

**MODELO DE CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN
CORREDORES VIALES DE BOGOTÁ**

Juan Pablo Orjuela Mendoza

Eduardo Behrentz

Asesor

Juan Pablo Bocarejo

Co asesor

Enero 2012

MODELO DE CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN CORREDORES VIALES DE BOGOTÁ

Este trabajo presenta la modelación de dispersión del material particulado menor a 2.5 micras ($PM_{2.5}$) proveniente de fuentes vehiculares en dos zonas de Bogotá. El modelo usa los resultados del algoritmo de cálculo de emisiones del Grupo SUR de la Universidad de los Andes y los alimenta al Modelo de Dispersión Local (VADIS) de la Universidad de Aveiro. Los resultados del modelo se compararon con una campaña de campo realizada por el grupo y muestran que las predicciones del modelo coinciden con los datos recolectados. Dentro de los escenarios modelados se presenta los efectos de la puesta en marcha del Sistema Integrado de Transporte Público en Bogotá (SITP). También se realizaron algunos análisis de sensibilidad asociados a variables como la velocidad del viento y la presencia de árboles en la zona. Los resultados sugieren reducciones en las concentraciones en puntos cercanos a los corredores viales de hasta el 94% con la introducción del SITP en una de las zonas. El análisis de sensibilidad sugiere que la velocidad del viento y la definición de los árboles son variables con efectos locales importantes tanto en el cañón urbano como en la calle abierta.

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Es común ver que en las ciudades en vía de desarrollo las fuentes móviles jueguen un papel importante en el inventario de emisiones de material particulado y Bogotá no es la excepción (Behrentz et al. 2009). Este papel es aún más relevante al analizar el problema a una escala de microambientes debido a la cercanía entre los ciudadanos y las fuentes. Adicionalmente, los espacios urbanos de hoy en día combinan una serie de factores que desfavorecen la dispersión y hacen de los espacios cercanos a los corredores vehiculares, lugares típicos de altas concentraciones de contaminantes (Adams et al. 2001).

La modelación de dispersión de contaminantes es una herramienta compleja pero que puede llegar a ser supremamente útil tanto para científicos como ingenieros y tomadores de decisión relacionados con la calidad del aire. Hasta el momento se han propuesto varios tipos de modelos de dispersión (Holmes y Morawska, 2006; Vardoulakis et al., 2003; Zhu y Hinds, 2005; Colville et al., 2003) y la escogencia de un modelo en particular depende de los objetivos de simulación y de los datos disponibles (Holmes y Morawska, 2006).

El uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) ha sido muy popular dentro de los modelos de dispersión y los resultados han sido alentadores (Borrego et al., 2003; Amorim et al. 2010; Murena et al, 2009; Gidhagen et al., 2003). El cierre de turbulencia más empleado en contextos urbanos ha sido el modelo $k - \epsilon$ para solucionar por métodos numéricos las ecuaciones de Navier-Stokes ponderadas por Reynolds (RANS, por sus siglas en inglés). Estas ecuaciones permiten resolver para

un campo vectorial de vientos en microambientes urbanos de manera que se puede predecir el movimiento de la masa de aire bajo diferentes contextos.

La dispersión en ambientes urbanos se han resuelto por lo general mediante métodos Gaussianos o Lagrangianos, siendo estos últimos los más populares (Xia y Leung, 2001; Oettl et al., 2001). La solución de éstos permite estimar el movimiento de las partículas en un campo de vientos conocido lo que resulta en perfiles de concentración en el espacio. El método de Lagrange juega un papel importante al modelar la dispersión de contaminantes usando modelos CFD y su acople con las soluciones de las RANS ha sido empleado con éxito en el pasado (Borrego et al, 2003).

En 2010 el Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR) de la Universidad de los Andes empezó una cooperación técnica financiada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y dirigida por el Clean Air Institute (CAI) que buscaba estimar los efectos en calidad del aire del Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá – SITP (cooperación técnica ATN/MC-12068-CO). Este proyecto se enmarca dentro de dicha cooperación y busca modelar el efecto de la puesta en marcha del SITP en términos de la concentración de $PM_{2.5}$ en dos zonas de la ciudad. Adicionalmente incluye la modelación de otros escenarios con el ánimo de investigar el efecto de las distintas variables involucradas.

2. METODOLOGÍA

El algoritmo de solución que se empleó en este proyecto es el modelo VADIS, diseñado en la Universidad de Aveiro en Portugal como parte del programa Sustainable Urban Transportation (SUTRA) del departamento de Ambiente y Ordenamiento de la misma universidad. VADIS es un sistema integrado que comprende un módulo de movimiento

de masas de aire y un módulo Lagrangiano de dispersión de contaminantes. El modelo fue diseñado para estimar concentraciones de contaminantes en centros urbanos incluso en condiciones que no favorecen la dispersión como pueden ser la estabilidad térmica y velocidades del viento bajas (SUTRA Project, 2006).

El periodo de análisis seleccionado fue la hora pico de la mañana ya que es un momento crítico de tráfico vehicular y por consiguiente de las concentraciones asociadas a éste. Adicionalmente, es en este momento que la mayor cantidad de ciudadanos estarán expuestos a las concentraciones calculadas.

El modelo VADIS es un algoritmo de solución que resuelve las ecuaciones RANS empleando el cierre k- ϵ para la turbulencia. La Figura 1 muestra un esquema metodológico del funcionamiento de VADIS.

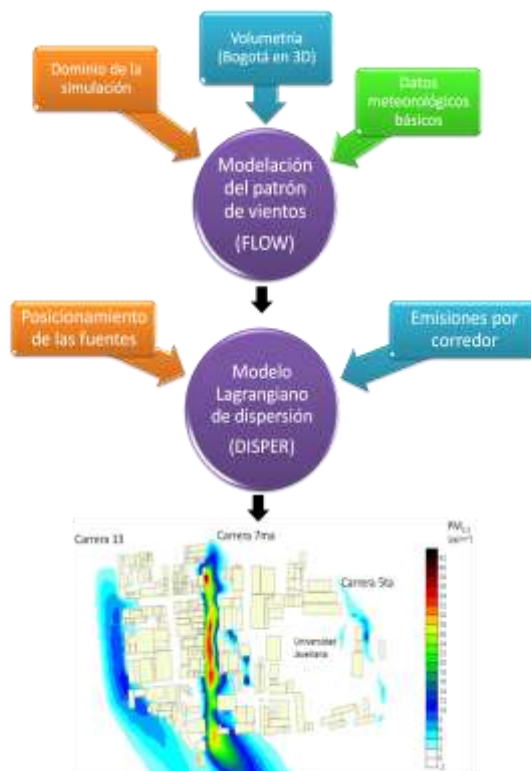


Figura 1. Esquema metodológico de VADIS.

2.1 El módulo FLOW

El programa cuenta con dos módulos independientes denominados FLOW y DISPER. El módulo FLOW resuelve el movimiento general de los vientos en la zona de estudio mediante la solución de las RANS. El cierre de turbulencia escogido es el k-ε como es común en estos modelos (Borrego, et al. 2003) y las ecuaciones a resolver son las que se muestran a continuación:

$$\frac{dk}{dt} = P_k - \epsilon + \nabla \cdot (K \nabla k) \quad (1)$$

$$\frac{d\epsilon}{dt} = P_\epsilon - \epsilon + \nabla \cdot (K \nabla \epsilon) \quad (2)$$

Donde,

$$(3)$$

En las ecuaciones anteriores k y ε representan la energía cinética turbulenta y la disipación de viscosidad respectivamente. U es la velocidad del viento, v_t es la difusividad turbulenta definida según la ecuación (3), y G_k es el término de producción de energía cinética. Las demás variables (C_1 , C_2 , C_3 , C_μ , σ_k , σ_ϵ) son constantes que toman valores típicos de estos modelos. Ri es el número de Richardson.

A continuación se explican una a una las variables de entrada de este módulo.

Dominio de la simulación: Lo primero es definir el área que se pretende modelar. Las Figuras 2 y 3 muestran las Zonas modeladas en este trabajo.

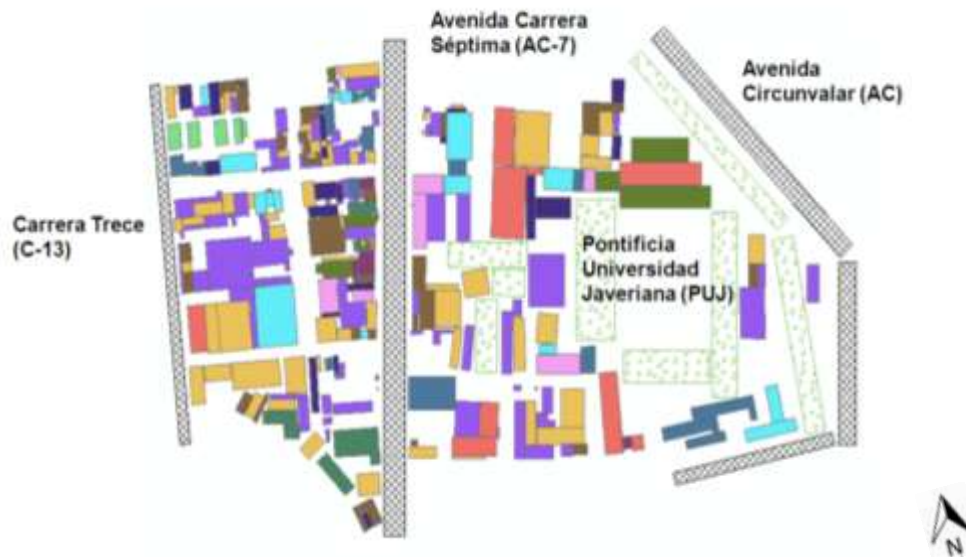


Figura 2. Esquema de la Zona 1 (cañón urbano).

