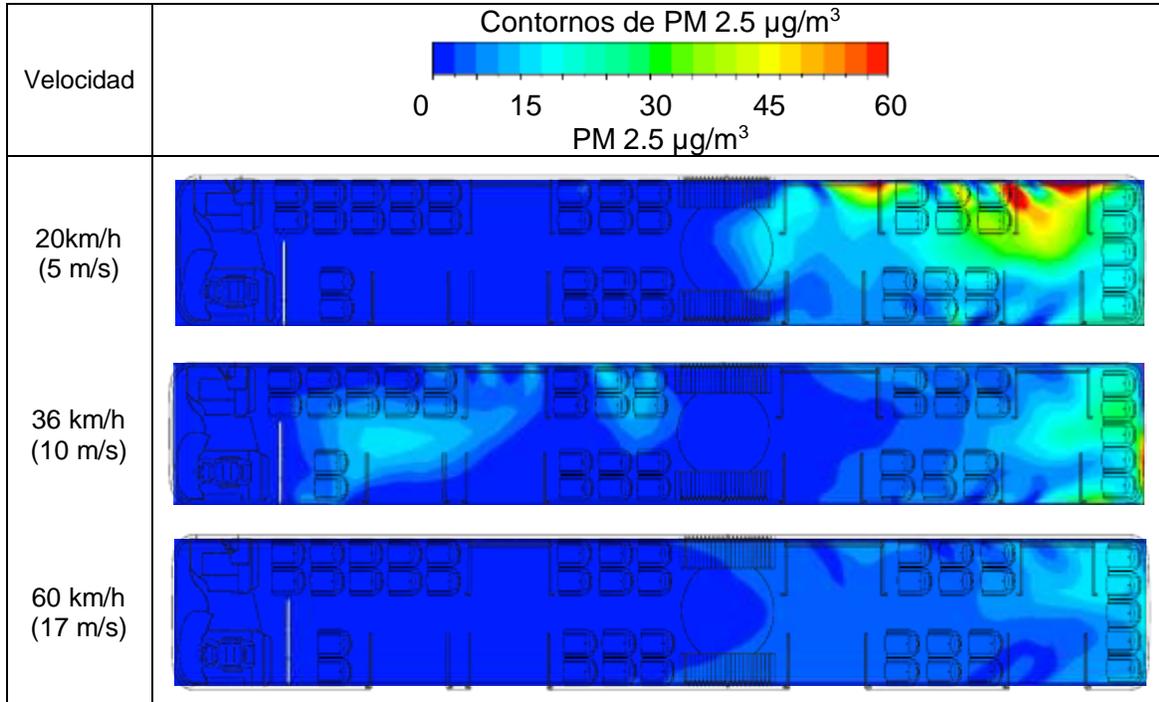
A una baja velocidad de tránsito del bus, la baja dispersión del penacho de emisión hace que la auto-contaminación del bus se evidencia a través de altos valores de concentración, a la vez que la circulación del aire en el interior del bus no es muy buena; esto conlleva a que se presente la acumulación en toda la parte trasera del bus con altos valores de concentración.

A una alta velocidad (60 km/h), el penacho de emisión se dispersa de mejor forma en el exterior del bus. La alta velocidad del flujo del aire y turbulencia del mismo, hacen que haya menor auto-contaminación que a 20 km/h y 36 km/h, debido a que existe una zona turbulenta que induce eddies promoviendo la circulación del aire en el interior y con ello el contaminante.

Las concentraciones a 60 km/h son menores que a 20 km/h, puesto que la circulación en el interior del bus es mejor debido a la ventilación y turbulencia, por lo cual la cantidad de material particulado que ingresa al bus se distribuye mejor. Es decir, la cantidad de contaminante se diluye en un mayor volumen interno del bus, llevando a que las concentraciones sean menores, pero mejor distribuidas.

Se observa en las figuras de la **Tabla 3-8**, que los contornos de concentración para las tres velocidades analizadas tienen diferencias marcadas. Cualitativamente, es claro que a baja velocidad las concentraciones de material particulado están en sus valores más altos por auto-contaminación y localizados en la parte trasera de toda la cabina del BRT. A la velocidad de 36 km/h, la cual es el promedio de velocidad de tránsito del bus, podemos ver que el contaminante se distribuye en toda la cabina y es la que presenta mayor porcentaje de auto-contaminación. Sin embargo, lo realmente interesante de estos contornos es que a la velocidad máxima de tránsito de 60 km/h, se observa una mejor dispersión en la cantidad de auto-contaminación en la cabina del bus, con concentraciones bajas distribuidas en todo el interior del bus como se explicó en el párrafo anterior. Para corroborar este fenómeno, se analizan los resultados numéricos del modelo en la sección **3.3.2**.

