

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL INVENTARIO DE EMISIONES
PROVENIENTES DE LAS FUENTES MÓVILES Y FIJAS DE LA CIUDAD DE
BOGOTÁ, D.C.

NELSON EDUARDO PEÑALOZA PABÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
BOGOTÁ, D.C.
NOVIEMBRE DE 2010

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL INVENTARIO DE EMISIONES
PROVENIENTES DE LAS FUENTES MÓVILES Y FIJAS DE LA CIUDAD DE
BOGOTÁ, D.C.

NELSON EDUARDO PEÑALOZA PABÓN

Trabajo final presentado para optar al título de Maestría en Ingeniería Ambiental

Director:
Néstor Y. Rojas, Ph.D.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
BOGOTÁ, D.C.
NOVIEMBRE DE 2010

Nota de aceptación:

Firma del Director

Firma del Evaluador

Firma del Evaluador

Bogotá, D.C. Noviembre de 2010

“A Dios, a mis maravillosos papás y hermanos; a mis lindos sobrinitos y a mis amigos más cercanos...”

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus más sinceros agradecimientos a:

El convenio 195-08: “*Fortalecimiento y Desarrollo de Herramientas de Modelación Meteorológica y de Calidad del Aire*”, suscrito por Ecopetrol S.A., Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) y la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá; por aportar los recursos económicos y técnicos para desarrollar el presente trabajo final de maestría.

A mi profesor y director del presente trabajo final Ing Nestor Y. Rojas Roa, Ph.D, director del grupo de investigación en calidad del aire, adjunto al Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia (Sede Bogotá); por vincularme a su grupo de investigación y darme la oportunidad de trabajar en este interesante y grandioso proyecto. Y a cada uno de mis compañeros y amigos: Blanquita Oviedo, Juan Pablo Aristizabal Granados, Jan Phillip Robra, Liliana Ardila y Juan David Calderón; quienes aportaron sus ideas, conocimientos, tiempo y dedicación para cumplir con los objetivos estipulados en este trabajo.

CONTENIDO

| | pág |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| 2 METODOLOGÍA..... | 22 |
| 2.1 FASE 1: OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE INFORMACIÓN..... | 22 |
| 2.2 FASE 2: FUENTES MÓVILES | 24 |
| 2.2.1 Definición de parámetros | 28 |
| 2.2.2 Creación de ficheros de entrada (INPUT) | 36 |
| 2.2.3 Distribución espacial y temporal..... | 44 |
| 2.2.4 Evaluación y visualización de resultados finales..... | 45 |
| 2.2.5 Especiación de COVs | 46 |
| 2.3 FASE 3: FUENTES FIJAS..... | 47 |
| 2.3.1 Definición de categorías industriales..... | 48 |
| 2.3.2 Complemento de factores de emisión..... | 49 |
| 2.3.3 Cálculo de emisiones horarias totales..... | 50 |
| 2.3.4 Distribución espacial y temporal..... | 50 |
| 2.3.5 Evaluación y visualización de resultados finales..... | 51 |
| 3 RESULTADOS | 53 |
| 3.1 FASE 2: FUENTES MÓVILES | 53 |
| 3.1.1 Emisiones totales..... | 53 |
| 3.1.2 Distribución espacial y temporal..... | 57 |
| 3.1.3 Especiación de COVs | 60 |
| 3.2 FASE 3: FUENTES FIJAS..... | 61 |
| 3.2.1 Emisiones totales provenientes de las fuentes fijas..... | 61 |
| 3.2.2 Distribución espacial y temporal..... | 63 |
| 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 68 |
| REFERENCIAS | 70 |
| ANEXO 1. Categorías Vehiculares | 77 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ANEXO 2. Valores Máximos para cada Categoría en el Aforo Vehicular | 79 |
| ANEXO 3. Resultados del análisis de los datos del aforo vehicular | 80 |
| ANEXO 4. Factores de Emisión para cada Categoría Vehicular, en cada Categoría vial | 81 |
| ANEXO 5. Categorías Industriales..... | 82 |
| ANEXO 6. Especiación horaria de COVs | 83 |