La Zona 1 se encuentra en el nororiente de la ciudad cercana a los cerros orientales de Bogotá. Tiene edificios que superan los quince metros de altura confiriéndole así un carácter de cañón urbano. El área estudiada incluye la Avenida Carrera Séptima (AC-7), uno de los corredores más importantes de la ciudad. La AC-7 recorre la ciudad desde los límites del norte hasta el centro de Bogotá y cuenta con un tráfico mixto de buses de transporte público colectivo y vehículos particulares. El transporte de carga es limitado en este corredor siendo prácticamente inexistente en la hora pico de la mañana. La Zona tiene dos corredores importantes más: La Carrera Trece (C-13) y la Avenida Circunvalar (AC). El flujo del primero está compuesto en su inmensa mayoría por buses públicos mientras que la AC es una vía de transporte privado. Dentro de los lugares de interés en esta Zona se encuentra la Pontificia Universidad Javeriana (PUJ)

que incluye las instalaciones del Hospital Universitario San Ignacio, y una pequeña sede de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

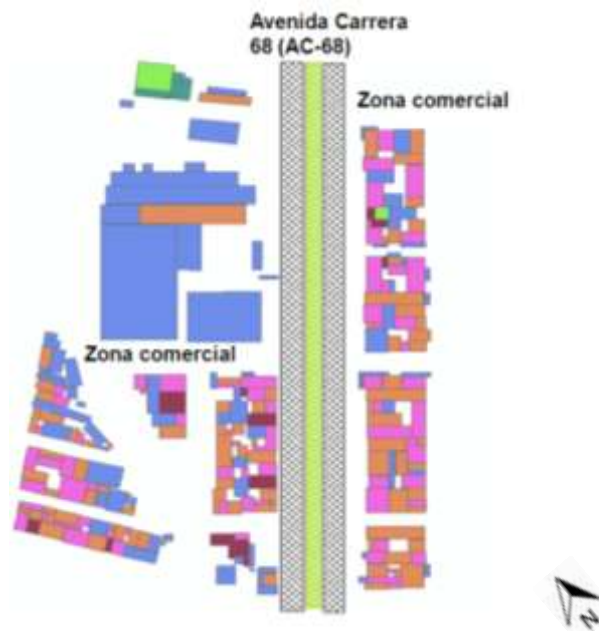


Figura 3. Esquema Zona 2 (calle abierta).

La vía más importante en la Zona 2 es la Avenida Carrera 68 (AC-68) que es uno de los corredores principales del costado occidental de la ciudad. El flujo vehicular es mixto y tiene una participación de los vehículos de carga que supera los 30 camiones por hora. A los dos costados del corredor hay zonas comerciales con locales que rara vez superan los cinco metros de altura. En el separador hay una sección medianamente arborizada que divide la AC-68 entre el sentido Norte-Sur y el sentido opuesto.

Definición espacial de los obstáculos: VADIS permite definir dos tipos de obstáculos: edificaciones y árboles. Una buena definición de los obstáculos en la zona de estudio es fundamental para obtener una representación fiel de los patrones de vientos dentro de dicha área. Para las dos zonas estudiadas en este trabajo la definición de los edificios se logró gracias a la información proporcionada por la Unidad Administrativa

Especial de Catastro de Bogotá. En dicha entidad cuentan con información de toda la ciudad en 3D en archivos tipo KML con un nivel de detalle suficiente. Los archivos en mención cuentan con mapas y alturas relativas de cada una de las edificaciones en la ciudad y se pueden editar en programas tipo SIG. Para la definición de los árboles se realizó una visita a las zonas donde se definieron las dimensiones generales de los árboles necesarias para la modelación como la altura total y la longitud del follaje.

Velocidad y dirección del viento: Para definir las condiciones de contorno es necesario conocer la dirección y velocidad del viento típico para el periodo a modelar. Esta puede venir de datos de una red o una estación meteorológica de la ciudad o de mediciones realizadas en campo para tal fin. Debido a que el proyecto realizado por el SUR contempló una campaña de campo en las zonas modeladas, en este caso se usaron los resultados de dicha campaña como datos de entrada.

2.2 El módulo DISPER

El módulo DISPER resuelve un modelo Lagrangiano de dispersión para las partículas. Este módulo asume que las partículas se distribuyen de manera aleatoria en la vía y en cada paso temporal se desplaza una cantidad determinada por el flujo de aire y una componente estocástica asociada a la teoría de Langevin. La ecuación a resolver en este módulo es la siguiente (Borrego, et al. 2003):

$$\frac{dx}{dt} = u + u' \quad (4)$$

Donde u es una de las tres componentes espaciales de la velocidad, T_L es el tiempo de Lagrange y u' es una componente de la velocidad estocástica.

Las entradas del módulo DISPER son las siguientes:

Campo vectorial de los vientos: Este es la salida del módulo FLOW. Este campo vectorial permite obtener un valor de velocidad y dirección del viento en cualquier punto en el espacio. Con esta información se determina el movimiento instantáneo de las partículas usando el modelo de Lagrange.

Posicionamiento de las fuentes: En este módulo se debe incluir la ubicación relativa de las fuentes. VADIS permite definir los corredores viales como fuentes de área que ocupan un espacio fijo en el tiempo. El programa también permite definir cuantos corredores sea necesario sujeto a la disponibilidad computacional.

Emisiones por corredor: Éstas se estimaron empleando el modelo de emisiones con el que cuenta el grupo. Este modelo tiene una división por categorías vehiculares que permite estimar las emisiones de $PM_{2.5}$ en un corredor conociendo la longitud y la distribución y aforo vehicular. Otras variables como la velocidad promedio o instantánea de los vehículos, la aceleración, el patrón de conducción y la pendiente de la vía se pueden involucrar en el cálculo pero no son necesarios. Los factores de emisión que usa este modelo están basados en el trabajo realizado por Behrentz y Rodriguez (Behrentz y Rodriguez, 2009) en el que determinan dichos factores para distintas categorías vehiculares en Bogotá.

2.3 Escenarios

Para investigar el comportamiento del modelo bajo distintas condiciones se han desarrollado distintos escenarios en las zonas estudiadas. Con la modelación de estos escenarios se buscó la familiarización con VADIS, investigar el efecto de las principales variables involucradas y generar recomendaciones para futuras investigaciones.

2.3.1 Escenario base: El primer escenario que se modeló es el llamado escenario base.

Este escenario busca replicar las condiciones actuales de las zonas estudiadas en la hora pico de la mañana de la manera más fiel según los datos y herramientas disponibles. El aforo vehicular que se alimenta al modelo de emisiones es el resultado de mediciones hechas en campo en el periodo de mayor congestión de la mañana. Igualmente, se realizaron mediciones en campo con un equipo DustTrack de $PM_{2.5}$ que permitió comparar los resultados obtenidos en el modelo con datos reales. Junto con los aforos y las mediciones, se llevó un registro de condiciones meteorológicas (velocidad y dirección del viento) y se usaron éstos datos para alimentar el modelo de dispersión. Los factores de emisión por cada categoría que se emplearon fueron los reportados en el Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá (Behrentz et al., 2011) que se basan en la investigación antes mencionada de Behrentz y Rodriguez (Behrentz y Rodriguez, 2009).

2.3.2 Cambios en las emisiones (Escenario SITP): El segundo escenario mantiene la definición de los obstáculos y los datos meteorológicos inalterados pero hace algunos cambios sustanciales en las emisiones de los corredores principales. Debido a que el proyecto en el que se enmarca esta investigación buscaba, entre otras cosas, la evaluación de los cambios asociados a la implementación del Sistema Integrado de Transporte de Bogotá, se usaron los resultados del modelo de transporte del Grupo SUR para estimar los aforos vehiculares en las zonas de estudio. El modelo de transporte calcula las cargas vehiculares por corredor según la definición de rutas, frecuencias y tipologías de buses definidas por los pliegos y contratos del SITP. En cuanto a los factores de emisión de los buses de transporte público colectivo y masivo se emplearon los reportados por Liu y sus colaboradores (Liu, et al. 2011). Liu realizó

mediciones en ruta de las emisiones de buses Euro IV y calcularon los factores de emisión de los mismos. En Bogotá se espera que los buses que entren en circulación con la puesta en marcha del SITP sean similares a los medios en dicho estudio.

2.3.3 Cambios en la velocidad del viento: Una variable importante en este tipo de modelos es la velocidad del viento que se alimenta a VADIS. En la hora pico de la mañana los vientos en Bogotá tienden a ser lentos y con un alto porcentaje de calmas. Sin embargo, estudiar el efecto del viento en las distintas zonas permite identificar el papel que juega esta variable dentro de la modelación. Se modelaron entonces tres escenarios, correspondientes a la velocidad típica del periodo pico, una velocidad media y una velocidad alta según los registros de las estaciones meteorológicas de la ciudad. Para cada zona se buscó la estación meteorológica más cercana y los valores escogidos fueron el resultado del análisis de los datos reportados por cada estación.

2.3.4 Cambios en la definición de los obstáculos: La última variable que se estudió fueron algunos cambios en los obstáculos de las zonas. En la Zona 1 se realizó una modelación en la que se eliminaron todos los árboles para identificar el efecto que estos tienen en la dispersión de material particulado. En la Zona 2 se definieron distintas alturas de árboles lo que permitió hacer un análisis más detallado del efecto de los obstáculos en la dispersión de los contaminantes.

3. RESULTADOS

Las imágenes que se muestran a continuación muestran la concentración asociada exclusivamente a las fuentes que se han considerado dentro del dominio de simulación. La concentración real será la que se reporta en cada punto más la concentración de fondo. Esta última se estimó a partir de la estación de Kennedy de la Red de Monitoreo

de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) ya que es la única con datos suficientes y validados. Al calcular el promedio de los datos entre 2007 y 2009 en las horas de mayor congestión en la mañana, se obtuvo una concentración de $43.7 \mu\text{g m}^{-3}$ que se seleccionó como la concentración de fondo para las dos zonas. Es posible que este valor este sobreestimado y es importante hacer esfuerzos en el futuro por obtener datos más confiables.

3.1 Zona 1

3.1.1 Escenario base

La Figura 4 muestra el escenario base en la Zona 1.