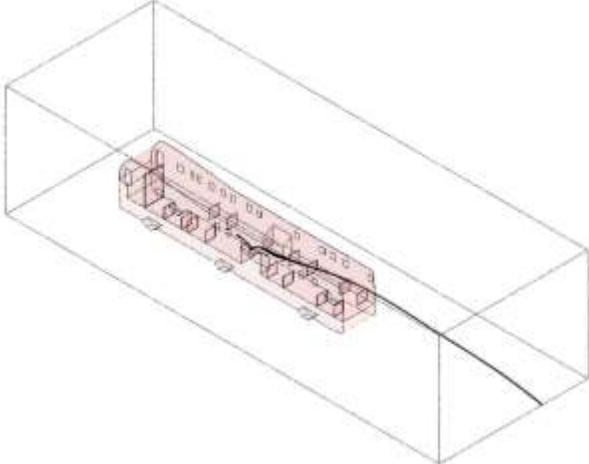
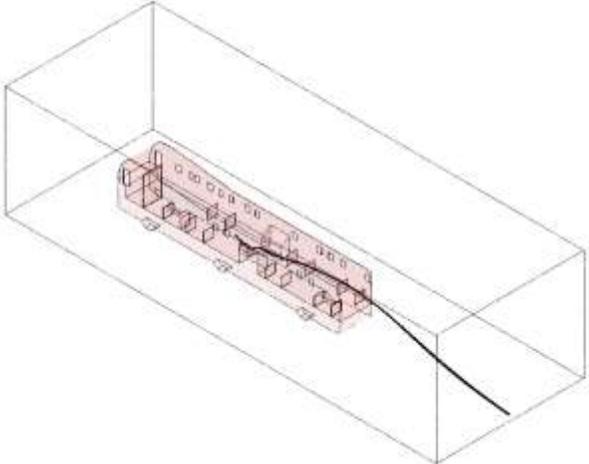
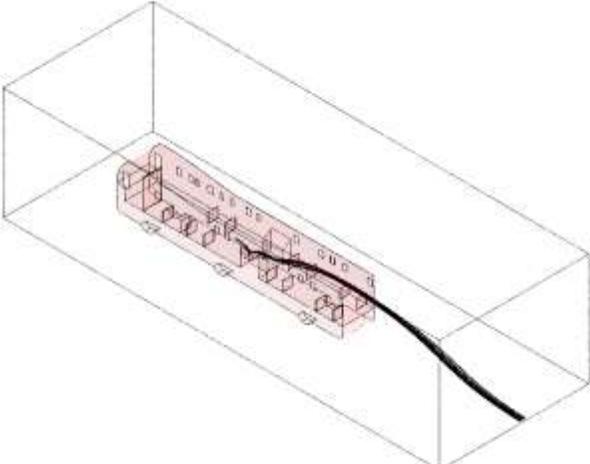
Tabla 3-8: Contorno de concentración de material particulado $PM_{2.5}$ de la modelación CFD para las 3 velocidades estudiadas con el interior del bus en detalle. **Fuente:** Resultados de este trabajo



Los resultados del modelo multifase DPM en estado pseudoestacionario, que se muestran en las figuras de la **Tabla 3-9**, no son representativos de la realidad, ya que se observa una sedimentación de las partículas en la trayectoria. Una solución a este inconveniente es realizar la modelación CFD utilizando el modelo multifásico DPM en estado completamente transitorio y luego validarlo con las concentraciones medidas y el modelo euleriano ya validado en este trabajo.

El modelo que se validó en este trabajo fue euleriano, ya que era del que se disponía la información y el enfoque para analizar el fenómeno, utilizar otro modelo no tendría validez científica y los resultados no tendrían virtud.