LISTA DE TABLAS

pág

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 Clasificación y longitud de vías, primera aplicación de EMISENS | 30 |
| Tabla 2 Rango establecido para clasificación de vías principales según flujo vehicular | 31 |
| Tabla 3 Índice de flujo vehicular otorgado a cada uso del suelo de Bogotá D.C. ... | 34 |
| Tabla 4 Longitud total de los segmentos de vías en las diferentes categorías y subcategorías de vías..... | 35 |
| Tabla 5. Numero de fuentes, distancia recorrida y actividad vehicular, año base 2008..... | 37 |
| Tabla 6 Ponderación del flujo vehicular, en cada una de las vías..... | 37 |
| Tabla 7 Actividad vehicular, por cada categoría vehicular, [Km.veh.h ⁻¹], primera aplicación de EMISENS | 38 |
| Tabla 8 Valores máximos de trafico [veh/h] | 38 |
| Tabla 9 Porcentaje recorrido en cada categoría de vía principal, por cada categoría vehicular | 39 |
| Tabla 10 Factores de clasificación de las vías secundarias, basados en la longitud de vía..... | 39 |
| Tabla 11 Actividad vehicular en las vías principales y secundarias por las categorías vehiculares..... | 40 |
| Tabla 12 Consolidado de Factores de Emisión: Rodríguez (2009) y COPERT IV. | 41 |
| Tabla 13 Velocidades promedios en las diferentes categorías de vías | 43 |
| Tabla 14 Desviación Estándar para los ficheros de entrada (INPUT), [%]..... | 43 |
| Tabla 15 Fracción másica COVs fuentes móviles con motores alimentados con gasolina | 47 |
| Tabla 16 Factores de emisión por categoría..... | 50 |
| Tabla 17. Comparación de resultados con estudios previos..... | 53 |
| Tabla 18 Consolidado de emisiones horarias, fuentes móviles | 58 |
| Tabla 19 Emisiones anuales, fuentes fijas..... | 62 |

Tabla 20 Distribución temporal de las emisiones provenientes de fuentes fijas,
[Ton/año].....64

LISTA DE FIGURAS

| | pág |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1 Metodología Fase 2: Fuentes Móviles | 28 |
| Figura 2 Categorías Vehiculares Agrupadas | 29 |
| Figura 3 Polígonos de Thiessen para clasificación de vías principales. | 32 |
| Figura 4 Uso del suelo urbano de Bogotá, D.C..... | 33 |
| Figura 5 Grupo de ficheros de entrada (INPUT) empleados por EMISENS | 36 |
| Figura 6 Fracción de tráfico diario para cada hora y categoría vehicular..... | 45 |
| Figura 7 Metodología fase 3: fuentes fijas | 48 |
| Figura 8 Categorías industriales adicionadas por este estudio..... | 49 |
| Figura 9 Diagramas de Pareto de las emisiones totales..... | 54 |
| Figura 10 Contribución de las categorías vehiculares al inventario de emisiones . | 55 |
| Figura 11 Comportamiento temporal de las emisiones, fuentes móviles | 59 |
| Figura 12 Emisiones de CO para las 08:00 | 59 |
| Figura 13 Comparación entre la emisión de CO a las 15:00 horas y la carga vehicular de las vías principales | 60 |
| Figura 14 Distribución temporal de los COVs, fuentes móviles | 61 |
| Figura 15 Contribución de las categorías industriales al inventario de emisiones . | 62 |
| Figura 16 Comportamiento temporal de las emisiones, fuentes fijas..... | 65 |
| Figura 17 Emisiones de NOx para las 12:00 | 66 |
| Figura 18 Emisiones de PM para las 12:00 | 67 |