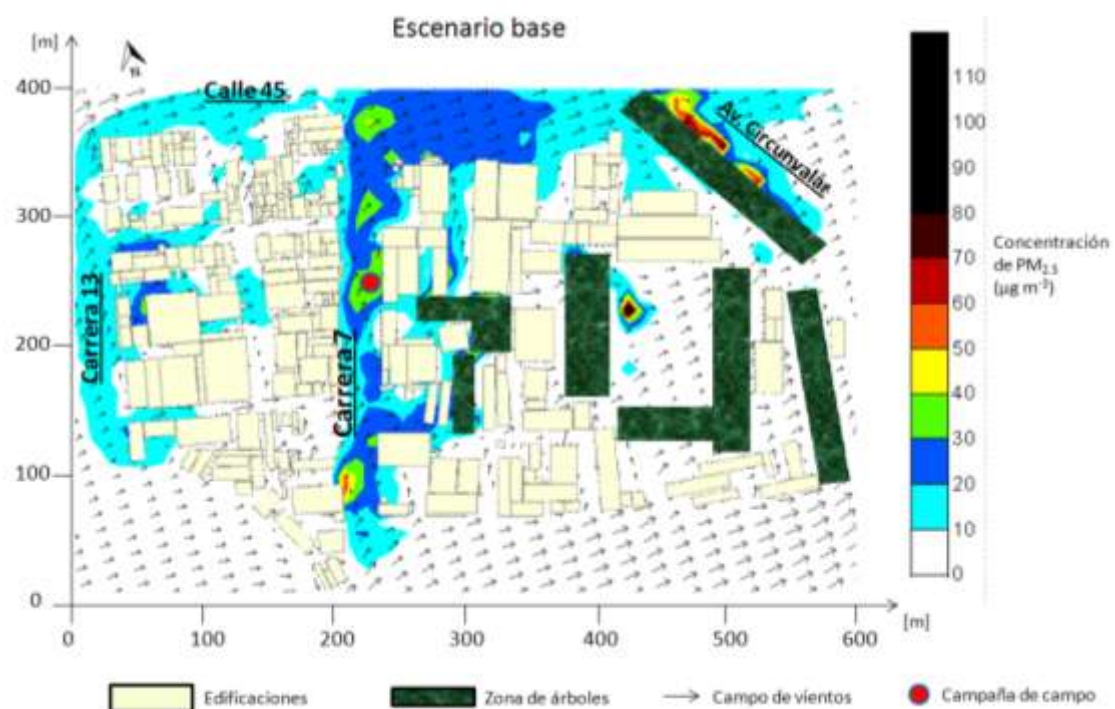


Figura 4. Escenario base Zona 1

En la Figura anterior se puede ver que en algunos puntos la concentración alcanza valores superiores a los $110 \mu\text{g m}^{-3}$. Este valor supera con creces cualquier

normatividad o límite recomendado. Aún así sobre la AC-7 en muy pocos puntos supera los $40 \mu\text{g m}^{-3}$ lo que es alentador. Los resultados del modelo son consistentes con los datos obtenidos en campo como lo muestra la Tabla 1.

Tabla 1. Comparación de los resultados del modelo y la campaña de campo

Zona	Concentración media de la campaña de campo ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Resultado del modelo de dispersión en las coordenadas de la campaña de campo ($\mu\text{g m}^{-3}$)
Avenida Carrera Séptima (AC-7)	86 (78.0 – 94.6)	85

Note que la AC es una vía con unos niveles de concentración llamativamente altos. Si bien las emisiones por metro de vía sobre este corredor son mucho menores que en la AC-7 o la C-13 (ver Tabla 2), los obstáculos impiden una dispersión adecuada, elevando el promedio a algún valor entre 55 y $75 \mu\text{g m}^{-3}$. La zona de árboles aladaña a dicha vía juega sin lugar a dudas un papel fundamental. Por otro lado, aunque las emisiones de la C-13 son altas, las concentraciones que se alcanzan en ese corredor son relativamente bajas. Sin embargo debido a que este corredor es un límite del dominio de la simulación sus resultados no necesariamente representan con precisión la realidad. Note por ejemplo que los obstáculos del costado occidental de la C-13 no están definidos lo que favorece la dispersión del contaminante.

Tabla 2. Emisiones por corredor en el dominio de simulación

Vía	Escenario base		
	AC-7	C-13	AC
Emisiones totales (g hr^{-1})	540	270	20
Emisiones por metro de vía ($\text{g hr}^{-1} \text{m}^{-1}$)	1.4	0.9	0.1

3.1.2. Cambio en emisiones (Escenario SITP)

La Figura 5 muestra el perfil de concentraciones estimado en caso de que se implementara el SITP. El cambio es evidente y se encuentra asociado exclusivamente al cambio en las emisiones en los corredores ya que las condiciones meteorológicas y demás variables se mantienen inalteradas (ver Tabla 3).

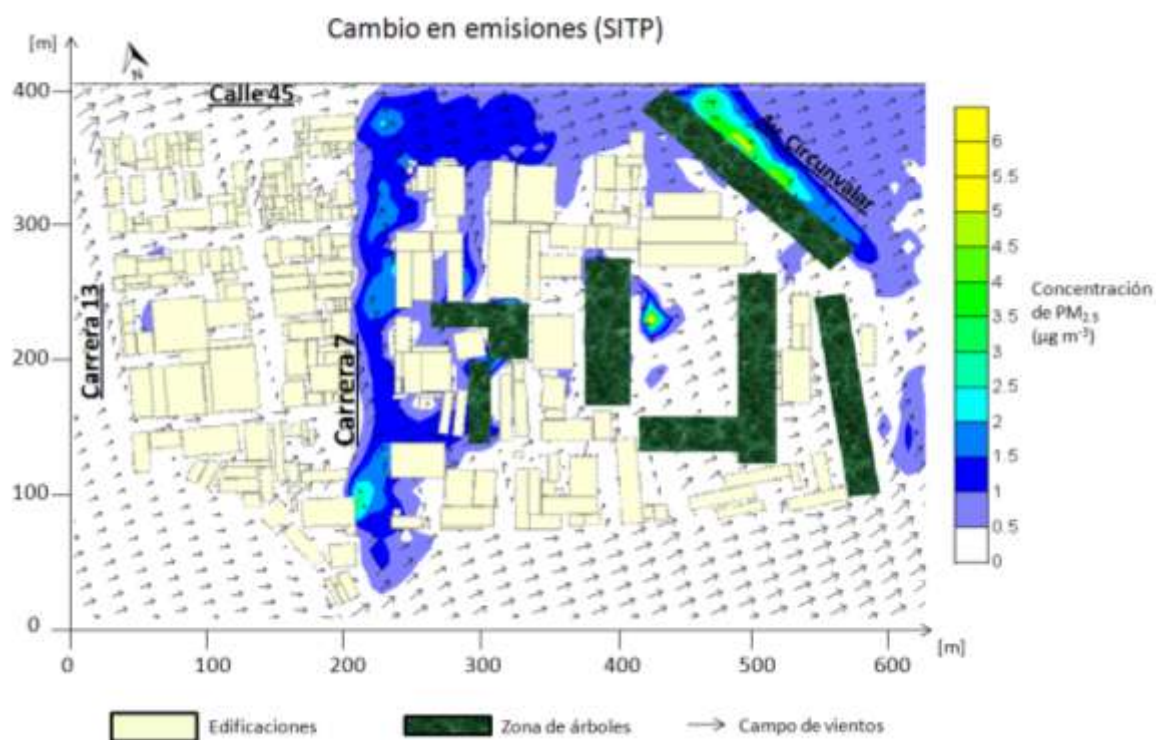


Figura 5. Escenario con las emisiones del SITP en la Zona 1.

Tabla 3. Comparación de emisiones entre los escenarios Base y SITP

	AC-7	C-13	AC	Total
Emisiones Base (g hr ⁻¹)	540	270	20	830
Emisiones SITP (g hr ⁻¹)	18	6	5	32
Cambio porcentual (%)	97%	98%	72%	96%

En este escenario las concentraciones son muchísimo más bajas alcanzando un máximo que no supera los $6.5 \mu\text{g m}^{-3}$. Si bien la AC sigue siendo el corredor de mayor concentración las diferencias son en este caso menos acentuadas. Este cambio drástico en las concentraciones es producto del cambio que implica la puesta en marcha del SITP.

3.1.3 Cambios en la velocidad del viento

Para investigar el efecto de la velocidad de los vientos en la Zona 1 se realizaron dos simulaciones más con dos velocidades un poco más altas que las que se usaron en el escenario base. Las velocidades que se usaron salieron de los resultados de las estaciones meteorológicas en la ciudad y son 2.5 ms^{-1} y 3.5 ms^{-1} para los escenarios de velocidad media y alta respectivamente (Figuras 6 y 7). Para la velocidad del escenario base se usó un valor típico de 1.12 ms^{-1} , siendo esa la velocidad baja.

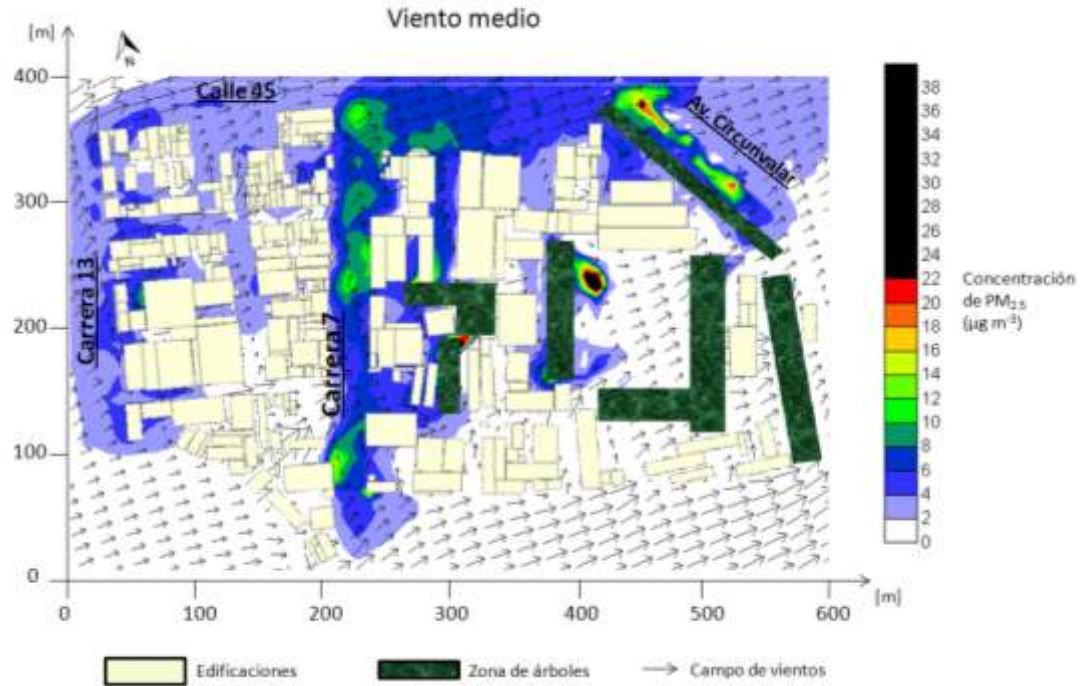


Figura 6. Escenario con velocidad del viento media en la Zona 1.