Tabla 3-9: Resultados del modelo CFD empleando multifase DPM, trayectorias de la fase lagrangiana. **Fuente:** Resultados de este trabajo

Velocidad	Trayectoria de partículas modelo lagrangiano DPM
20 km/h (5 m/s)	
36 km/h (10 m/s)	
60 km/h (17 m/s)	

3.3.2 Validación del modelo CFD con la campaña de medición

Tabla 3-10: Concentración obtenida del modelo CFD para cada una de las velocidades simuladas en las posiciones donde se realizaron las mediciones. **Fuente:** Resultados de este trabajo

Velocidad, km/h (m/s)	Concentración PM _{2.5} µg/m ³							
	1	2	3	4	5	6	7	8
20 (5)	0.0	0.0	0.0	0.1	3.6	12.6	21.2	40.7
36 (10)	2.4	2.1	0.1	7.8	1.4	6.9	7.1	35.2
60 (16.67)	1.3	1.2	2.0	2.2	2.6	4.7	5.7	15.5

De los resultados obtenidos de la modelación CFD del bus articulado, se puede observar que las concentraciones en la **Tabla 3-10** y la **Figura 2-6** para las 3 velocidades simuladas muestran una tendencia clara al incremento en la parte trasera del bus, entre las posiciones 5 a 8, mientras que las posiciones 1 a 4 son las que tienen menores concentraciones de material particulado. Por otra parte, en esta tabla las concentraciones permiten mostrar que el mezclado y circulación en el interior del bus se ve altamente influenciado por la velocidad, ya que, como se había mencionado anteriormente, a baja velocidad se encuentran las concentraciones más altas en la parte trasera del bus mientras que la parte delantera se mantiene prácticamente limpia en términos de auto-contaminación, a velocidades más altas, y particularmente la velocidad crucero de 60 km/h, se observa que las concentraciones no son muy altas pero se encuentra distribuida toda la masa a lo largo del interior del bus lo cual puede atribuirse al efecto de mezclado y circulación del aire en el interior del bus.

Se analizan los resultados del modelo CFD en conjunto con los datos medidos durante la campaña para los casos de 20 km/h y 60 km/h. La velocidad de 60 km/h es considerada debido a que es la velocidad máxima que puede alcanzar el bus y realiza alrededor de un 40% del recorrido a esta; y a 20 km/h, ya que se considera la velocidad de arranque del bus. La condición de 36 km/h es cercana al promedio de velocidad, sin embargo, en la mayoría de los casos el bus no realiza sus recorridos a esta velocidad, por lo cual no es un estado real representativo (**Tabla 3-6, Figura 3-1, Figura 3-2 y Figura 3-3**). Al realizar el análisis con los datos medidos durante la campaña, para los bloques correspondientes de velocidad, en cada posición medida en el bus, se busca encontrar la fracción del total de material particulado medido que corresponde a auto-contaminación. Para esto se muestran los resultados en las **Tabla 3-11 a Tabla 3-13**

Tabla 3-11: Fraccionamiento para cada una de las posiciones para determinar el porcentaje correspondiente a auto-contaminación a 20 km/h. **Fuente:** Resultados de este trabajo

Posición	Concentración media		Otras Fuentes	Porcentaje de PM _{2.5} del BRT
	PM _{2.5} @ 20 km/h	PM _{2.5} CFD	PM _{2.5} BG	
	(µg/m ³)	(µg/m ³)	(µg/m ³)	
1	19.9	0.0	19.9	0%
2	41.2	0.0	41.2	0%
3	27.2	0.0	27.2	0%
4	69.0	0.1	68.9	0%
5	41.0	3.6	37.4	9%
6	77.0	12.6	64.4	16%
7	59.3	21.2	38.1	36%
8	59.0	40.7	18.3	69%
Promedio	49.2	9.8	39.4	16%

Tabla 3-12: Fraccionamiento para cada una de las posiciones para determinar el porcentaje correspondiente a auto-contaminación a 36 km/h. **Fuente:** Resultados de este trabajo

Posición	Concentración media		Otras Fuentes	Porcentaje de PM _{2.5} del BRT
	PM _{2.5} @ 36 km/h	PM _{2.5} CFD	PM _{2.5} BG	
	(µg/m ³)	(µg/m ³)	(µg/m ³)	
1	23.3	2.4	20.9	10%
2	21.4	2.1	19.3	10%
3	22.5	0.1	22.4	0%
4	27.5	7.8	19.7	28%
5	35.8	1.4	34.4	4%
6	38.4	6.9	31.5	18%
7	63.9	7.1	56.8	11%
8	56.0	35.2	20.8	63%
Promedio	36.1	7.9	28.2	18%