RESUMEN

Se elaboró la distribución espacial del actual inventario de emisiones provenientes de las fuentes móviles y fijas de Bogotá D.C, en una malla de 55 x 55 Km, con resolución de celdas de 1 x 1 Km. La distribución temporal se hizo con una resolución horaria a partir del inventario anual. Se empleó una combinación de herramientas que incluyeron Microsoft Excel®, ArcGIS® y el código fortran EMISENS, desarrollado en la EPFL (Lausanne, Suiza) por A. Clappier. A partir de los resultados obtenidos en este estudio, se puede observar que las celdas en las que se generan las mayores descargas de contaminantes se encuentran superpuestas en los sectores de la ciudad con mayores concentraciones de contaminantes. Las mayores emisiones de fuentes móviles ocurren a las 08:00 y las de fuentes fijas, a las 12:00. El resultado de esta distribución será utilizado como información de entrada al modelo de calidad del aire de Bogotá.

Palabras Claves: Inventario de emisiones, fuentes fijas, fuentes móviles.

ABSTRACT

The emissions from mobile and stationary sources corresponding to the current emission inventory for Bogota were distributed in time and space. A domain of 55 x 55 km, with a grid cell resolution of 1Km was used. Hourly emissions were derived from the annual inventory. The set of tools used included ArcGIS®, Microsoft Excel®, and the Fortran code EMISENS, developed at the EPFL (Laussane, Switzerland) by A. Clappier. The results showed that the highest emissions occurred in the same areas where the main industries of the city are placed. Mobile and stationary emissions reach a peak around 08:00 and 12:00, respectively. The results from this distribution will be used as input for Bogota's air quality model.

Keywords: Emission Inventory, Road Traffic Sources, Industrial sources.

1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo con las cifras obtenidas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), en el censo poblacional del año 2005, el casco urbano de la ciudad ha presentado un notorio crecimiento en su población, de contar con una población de 4.225.649 habitantes en el año 1985, ha pasado a albergar una población de 7.259.597 habitantes en el año 2009 y se proyecta para el año 2010 una población de 7.363.782 habitantes, (DANE, 2005). Por otra parte, la ciudad ha experimentado en los últimos años un crecimiento en su economía, que como lo demuestra la Cámara de Comercio de Bogotá (CCB), su tasa de crecimiento económico entre el año 2000 y 2008 fue de aproximadamente 2,47%, (CCB, 2009). Este notorio crecimiento poblacional y económico de la ciudad conlleva a un incremento en la generación de energía a partir de combustibles fósiles; y a una mayor emisión de contaminantes a la atmosfera deteriorando la calidad del aire de la ciudad. Lo anterior se puede observar en el informe anual de calidad del aire de Bogotá del año 2008 (SDA, 2008), en donde se reporta que los mayores problemas de contaminación atmosférica de la ciudad se originan a partir de las emisiones de los siguientes contaminantes: Ozono (O_3), Partículas Suspendidas Totales (PST) y el Material Particulado de diámetro aerodinámico inferior a las 10 micras (PM_{10}), emisiones que superan frecuentemente los niveles máximos de inmisión regulados por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial mediante la Resolución 601 del año 2006¹.

En Bogotá D.C., se han desarrollado diversos proyectos dirigidos al estudio de la calidad del aire. Los proyectos ejecutados se han fundamentado en los registros de las concentraciones de contaminantes obtenidos en las estaciones de monitoreo de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), ubicadas en diferentes puntos de la ciudad. Entre estos proyectos se encuentra el

¹ Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.

elaborado en el año 2006 por Cancino (2006), en donde analizó la información de la RMCAB por medio de herramientas estadísticas formales, y aplicando un índice para establecer la frecuencia de excedencia de la norma de calidad del aire denominado Índice Porcentual de Excedencia (IPE); obtuvo como resultado que el mayor problema de contaminación atmosférica en la ciudad se debe a las altas emisiones de PM_{10} , específicamente en las estaciones de Puente Aranda, Fontibón, Corpas y Sony; en donde se excede la norma anual de calidad del aire en más del 80% del tiempo comprendido entre los años 2001 y 2005.