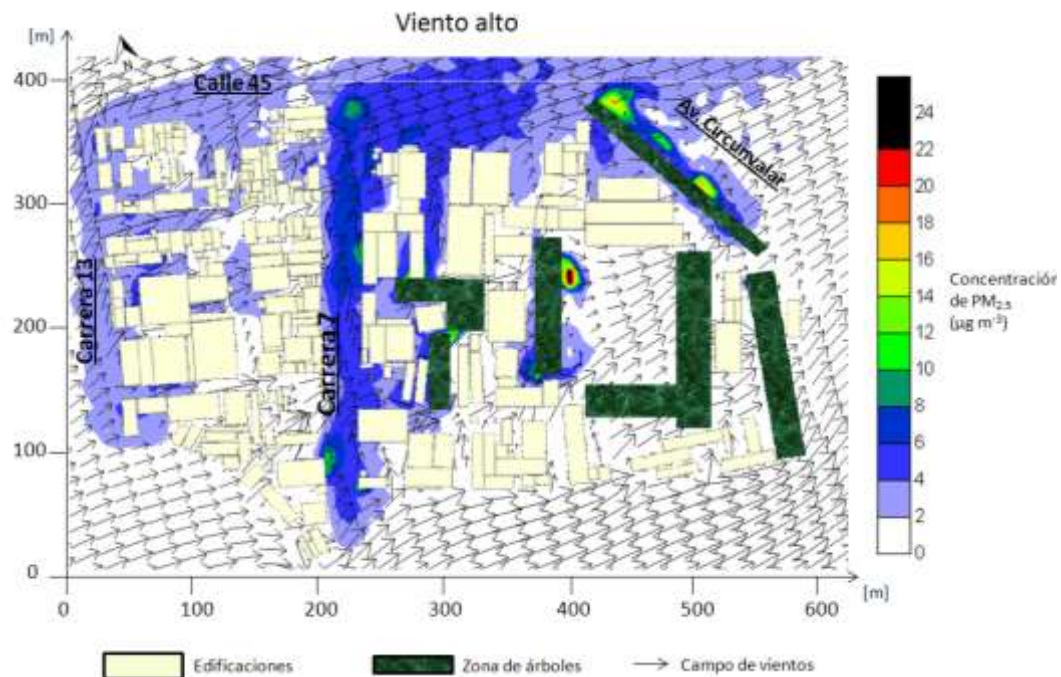


Figura 7. Escenario con velocidad del viento alta en la Zona 1.

La influencia de la velocidad del viento es evidente. La concentración máxima pasó de $110 \mu g m^{-3}$ a $38 \mu g m^{-3}$ para una velocidad media y a $24 \mu g m^{-3}$ para una velocidad alta.

3.1.4 Cambios en la definición de los obstáculos

La última variable que se investigó en esta zona es la presencia o ausencia de árboles. Los resultados de la modelación en ausencia de árboles se muestran en la Figura 8. Las demás variables como velocidad del viento y emisiones por corredor se mantuvieron iguales a las del escenario base.

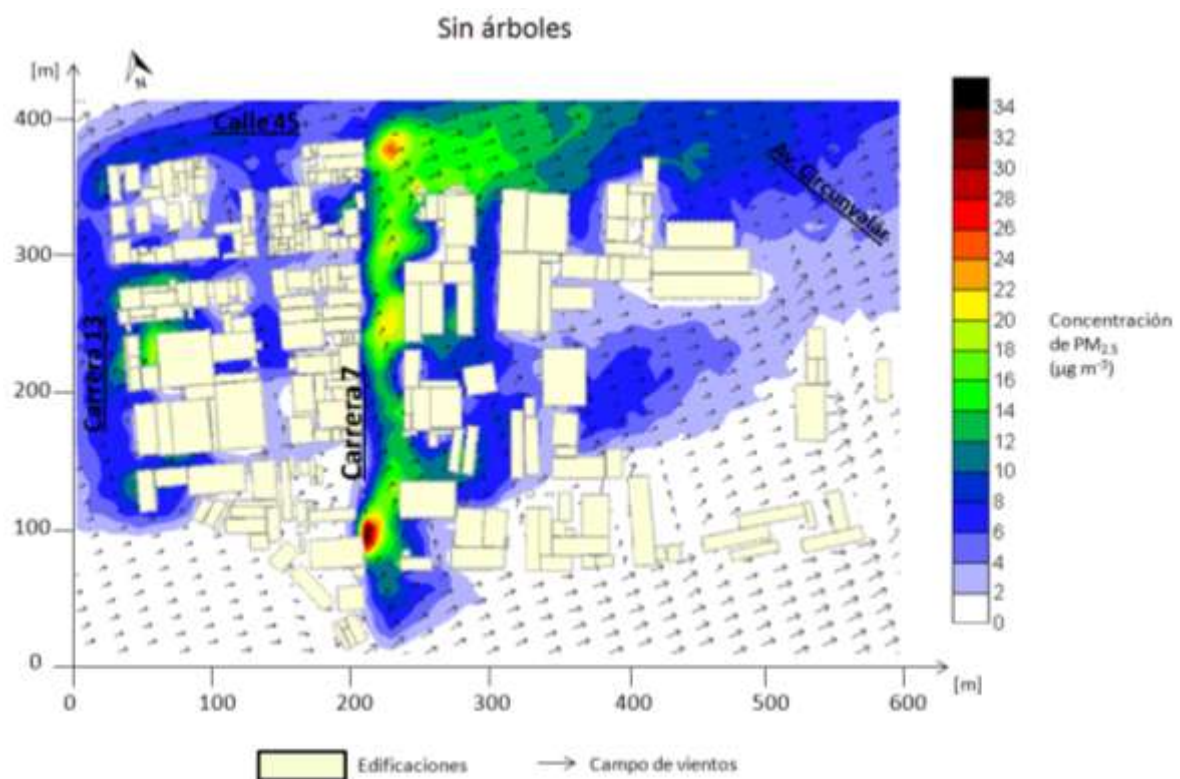


Figura 8. Escenario sin árboles en la Zona 1

Con esta modelación resulta claro el efecto de los árboles sobre la AC. Las emisiones ahora son libres para dispersarse libremente y las concentraciones son claramente más bajas. El comportamiento general en la AC-7 y en la C-13 permanece casi inalterado ya que las grandes zonas de árboles se encuentran viento arriba de dichos corredores.

3.2 Zona 2

La Zona 2 es de unas características distintas ya que sus edificaciones son de una altura mucho menor, hay un solo corredor importante y la zona de árboles es una sola en medio de la AC-68. Los vientos típicos según los resultados recogidos en campo son similares a los de la Zona 1 pero las características de ésta segunda facilitan la dispersión.

3.2.1 Escenario base

La Figura 9 muestra los resultados de ésta Zona en el escenario base.

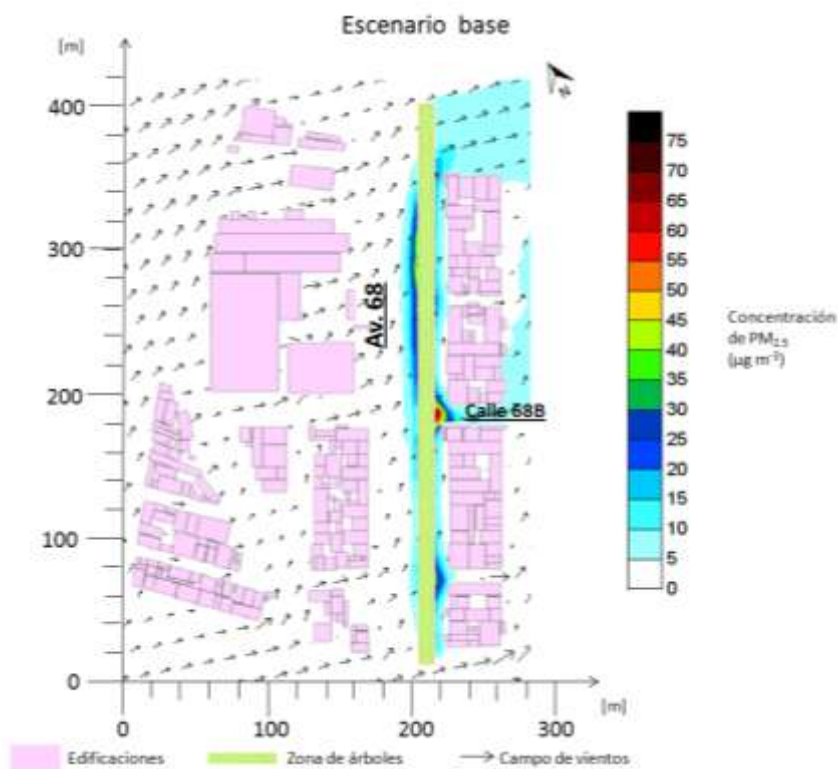


Figura 9. Escenario base Zona 2

En este escenario las concentraciones alcanzan un máximo cercano a los $75 \mu g m^{-3}$ en la intersección de la AC-68 con Calle 68B. Note que las emisiones en los dos sentidos

son similares (Ver Tabla 4) pero las edificaciones del costado oriental generan un pico de concentraciones en la calle 68B.

Tabla 4. Emisiones por corredor en el dominio de simulación

Vía	Escenario base		
	Avenida Carera 68 Sentido Norte-Sur	Avenida Carrera 68 Sentido Sur-Norte	Total
Emisiones totales (g hr ⁻¹)	250	260	510
Emisiones por metro de vía (g hr ⁻¹ m ⁻¹)	0.7	0.7	0.7

En este caso las concentraciones del modelo parecen ajustarse bien a los resultados de la campaña de campo como lo muestra la Tabla 5. Si bien el resultado no se encuentra dentro del intervalo típico de medición sí se encuentra bastante cercano.