Tabla 3-13: Fraccionamiento para cada una de las posiciones para determinar el porcentaje correspondiente a auto-contaminación a 60 km/h. **Fuente:** Resultados de este trabajo

Posición	Concentración media		Otras Fuentes	Porcentaje de PM _{2.5} del BRT
	PM _{2.5} @ 60 km/h	PM _{2.5} CFD	PM _{2.5} BG	
	(µg/m ³)	(µg/m ³)	(µg/m ³)	
1	18.4	1.3	15,0	8%
2	45.0	1.2	17,2	7%
3	23.5	2.0	21,5	9%
4	66.0	2.2	24,4	8%
5	32.3	2.6	29,7	8%
6	16.3	4.7	40,3	10%
7	65.2	5.7	60,3	9%
8	26.6	15.5	49,7	24%
Promedio	36.7	4.4	32.3	10%

El porcentaje calculado de aporte de auto-contaminación a la concentración de material particulado $PM_{2.5}$ en las tres velocidades, corroboran numéricamente lo que se puede observar en los contornos del modelo CFD, en la parte trasera del bus, en todos los casos, se encuentra el mayor aporte a auto-contaminación proveniente del tubo de escape del bus a la concentración total de material particulado. En algunas de las posiciones se alcanza hasta un 70% de auto-contaminación.

En promedio la auto-contaminación tiene un valor en la parte trasera del bus de 40% a 20 km/h, de 31% a 36 km/h y de 14% a 60 km/h. En toda la cabina, un porcentaje de auto-contaminación de 16% a 20 km/h, de 18% a 36 km/h y de 10% a 60 km/h. La fracción restante de la concentración de $PM_{2.5}$ es correspondiente a otras fuentes de emisión, tales como vehículos transitando por las otras calzadas de la vía, otros buses del sistema BRT, fuentes fijas dependiendo del sector de tránsito, otras fuentes móviles y la concentración de fondo de la ciudad.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Se implementó la Dinámica Computacional de Fluidos, CFD, como herramienta para evaluar el fenómeno de auto-contaminación, al cual se ven expuestos los pasajeros de transporte público diariamente. El enfoque CFD permitió conocer el comportamiento de las emisiones en detalle. Adicionalmente, se realizó la campaña de medición que permitió verificar la validez del modelo y correlacionar la concentración de $PM_{2.5}$ con la velocidad de tránsito del BRT. El desarrollo de este trabajo permite extraer las siguientes conclusiones:

- Se logró implementar exitosamente un modelo CFD para modelar la dispersión de gas trazador y material particulado $PM_{2.5}$ emitido por buses de transporte público. El modelo propuesto logró reproducir resultados de estudios previos en cuanto a concentraciones y tendencias en todos los casos analizados.
- El modelo CFD fue validado utilizando los resultados de estudios previos. Se obtuvieron valores de correlación, R , por encima de 0.71 en todos los casos del bus escolar simulados, los cuales son valores altos para estos casos en los cuales hay diversas variables que no se pueden controlar. Esto permite concluir que la configuración de las simulaciones en set-up de la modelación, junto a la geometría y la malla desarrolladas son adecuados.
- Se llevó a cabo la campaña de medición de $PM_{2.5}$ a bordo de los buses del sistema BRT de Bogotá. Se logró establecer que los recorridos tienen un promedio de duración de entre 20 a 40 minutos. La concentración promedio en

la troncal Avenida el Dorado fue de 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en la Calle 80 de 214 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en la Avenida Caracas de 226 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos valores superan por mucho la recomendación de la OMS de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

- Al analizar los datos de concentración de PM_{2.5} por bloques de aceleración y velocidad, se demostró que parece no existir relación significativa entre aceleración y concentración. Mientras que, sí existe una relación entre la concentración de PM_{2.5} al interior del bus y la velocidad de tránsito del bus, la cual es inversamente proporcional, a mayor velocidad hay una menor concentración.
- El modelo CFD desarrollado para el BRT fue implementado exitosamente y permitió señalar que en la parte trasera del habitáculo del bus es donde mayores concentraciones de PM_{2.5} se encuentran. Se verificó con el modelo CFD que existe una relación inversa entre la velocidad del bus y la cantidad de auto-contaminación.
- Se logró estimar la fracción de PM_{2.5} que proviene de auto-contaminación respecto al total medido durante la campaña. Un 18% del PM_{2.5} en todo el interior del bus, y en la parte trasera un 35%, proviene de auto-contaminación. Visto de otra forma, eliminar totalmente las emisiones del bus articulado llevaría a la disminución de alrededor de $\approx 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado dentro del bus.

4.2 Recomendaciones

El presente trabajo representa una línea de investigación en monitoreo y modelación de la calidad del aire la cual puede ser explotada para estudios de Salud Pública y Transporte. Los resultados acá presentados son la base y primera aproximación al estudio en detalle del comportamiento de contaminantes en microambientes, particularmente en los de medios de transporte, los cuales pueden abarcar no sólo los habitáculos de los vehículos, sino también las estaciones y áreas circundantes donde existe tránsito de vehículos.

Se recomienda la implementación y validación de un modelo multifase a futuro, implementar el modelo DPM en completo estado transitorio para observar el comportamiento de la fase lagrangiana que representan las partículas emitidas, ya que esto puede ayudar a mejorar la comprensión del fenómeno y sería una aproximación más a la realidad.

Se recomienda implementar una simulación CFD transitoria para el bus articulado considerando en detalle los ciclos de aceleración/desaceleración por las paradas en las estaciones durante el recorrido, con el fin de describir cuantitativamente los momentos de picos en la concentración de $PM_{2.5}$.

Las mediciones pueden mejorar utilizando varios sensores ubicados simultáneamente en el mismo bus durante un recorrido, esto permitiría realizar un mapeo global del comportamiento de los contaminantes y así poder ajustar mejor el modelo con el fin de obtener mayor precisión. Así como realizar la toma de datos en simultáneo con un mismo equipo que permita la medición de coordenadas y concentración a una alta frecuencia de muestreo, para poder analizar estadísticamente con mayor precisión los datos y generar mapas de contaminación de las troncales a través de la geo referenciación de los datos.

Finalmente, se recomienda realizar este mismo tipo de estudio a los demás tipos de buses presentes en el sistema, como lo son híbridos, biarticulados, padrones, urbanos e intermunicipales, a fin de determinar el comportamiento particular de cada uno de estos y como el entorno en donde transitan tiene una afectación sobre los temas de exposición de contaminantes a los usuarios del transporte público.

A. Anexo: Base de datos recolectados de la campaña de medición

El presente anexo está compuesto por los datos recolectados y agrupados durante la campaña de medición realizada a bordo del sistema de transporte masivo. Se encuentran los datos para las troncales estudiadas: Avenida el Dorado, Calle 80 y Avenida Caracas. Se presentan los resultados del análisis por bloques de aceleración y los datos de campo tomados durante el registro. Para acceder al archivo de Excel correspondiente siga el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/file/d/1kpMmktRl0Zil17lvqwqv8Tr253j6Mfom/view?usp=sharing>

Bibliografía

- [1] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, “Diagnostico nacional de salud ambiental.” p. 368, 2012.
- [2] A. G. Zamora, P. Borda, and C. Mayorga, “Boletín enfermedad respiratoria aguda ERA I Trimestre 2015 Boletín Enfermedad respiratoria aguda ERA,” 2015.
- [3] B. Sportisse, *Fundamentals in Air Pollution: From Proceses to Modelling*. Springer New York, 2010.
- [4] L. D. Sabin *et al.*, “Characterizing the range of children’s air pollutant exposure during school bus commutes,” *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.*, vol. 15, no. 5, pp. 377–387, 2005.
- [5] R. Morales Betancourt *et al.*, “Exposure to fine particulate, black carbon, and particle number concentration in transportation microenvironments,” *Atmos. Environ.*, vol. 157, no. 1, pp. 135–145, 2017.
- [6] F. Li, E. S. Lee, J. Liu, and Y. Zhu, “Predicting self-pollution inside school buses using a CFD and multi-zone coupled model,” *Atmos. Environ.*, vol. 107, pp. 16–23, 2015.
- [7] A. Kathuria, M. Parida, C. Ravi Sekhar, and A. Sharma, “A review of bus rapid transit implementation in India,” *Cogent Eng.*, vol. 3, no. 1, 2016.
- [8] O. Observatorio Ambiental de Bogotá, “Informe mensual de Calidad del Aire en Bogotá.” Bogotá, Colombia, p. 41, 2017.
- [9] Transmilenio, “Transmilenio en cifras,” no. Informe No. 48. Transmilenio S.A, Bogotá, Colombia, p. 29, 2016.
- [10] S. Arphorn, T. Ishimaru, K. Hara, and S. Mahasandana, “Considering the effects of ambient particulate matter on the lung function of motorcycle taxi drivers in Bangkok, Thailand,” *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 68, no. 2, pp. 139–145, 2018.
- [11] C. Lv *et al.*, “The impact of airborne particulate matter on pediatric hospital admissions for pneumonia among children in Jinan, China: A case-crossover study,” *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 67, no. 6, pp. 669–676, 2017.