Tabla 5. Comparación de los resultados del modelo y la campaña de campo

Zona	Concentración media de la campaña de campo (µg m ⁻³)	Resultado del modelo de dispersión en las coordenadas de la campaña de campo (µg m ⁻³)
Avenida Carrera 68 (AC-68)	71 (64.2 - 77.9)	60

3.2.2. Cambio en emisiones (Escenario SITP)

Al hacer un cambio en las emisiones equivalente a lo que sucedería con el SITP completamente implementado, el resultado es el que muestra la Figura 10.

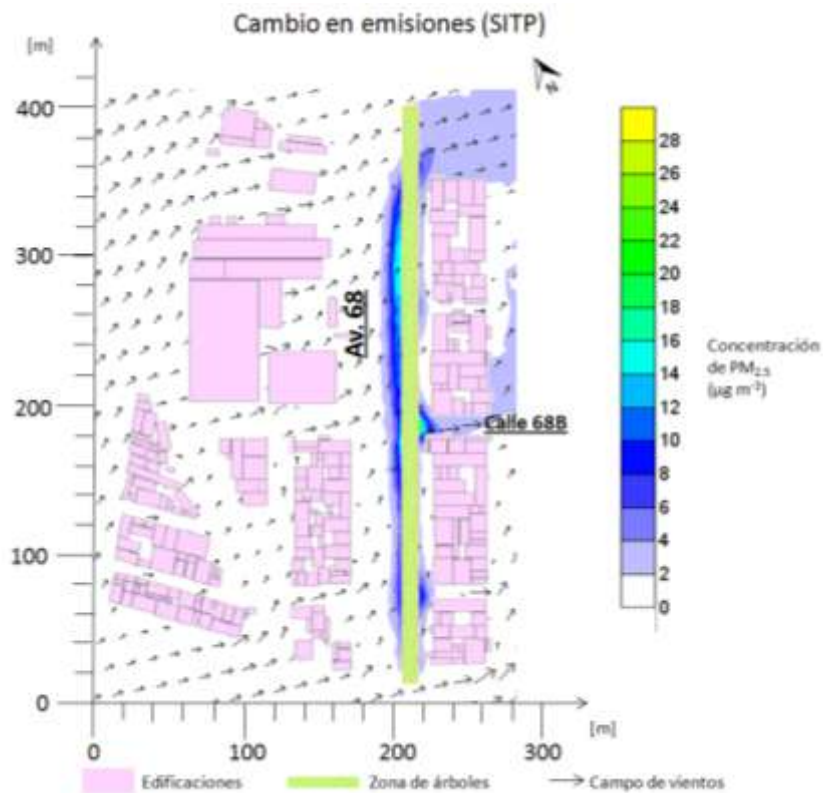


Figura 10. Escenario con las emisiones del SITP en la Zona 2.

Las concentraciones presentan una caída sustancial debido al cambio en las emisiones que se muestra en la Tabla 6. En esta zona los cambios en emisiones no son tan drásticos como en la Zona 1 debido a la contribución de los vehículos de carga que en la AC-68 juegan un papel importante y el SITP no los afecta en lo absoluto.

Tabla 6. Comparación de emisiones entre los escenarios Base y SITP

	AC-68 Norte-Sur	AC-68 Sur- Norte	Total
Emisiones Base (g hr ⁻¹)	250	260	510
Emisiones SITP (g hr ⁻¹)	40	36	76
Cambio porcentual (%)	84%	86%	85%

3.2.3 Cambios en la definición de los obstáculos

El efecto de los árboles en esta Zona es muy importante debido a su posición en el medio de la vía. Las Figuras 11 a 14 muestran el efecto de usar diferentes tamaños de árboles o quitarlos por completo.

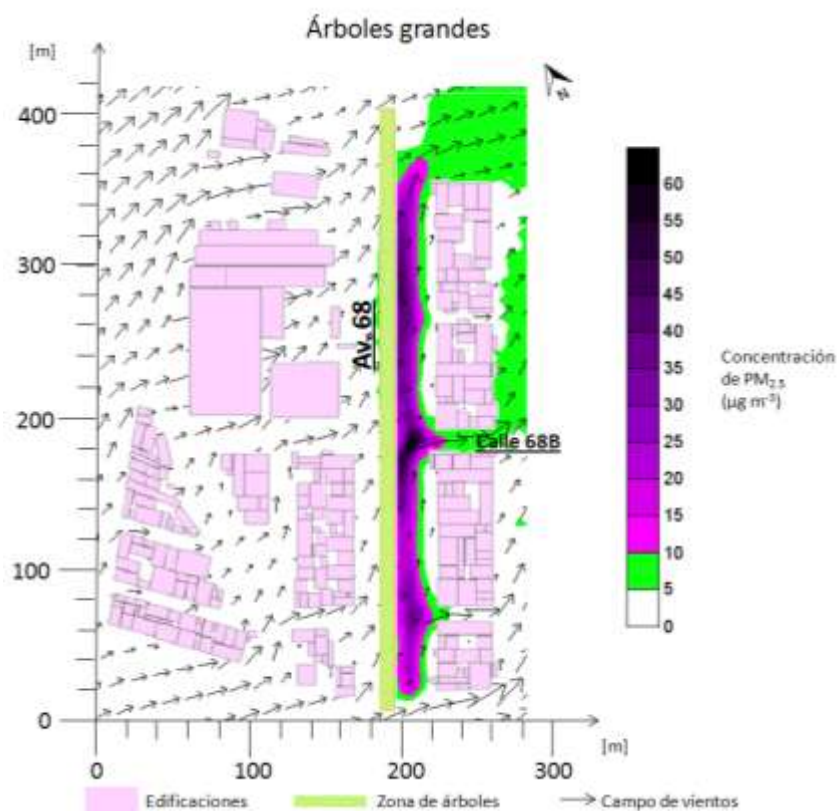


Figura 11. Zona 2 con árboles de 8 metros de altura.

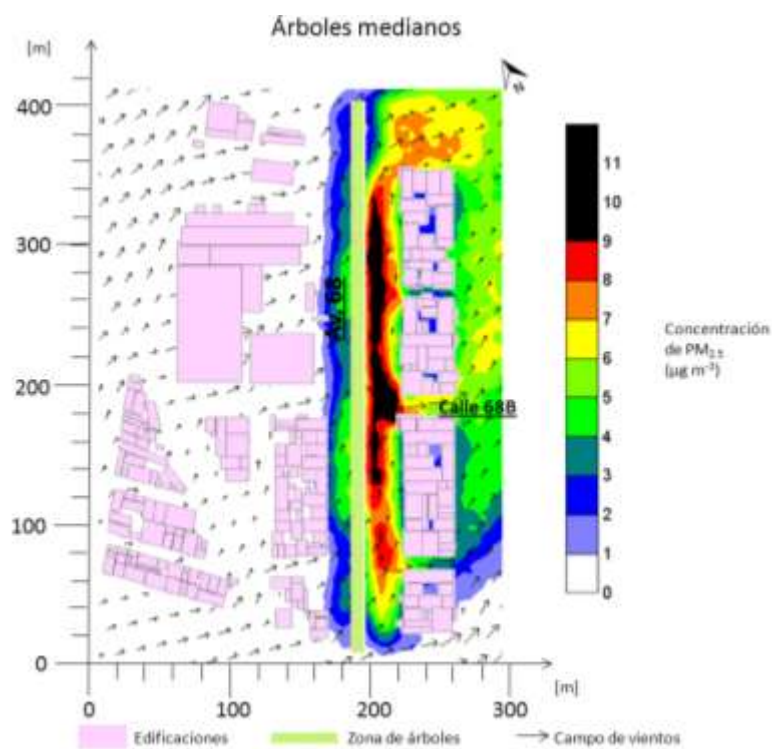


Figura 12. Zona 2 con árboles de 6 metros de altura.

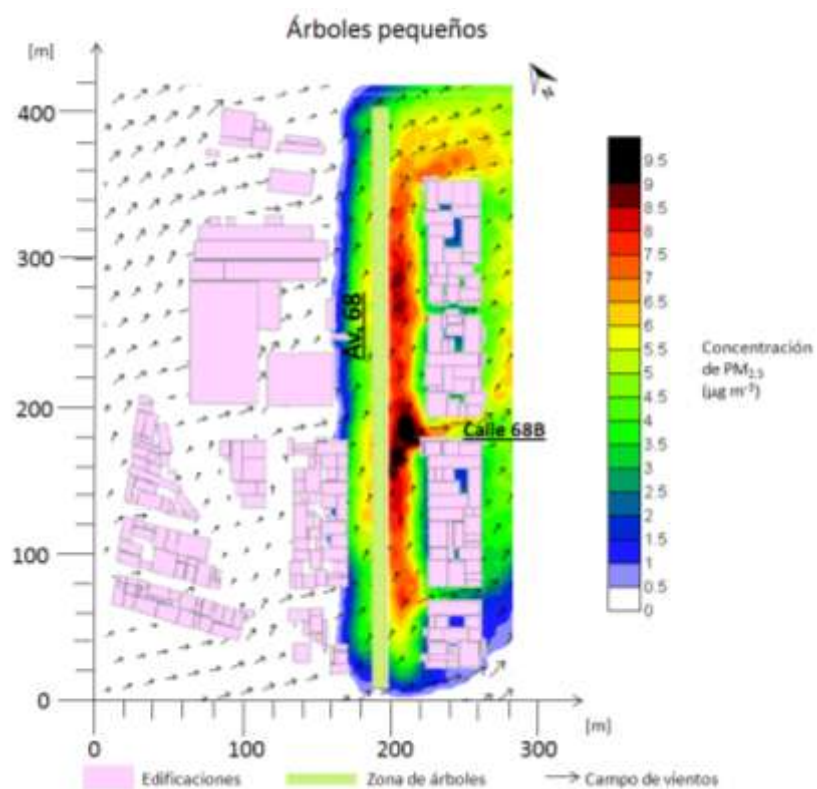


Figura 13. Zona 2 con árboles de 3 metros de altura

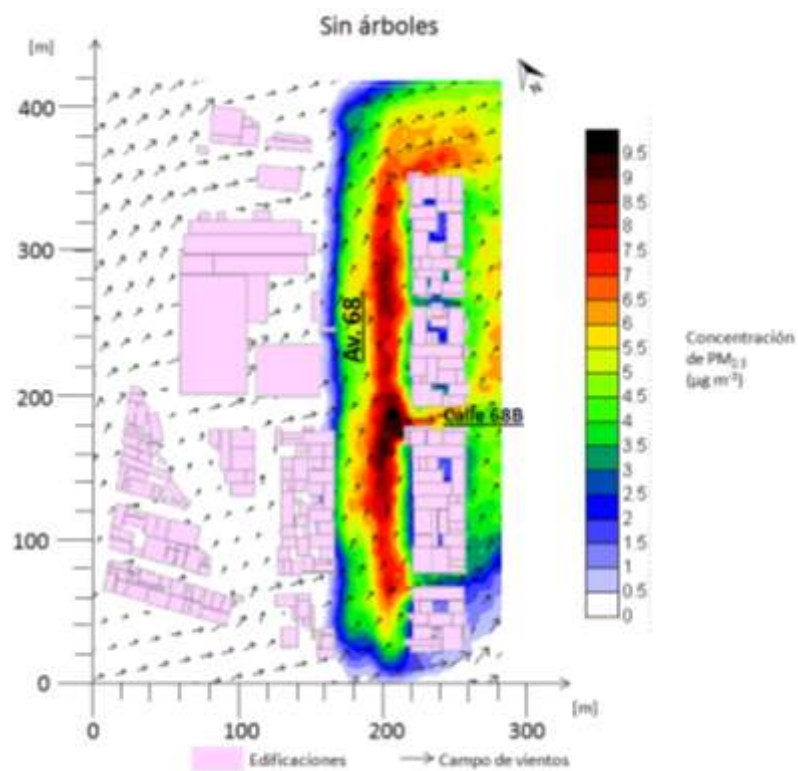


Figura 14. Zona 2 sin árboles

Note que a medida que sube la altura de los árboles se reduce la dispersión en la Zona y aumenta la concentración máxima, variando desde $9.5 \mu\text{g m}^{-3}$ en ausencia de árboles hasta $60 \mu\text{g m}^{-3}$ en el caso de los árboles más altos.

3.2.4 Cambios en la velocidad del viento

Adicionalmente se realizaron algunos cambios con la velocidad de los vientos. La Figura 15 presenta el efecto que esta variable tiene en la Zona 2 para tres velocidades de vientos diferentes.

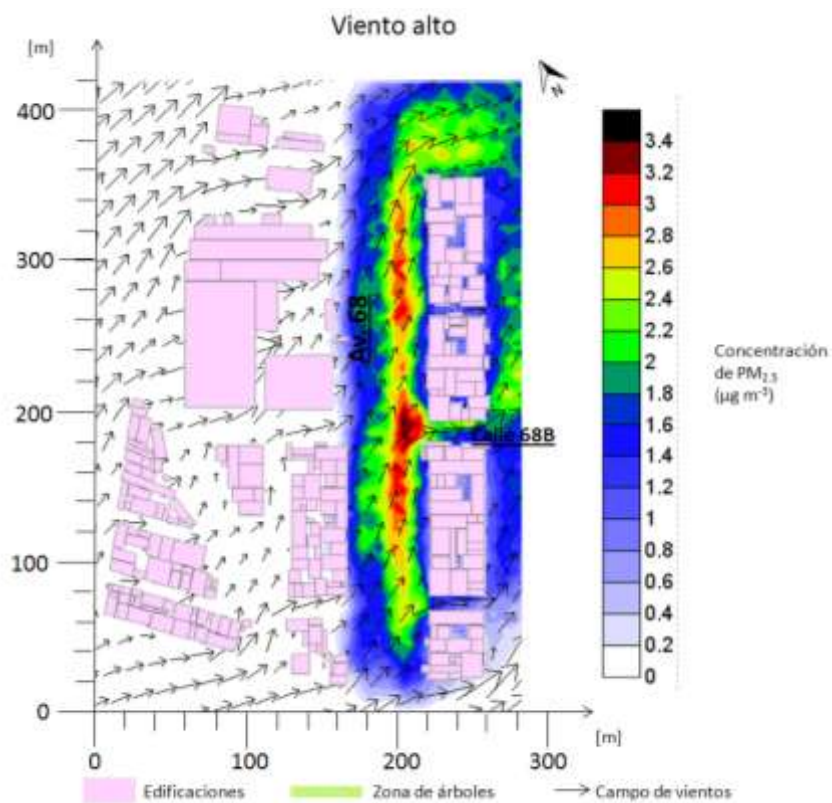


Figura 15. Zona 2 con vientos de 3.5 ms^{-1}

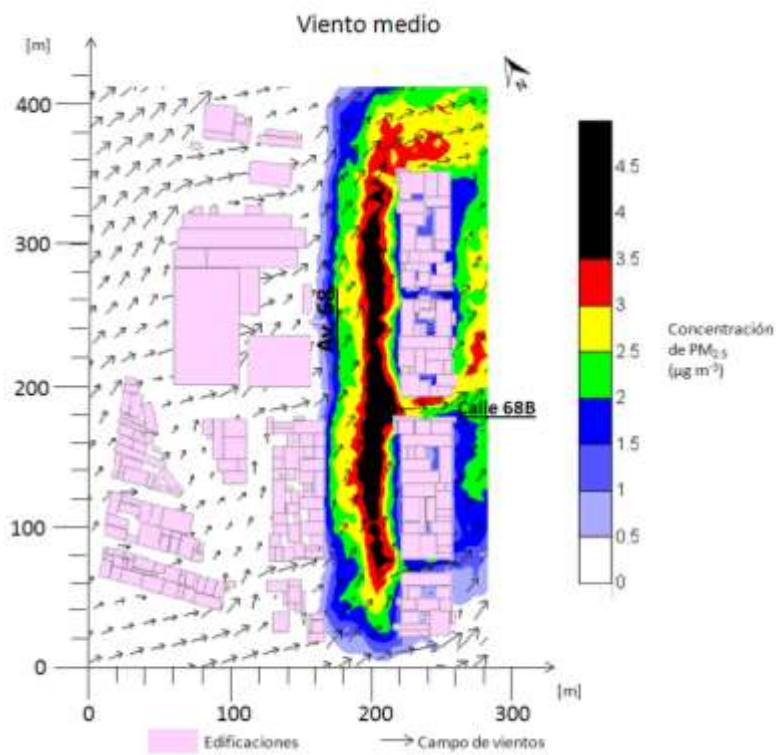


Figura 16. Zona 2 con vientos de 2.5 ms^{-1}

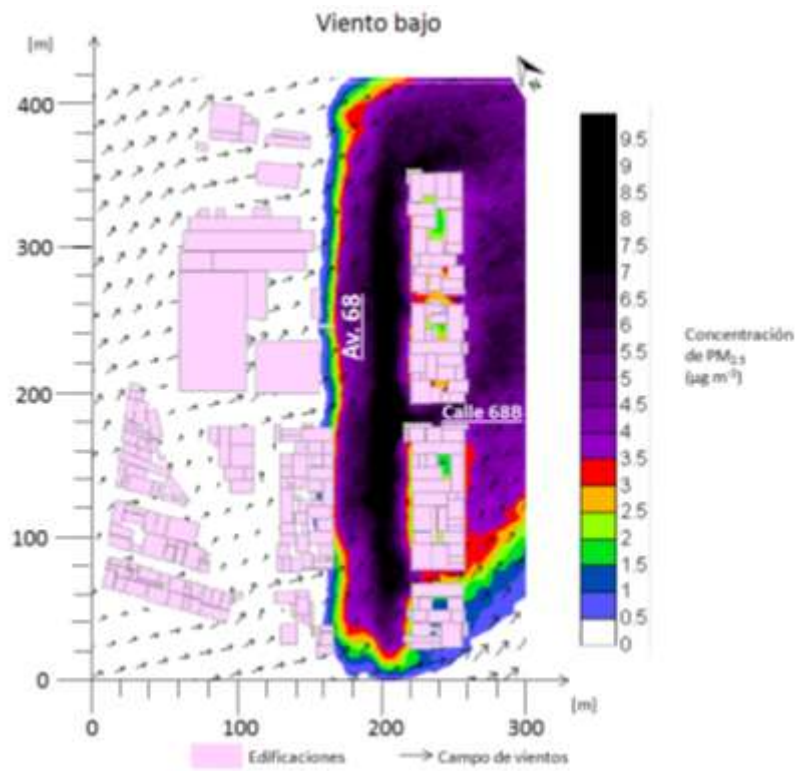


Figura 17. Zona 2 con vientos de 1.12 ms^{-1}

La velocidad del viento tiene un impacto muy importante sobre la Zona como lo reflejan las imágenes de resultados. A medida que la velocidad aumenta la dispersión mejora como era de esperar.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

4.1 Emisiones

Al mantener todas las demás variables constantes el cambio en las emisiones tiene un impacto sustancial en las concentraciones de las dos Zonas. La concentración promedio bajó en un 95% y 63% en la Zona 1 y la Zona 2 respectivamente. Estos resultados son consistentes con las reducciones en emisiones que fueron del 96% y 85%.

Un cambio importante es el porcentaje del área que supera la concentración de referencia de $50 \mu\text{g m}^{-3}$. Se usó este valor ya que es la norma diaria nacional de $\text{PM}_{2.5}$ y teniendo en cuenta que ya hay una concentración de fondo de $43.7 \mu\text{g m}^{-3}$. En la Zona 1 se superaba la norma en la mitad del área y con la implementación del SITP no alcanza el 0.1%. En la Zona 2 se reduce en más de la mitad el área que supera este valor como se puede ver en la Tabla 7.

Tabla 7. Indicadores de cambios asociados a las emisiones.