- [12] E. Mannshardt *et al.*, “Analysis of short-term ozone and PM_{2.5} measurements: Characteristics and relationships for air sensor messaging,” *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 67, no. 4, pp. 462–474, 2017.
- [13] R. E. Wyzga and A. C. Rohr, “Long-term particulate matter exposure: Attributing health effects to individual PM components,” *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 65, no. 5, pp. 523–543, 2015.
- [14] World Health Organization, “WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide,” *Geneva: World Health Organization*. WHO World Health Organization, Geneva, Switzerland, pp. 1–22, 2006.
- [15] K. Adams, D. S. Greenbaum, R. Shaikh, A. M. van Erp, and A. G. Russell, “Particulate matter components, sources, and health: Systematic approaches to testing effects,” *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 65, no. 5, pp. 544–558, 2015.
- [16] E. Behrentz *et al.*, “Measuring self-pollution in school buses using a tracer gas technique,” *Atmos. Environ.*, vol. 38, no. 23, pp. 3735–3746, 2004.
- [17] S. Zhu, P. Demokritou, and J. Spengler, “Experimental and numerical investigation of micro-environmental conditions in public transportation buses,” *Build. Environ.*, vol. 45, no. 10, pp. 2077–2088, 2010.
- [18] X. Jin, L. Yang, X. Du, and Y. Yang, “Particle transport characteristics in the micro-environment near the roadway,” *Build. Environ.*, vol. 102, pp. 138–158, 2016.
- [19] F. Murena, G. Favale, S. Vardoulakis, and E. Solazzo, “Modelling dispersion of traffic pollution in a deep street canyon: Application of CFD and operational models,” *Atmos. Environ.*, vol. 43, no. 14, pp. 2303–2311, 2009.
- [20] Y. Tominaga and T. Stathopoulos, “CFD modeling of pollution dispersion in a street canyon: Comparison between LES and RANS,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 99, no. 4, pp. 340–348, 2011.
- [21] Y. Yan, X. Li, L. Yang, and J. Tu, “Evaluation of manikin simplification methods for CFD simulations in occupied indoor environments,” *Energy Build.*, vol. 127, pp. 611–626, 2016.
- [22] C. Belis *et al.*, *Current European AQ planning at regional and local scale*, no. 9783319333489. 2017.
- [23] B. Sportisse, *Pollution atmosphérique. Des processus à la modélisation*, 1st ed. Paris, France: Springer, 2007.
- [24] M. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, *Manual de diseño*