	Zona 1		Zona 2	
	Sin SITP	Con SITP	Sin SITP	Con SITP
Promedio	9.0	0.46	3.1	1.2
Desviación estándar	10.3	0.61	7.3	2.8
Porcentaje del área con concentración mayor a $50 \mu\text{g m}^{-3}$	50%	0%	12%	5%
Concentración máxima ($\mu\text{g m}^{-3}$)	140	9	82	31
Concentración en el punto de la campaña de campo ($\mu\text{g m}^{-3}$)	41	2	16	6

4.2 Vientos

La velocidad de los vientos también tiene un impacto significativo tanto en las concentraciones promedio como en las concentraciones en un sólo punto (punto de la campaña de campo). La tendencia es claramente inversa como era de esperar (e.d. a mayor velocidad menor concentración). Sin embargo, resulta interesante que los cambios son más marcados en la Zona 1 que en la Zona 2. Teniendo en cuenta que la Zona 2 es una calle abierta y la Zona 1 un cañón urbano, se creía que la velocidad del viento afectaría más a la Zona 2 más esto no fue así.

A pesar de lo anterior, en la Zona 1 incluso con vientos altos, cuando menos el 6% de la Zona supera la concentración de referencia. En la Zona 2 por lo contrario, al tener vientos medios ya se tienen concentraciones aceptables en toda el área.

Tabla 8. Indicadores de cambios asociados a la velocidad del viento.

	Zona 1			Zona 2		
	Alto	Medio	Bajo	Alto	Medio	Bajo
Promedio	2.4	3.1	5.7	0.7	0.9	1.9
Desviación estándar	2.6	3.5	6.4	0.9	1.2	2.6
Porcentaje del área con concentración mayor a $50 \mu\text{g m}^{-3}$	5%	13%	34%	0%	0%	9%
Concentración máxima ($\mu\text{g m}^{-3}$)	44	66	100	4	5	11
Concentración en el punto de la campaña de campo ($\mu\text{g m}^{-3}$)	8	12	20	3	3	7

4.3 Obstáculos

El cambio de los árboles tiene un impacto mucho menos llamativo según los indicadores seleccionados que las otras dos variables. En el caso de la Zona 1, debido a que el cambio fue drástico y que en esta Zona había una relación evidente entre la presencia de árboles y la concentración sobre la AC, la concentración promedio cambió de más del 43% y la concentración máxima pasó de $140 \mu\text{g m}^{-3}$ a $40 \mu\text{g m}^{-3}$. Sin embargo, éste no es el caso en la Zona 2 en la que la concentración promedio osciló entre $1.75 \mu\text{g m}^{-3}$ y $1.90 \mu\text{g m}^{-3}$. Note también que la tendencia no es constante ya que con árboles pequeños la concentración promedio es mayor que con árboles grandes pero menor que con árboles medios. Sin embargo, debido a la proximidad entre los árboles y las emisiones, a medida que crece el tamaño de los árboles crece también el valor de la concentración máxima.

El cambio en el punto de la campaña de campo en la Zona 1 está asociado a que aunque el punto está ubicado viento arriba de las grandes zonas arborizadas, justo al lado del punto de la campaña había un pequeño árbol que se incluyó en el modelo. Al

retirar un obstáculo tan cercano la dispersión se favoreció y la concentración cayó un 40%.

En la Zona 2 el punto de la campaña de campo se encuentra viento arriba de los árboles, de manera que el cambio entre los escenarios es un poco más sutil, como se puede ver en la Tabla 9. Otro punto que también llama la atención es el porcentaje del área que supera la concentración de referencia. Estos porcentajes no cambian de manera especial en ninguna de las dos Zonas.

Tabla 9. Indicadores de cambios asociados a los obstáculos.

	Zona 1		Zona 2		
	Con árboles	Sin árboles	Árboles altos	Árboles medios	Árboles bajos
Promedio	9.1	5.2	1.8	1.9	1.9
Desviación estándar	10.3	4.7	4.4	2.7	2.6
Porcentaje del área con concentración mayor a $50 \mu\text{g m}^{-3}$	50%	32%	12%	10%	9%
Concentración máxima ($\mu\text{g m}^{-3}$)	140	40	67	12	11
Concentración en el punto de la campaña de campo ($\mu\text{g m}^{-3}$)	41	25	12	6	7

Un cambio importante asociado a la redefinición de los obstáculos se ve en la distribución de las concentraciones. Las Figuras 18 y 19 muestran en el eje x el número de desviaciones estándar a las que se encuentra un dato cualquiera del promedio. El eje y muestra el porcentaje de los datos que se encuentran a determinado número de desviaciones estándar del promedio. Esta gráfica permite tener una idea de la dispersión de los datos ya que entre más datos se tengan lejos del promedio, más disperso será el escenario.

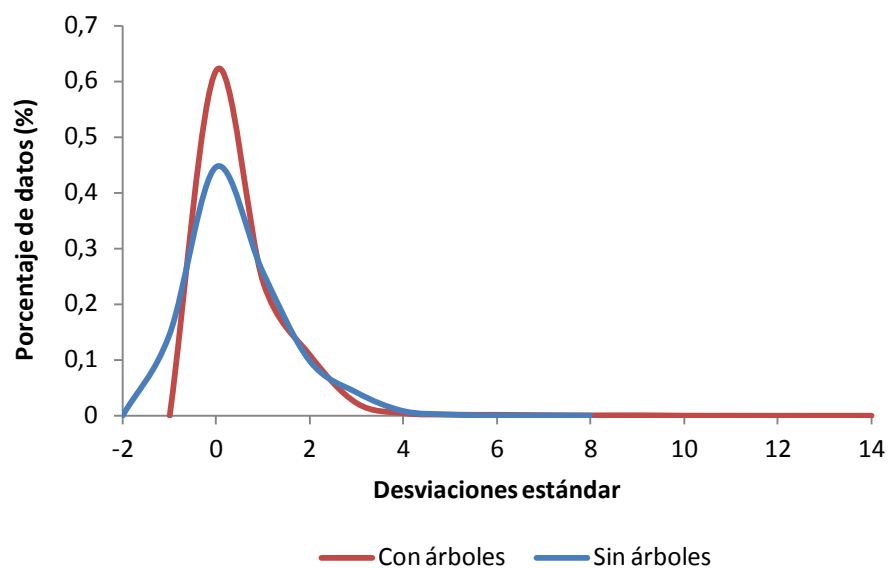


Figura 18. Efecto en la distribución de los datos de la presencia o ausencia de árboles en la Zona 1.

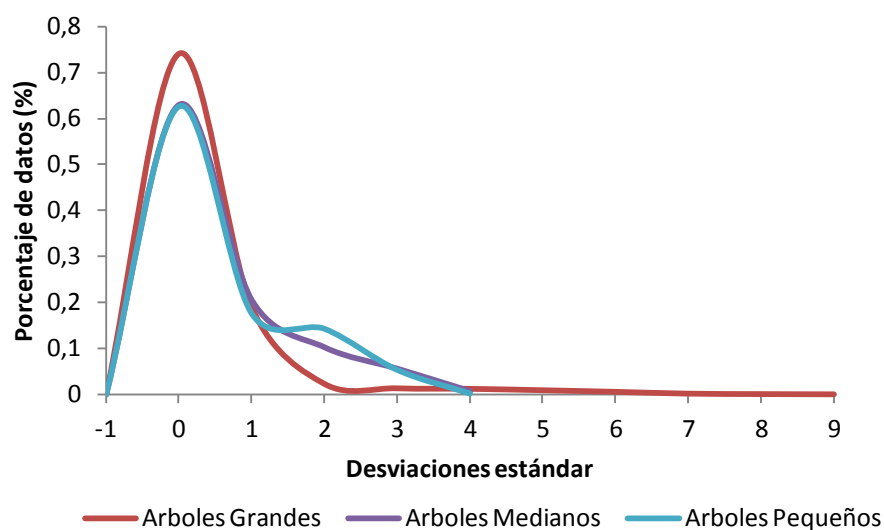


Figura 19. Efecto en la distribución de los datos del tamaño de los árboles en la Zona 2.

En las dos Zonas, la presencia de árboles está asociada a una menor dispersión de los datos agrupando los resultados más cerca al promedio. Como era de esperar, los resultados sugieren que los árboles impiden la dispersión de los contaminantes en las Zonas estudiadas.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un modelo CFD para dos Zonas en Bogotá que permite estimar la concentración de material particulado inferior a 2.5 micras con cierto nivel de precisión. Al comparar los resultados con datos recogidos en campo la diferencia se encuentra dentro de un rango razonable de incertidumbre.

El modelo permite simular escenarios hipotéticos y estimar beneficios asociados a políticas de transporte como la implementación del SITP en Bogotá. El éxito de estas predicciones dependerá en gran medida de la estimación de las emisiones como se puede observar de los resultados de los escenarios propuestos.

A pesar de que el análisis se realizó en zonas cercanas a las fuentes y para vientos relativamente bajos, los escenarios de cambio en la velocidad del viento sugieren que esta variable es fundamental en la predicción adecuada de la concentración. Un pequeño cambio en los vientos resulta en cambios importantes en la concentración en las dos Zonas sin importar si es cañón urbano o calle abierta.

Los árboles juegan un papel fundamental en las distribuciones de las concentraciones en las distintas Zonas. Su efecto puede ser una sobreestimación o subestimación de las concentraciones según sea el caso de manera que una correcta definición de éstos será importante en el momento de generar nuevos escenarios.

La presencia de árboles desfavorece la dispersión de los contaminantes. Esto implica que una arborización en la zona correcta puede servir como barrera natural para evitar que los contaminantes alcancen zonas críticas. Sin embargo, puede ocurrir lo contrario causando concentraciones elevadas en zonas cercanas a las fuentes.

La concentración de fondo puede llegar a ser una fracción importante de la concentración total en un punto dado. Prueba de lo anterior es que la concentración de fondo se estimó en $43.7 \mu\text{g m}^{-3}$ y en ningún escenario se calculó una concentración promedio superior a los $10 \mu\text{g m}^{-3}$.

6. RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS

El papel de la concentración de fondo es muy importante para la toma de decisiones. Se puede contar con un modelo bien calibrado y que predice muy bien las distribuciones de concentración asociadas a las fuentes definidas, pero sin una concentración de fondo realista será difícil tomar decisiones basadas en el impacto a la salud de los ciudadanos. Debido a que la información en la RMCAB es tan limitada, se sugiere buscar métodos experimentales que permitan determinar este valor de manera más precisa. Se debe considerar la inclusión de concentraciones de fondo distintas para cada zona de estudio.