- de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*, 1st ed. Bogotá D.C., 2010.
- [25] M. Guevara, F. Guevara, J. Méndez, and L. Belalcázar, "Spatial and Temporal Assessment of Particulate Matter Using AOD Data from MODIS and Surface Measurements in the Ambient Air of Colombia," *Asian J. Atmos. Environ.*, vol. 12, no. 2, pp. 165–177, 2018.
- [26] IDEAM, *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011 – 2015*. Bogotá D.C., 2016.
- [27] N. Rojas and B. Galvis, "Relación entre PM_{2.5} y PM₁₀ en la ciudad de Bogotá," *Rev. Ing.*, vol. 22, pp. 54–60, 2005.
- [28] Secretaría Distrital de Ambiente, *Informe Anual de Calidad del Aire 2015*. Bogotá, Colombia: Secretaría Distrital de Ambiente, 2016.
- [29] A. Aggarwal, A. Haritash, and G. Kansal, "Air Pollution Modelling: A review," *Int. J. Adv. Technol. Eng. Sci.*, vol. 2, no. 6, pp. 355–364, 2014.
- [30] I. Institute for Transportation and Development Policy, *BRT Planning Guide: Environmental Performance*. New York, USA, 2018.
- [31] M. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, "Resolución número 610 de 2010," *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá, Colombia, p. 8, 2010.
- [32] C. M. González Duque, "Contaminantes orgánicos persistentes y calidad de aire, avances tecnológicos en modelación de calidad del aire," 2013.
- [33] L. C. Belalcazar, A. Clappier, N. Blond, T. Flassak, and J. Eichhorn, "An evaluation of the estimation of road traffic emission factors from tracer studies," *Atmos. Environ.*, vol. 44, no. 31, pp. 3814–3822, 2010.
- [34] F. A. Guevara Luna, M. A. Guevara Luna, and N. Y. Rojas, "Spatial-temporal Assessment and Mapping of the Air Quality and Noise Pollution in a Sub-area Local Environment inside the Center of a Latin American Megacity: Universidad Nacional de Colombia - Bogotá Campus," *Asian J. Atmos. Environ.*, vol. 12, no. 3, pp. 193–204, 2018.
- [35] E. Behrentz, "Vehicle Self-Pollution Intake Fraction: Children's Exposure to School Bus Emissions," vol. 39, no. 8, pp. 2559–2563, 2005.
- [36] S. Nath and R. S. Patil, "Prediction of air pollution concentration using an in situ real time mixing height model," *Atmos. Environ.*, vol. 40, no. 20, pp. 3816–3822, 2006.
- [37] X. Li, C. Liu, and D. Y. C. Leung, "Development of a k-e model for the

- determination of air exchange rates for street canyons,” *Atmos. Environ.*, vol. 39, pp. 7285–7296, 2005.
- [38] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, “An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method,” *Fluid flow handbook. McGraw-Hill* p. 267, 1995.
- [39] M. Guevara and L. C. Belalcázar, “NGL supersonic separator: modeling, improvement, and validation and adjustment of k-epsilon RNG modified for swirl flow turbulence model,” *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, no. 80, pp. 4–8, 2017.
- [40] R. Sebastian, M. A. Guevara, and L. C. Belalcázar, “CFD Modeling and Evaluation of a Bi-Stable Micro-Diverter Valve,” *Tecnol. y Futur.*, vol. 8, no. 1, pp. 77–84, 2018.
- [41] M. Guevara, “Diseño de un equipo de recuperación de líquidos de gas natural empleando CFD,” 2015.
- [42] M. A. Guevara Luna, “Anexo 4. Teoría Sobre Modelamiento CFD,” Universidad Nacional de Colombia, 2015.
- [43] T. Jiyuan, H. G. Yeoh, and L. Chaoqun, *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*, First Edit. Elsevier, 2008.
- [44] C. Hirsch, *Numerical Computation of Internal and External Flows. Volume 1. Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*, Second Edi. Elsevier, 2007.
- [45] ITDP *et al.*, “Guía de Planificación de Sistemas BRT Autobuses de Tránsito Rápido,” p. 37, 2010.
- [46] D. Hidalgo and P. Graftieaux, “Bus Rapid Transit Systems in Latin America and Asia: Results and Difficulties in 11 Cities,” *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2072, no. 2072, pp. 77–88, 2008.
- [47] J. M. Piccirilo, “Qué es un BRT, o la implementación del Metrobús en la ciudad de Buenos Aires, Argentina,” *Boletín FAL*, vol. 312, no. 8, p. 10, 2012.
- [48] T. SATIENNAM, A. FUKUDA, and R. OSHIMA, “a Study on the Introduction of Bus Rapid Transit System in Asian Developing Cities,” *IATSS Res.*, vol. 30, no. 2, pp. 59–69, 2006.
- [49] L. Wright, “Bus Rapid Transit,” *Transp. Res. Board*, vol. 52, no. 55, pp. 1–88, 2005.
- [50] Y. Cuellar, R. Buitrago-Tello, and L.-C. Belaleazar-Ceron, “Life Cycle Emissions From a Bus Rapid Transit System and Comparision With Other Modes of Passenger Transportation,” *Ct&F-Ciencia Tecnol. Y Futur.*, vol. 6, no. 3, pp. 123–134, 2016.

- [51] Y. Cuéllar, "Las motos contaminan incluso más que Transmilenio, advierte un estudio," Bogotá, 21-Feb-2017.