La correcta estimación de las emisiones es fundamental para el resultado final de las concentraciones del modelo. Si bien este proyecto se realizó basado en un modelo de emisiones existente, se recomienda perfeccionar dicho modelo de manera que incluya términos para el material resuspendido y de formación secundaria.

En este proyecto se modelaron Zonas relativamente grandes lo que no solo demora la obtención de resultados debido a los requisitos computacionales, sino que obliga a usar grillas gruesas. Si bien para los objetivos de éste proyecto una grilla formada por cuadrados de 3 metros de lado resultó suficiente, esto impidió hacer análisis más profundos. Por ejemplo la puesta en marcha de un sistema BRT como TransMilenio en Bogotá tiene un efecto en la dispersión de contaminantes en parte asociado al

distanciamiento de las fuentes y los peatones. Con grillas gruesas, este efecto no se puede considerar.

7. REFERENCIAS

- Adams, H.S., Nieuwenhuijsen, M.J., Colville, R.N., McMullen, M.A.S., Khandelwal, P. 2001. Fine Particle (PM_{2.5}) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK. *The Science of the Total Environment* 279, 29-44.
- Amorim, J.H., Lopes, M., Borrego, C., Tavares, R., Miranda, A.I. 2010. Air quality modelling as a tool for sustainable urban traffic management. Department of Environment and Planning, University of Aveiro.
- Behrentz, E., Benavides, J., Bocarejo, J.P., Canal, M. 2010. Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá. Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Borrego, C., Tchapel, O., Costa, A.M., Amorim, J.H., Miranda, A.I. 2003. Emission and dispersion modelling of Lisbon air quality at local scale. *Atmospheric Environment* 37, 5197 - 5205.
- Colville, R.N., Gómez-Perales, J.E., Nieuwenhuijsen, M.J. 2003. Use of dispersion modelling to assess road-user exposure to PM_{2.5} and its source apportionment. *Atmospheric Environment* 37, 2773 - 2782.
- Gidhagen, L., Johansson, C., Langner, J., Olivares, G. 2004. Simulation of NO_x and ultrafine particles in a street canyon in Stockholm, Sweden. *Atmospheric Environment* 38, 2029 - 2044.
- Holmes, N.S., Morawska, L. 2006. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. *Atmospheric Environment* 40, 5902 - 5928.
- Liu, Z., Ge, Y., Johnson, K.C., Naeem, A., Tan, J., Wang, C., Yu, L. 2011. Real-world operation conditions and on-road emissions of Beijing diesel buses measured by using portable emission measurement system and electric low-pressure impactor. *Science of the Total Environment* 409, 1476 - 1480.
- Murena, F., Favale, G., Vardoulakis, S., Solazzo, E. 2009. Modelling dispersion of traffic pollution in a deep street canyon: Application of CFD and operational models. *Atmospheric Environment* 43, 2303 - 2311.
- Oettl, D., Kukkonen, J., Almbauer, R. A., Sturm, P.J., Pohjola, M., Härkönen, J. 2001. Evaluation of a Gaussian and a Lagrangian model against a roadside data set, with emphasis on low wind speed conditions. *Atmospheric Environment* 35, 2123 - 2132.
- Rodríguez, P., Behrentz, E. 2009. Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá a través de mediciones directas. Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR), Universidad de los Andes.
- SUTRA Project. 2006. VADIS Street Canyon Model - Methodology description. Deliverable D04.3

Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K., Gonzalez-Flesca, N. 2003. Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment* 37, 155 - 182.

Xia, J., Leung, D.Y.C. 2001. A concentration correction scheme for Lagrangian particle model and its application in street canyon air dispersion modelling. *Atmospheric Environment* 35, 5779 - 5788.

Zhu, Y., Hinds, W.C., 2005. Predicting particle number concentrations near a highway based on vertical concentration profile. *Atmospheric Environment* 39, 1557 - 1566.



NIT: 860.007.386-1

SISTEMA DE BIBLIOTECAS IDENTIFICACIÓN TRABAJO DE GRADO

FECHA DE ELABORACIÓN		
DD	MM	AAAA
23	01	2012

1. IDENTIFICACIÓN AUTOR(ES) DEL TRABAJO DE GRADO

CÓDIGO	DOCUMENTO DE IDENTIDAD		APELLIDOS	NOMBRES	CORREO ELECTRÓNICO
	TIPO	NÚMERO			
200321369	CC	80870902	ORJUELA MENDOZA	JUAN PABLO	juanpaorjuela@hotmail.co
	CC				
	CC				
	CC				
	CC				
	CC				

PROGRAMA Maestría
FACULTAD Facultad de Ingeniería
DEPARTAMENTO Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

ENTREGA FORMATO:

- ☒ SB-10 "Entrega trabajo de grado y autorización de uso a favor de la Universidad de los Andes".
- SB-10: Documento con el cual, el autor permite que su trabajo sea utilizado por la Universidad, para fines de consulta y de mención en sus catálogos bibliográficos, tanto físicos como en línea.

1.1 IDENTIFICACIÓN DE TRABAJO DE GRADO PARA DOBLE TITULACIÓN

PROGRAMA No Aplica
FACULTAD No Aplica
DEPARTAMENTO No Aplica

TESIS PARA DOBLE TITULACIÓN:

- ☐ Si el trabajo de grado presentado aplica para obtener dos (2) titulaciones, por favor marque esta casilla y diligencie la información de esta sección.

2. INFORMACIÓN GENERAL DEL TRABAJO DE GRADO**TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO:**

Modelo de concentraciones de material particulado en corredores viales de Bogotá

DESCRIPCIÓN FÍSICA

Número de páginas: 36
Ilustraciones: 19

MATERIAL ACOMPAÑANTE (Cantidad):

Casetes Discos compactos: 1
Audio:
Casetes Diapositivas:
Video:
Disquetes: Otros: ¿Cuáles?

FECHA DE ELABORACIÓN

DD	MM	AAAA
23	01	2012

"RESUMEN DEL TRABAJO DE GRADO:

Este trabajo presenta la modelación de dispersión del material particulado menor a 2.5 micras (PM2.5) proveniente de fuentes vehiculares en dos zonas de Bogotá. El modelo usa los resultados del algoritmo de cálculo de emisiones del Grupo SUR de la Universidad de los Andes y los alimenta al Modelo de Dispersión Local (VADIS) de la Universidad de Aveiro. Los resultados del modelo se compararon con una campaña de campo realizada por el grupo y muestran que las predicciones del modelo coinciden con los datos recolectados. Dentro de los escenarios modelados se presenta los efectos de la puesta en marcha del Sistema Integrado de Transporte Público en Bogotá (SITP). También se realizaron algunos análisis de sensibilidad asociados a variables como la velocidad del viento y la presencia de árboles en la zona. Los resultados sugieren reducciones en las concentraciones en puntos cercanos a los corredores viales de hasta el 94% con la introducción del SITP en una de las zonas. El análisis de sensibilidad sugiere que la velocidad del viento y la definición de los árboles son variables con efectos locales importantes tanto en el cañón urbano como en la calle abierta.

OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO:

- Construir un modelo de calidad del aire que permita predecir los cambios en los niveles de inmisión de la ciudad según cambios en el sistema de transporte público de Bogotá
- Realizar análisis de sensibilidad del modelo a ciertas variables que permitan estimar el grado de precisión de los resultados

METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE GRADO:

CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE GRADO:

Revisión de modelos de calidad del aire

Este trabajo presenta un modelo CFD para dos Zonas en Bogotá que permite estimar la concentración de material particulado inferior a 2.5 micras con cierto nivel de precisión. Al comparar los resultados con datos recogidos en campo la diferencia se encuentra dentro de un rango razonable de incertidumbre.

PALABRAS CLAVES (TEMAS) DEL TRABAJO DE GRADO:

Modelación de contaminantes, Computational Fluid Dynamics (CFD), Material Particulado, Cañón urbano

ACUERDOS DE CONFIDENCIALIDAD: ☒ NO TIENE ACUERDO(S) ☐ TIENE ACUERDO(S)

Si selecciona tener acuerdo de confidencialidad, por favor diligencie el siguiente cuadro:

Persona natural o jurídica	Desde	Hasta				
	DD	MM	AAAA	DD	MM	AAAA

3. FIRMAS

AUTORES (Nombre completo)

*FIRMAS

Juan Pablo Orjuela Mendoza

J. P. Orjuela

DIRECTORES / ASESORES (Nombre completo)

*FIRMAS

C. BEHRENG

C. Behrenz

JURADO / LECTOR (Nombre completo)

*FIRMAS

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil
y Ambiental

Las firmas de Autor y Director/Asesor son obligatorias. Si tiene inconvenientes con el registro de la firma del Jurado/Lector, deberá tramitar ante la respectiva Facultad la autorización para registrar las firmas de pares o un sello que justifique la ausencia de la firma faltante.

SB-09

Verificar Información

Imprimir



**ENTREGA EJEMPLAR TRABAJO DE GRADO Y
AUTORIZACIÓN DE SU USO A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**

Yo Juan Pablo Orjuela Mendoza, mayor de edad, vecino de Bogotá D.C., identificado con la Cédula de Ciudadanía N° 80.870.902 de Bogotá, actuando en nombre propio, en mi calidad de autor del trabajo de tesis, monografía o trabajo de grado denominado: Modelo de concentraciones de material particulado en corredores viales de Bogotá

Yo, hago entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos del ser el caso, en formato digital o electrónico (CD-ROM) y autorizo a LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento. PARÁGRAFO: La presente autorización se hace extensiva no sólo a las facultades y derechos de uso sobre la obra en formato o soporte material, sino también para formato virtual, electrónico, digital, óptico, usos en red, internet, extranet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

EL AUTOR - ESTUDIANTES, manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y tiene la titularidad sobre la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, EL ESTUDIANTE - AUTOR, asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Bogotá D.C., a los veinte 20 días del mes de enero de Dos Mil doce 20 12 .

EL AUTOR - ESTUDIANTE.

(Firma)

Nombre Juan Pablo Orjuela Mendoza

C.C. N° 80.870.902 de Bogotá

SB-10