Los efectos que posee la contaminación del aire sobre la salud han sido objeto de intenso estudio en los últimos años. La exposición a contaminantes como el Material Particulado (PM) y el Ozono (O_3) se ha asociado con el aumento en la mortalidad y los ingresos hospitalarios por enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Brunekreef & Holgate, 2002). El PM_{10} es de gran interés para las autoridades de salud por su asociación directa con el aumento en los indicadores de morbilidad y mortalidad. Las partículas en este rango de tamaños, en especial las más finas, pueden ingresar al tracto respiratorio inferior y producir daños a los tejidos y órganos que lo conforman (Ostro, 2004).

En Bogotá se han realizado estudios por diversas universidades en donde se pone en evidencia la relación directa que existe entre la contaminación atmosférica, específicamente por las emisiones de PM_{10} , y los problemas respiratorios de sus habitantes, en los que se ha llegado a la conclusión de que los niños, los usuarios de las ciclorutas y los habitantes del occidente de la ciudad son algunas de las poblaciones más vulnerables frente al problema de contaminación atmosférica que atraviesa la capital del país (Agencia de Noticias UN, 2009). Se ha revelado que la tasa de mortalidad en la población menor de 5 años por Infección Respiratoria Aguda (IRA), expuesta a $52,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en las localidades de Kennedy, Bosa y Ciudad Bolívar, fue de 26,3 por cada 100.000, (Páez, 2009).

Una de las herramientas empleadas para el estudio de la contaminación atmosférica en centros urbanos son los inventarios de emisión, ya que proporcionan información en un tiempo determinado sobre las cantidades de contaminantes que liberan a la atmósfera las diferentes fuentes de emisión ubicadas en un área geográfica. Con la información obtenida en un inventario de emisiones se puede evaluar el estado de la calidad del aire, estudiar los problemas de la contaminación atmosférica, evaluar la eficacia de las políticas de contaminación del aire y alimentar modelos de calidad de aire (USEPA, 1999). Los estudios de calidad del aire realizados mediante modelos de dispersión requieren información sobre la cantidad de contaminantes en cada punto de un área bajo estudio en intervalos temporales definidos, de tal manera que los inventarios de emisión estimados con fines de modelación de la calidad del aire deben ser agregados en el espacio y en el tiempo.

El objetivo del presente trabajo final de maestría fue el de distribuir en el espacio y en el tiempo el inventario de emisiones de contaminantes provenientes de las fuentes móviles y fijas de la ciudad de Bogotá, en una malla de 55 x 55 Km, con resolución de celdas de 1 x 1 Km. Los contaminantes modelados fueron los siguientes: para las fuentes móviles CO, NO_x, SO₂, PM y COVs; mientras que para las fuentes fijas CO, NO_x, SO₂, PM.

Para cumplir el objetivo propuesto se empleó un conjunto de herramientas conformado principalmente por el modelo EMISENS y el Sistema de Información Geográfica ArcGIS®. A partir de los resultados obtenidos en este estudio, se puede observar que las celdas en las que se generan las mayores descargas de contaminantes se encuentran superpuestas en los sectores de la ciudad con mayores concentraciones de contaminantes. Las mayores emisiones de fuentes móviles ocurren a las 08:00 y las de fuentes fijas, a las 12:00.

ANTECEDENTES

En esta sección se describen brevemente diversas experiencias de distribución espacial y temporal de inventarios de emisiones con fines de modelación que han sido publicadas en revistas indexadas, tanto en el escenario internacional como en Colombia, o en informes altamente relevantes dentro del contexto nacional, en el caso de no encontrar publicaciones en revistas indexadas.

- **Experiencias internacionales:**

Baldasano y Toll (2000), emplearon el modelo EIM-LEM para calcular el inventario de emisiones provenientes de las fuentes antropogénicas localizadas en el área de Barcelona España. Para tal fin los investigadores definieron un dominio de 80 x 80 km² con resolución de celdas de 2 km². Los investigadores estimaron el inventario de emisiones con el fin de estudiar el origen de la contaminación fotoquímica empleando el modelo fotoquímico de dispersión MARS. Las emisiones totales estimadas para el 5 de agosto fueron: 130.793 kg de COVs, 83.989 kg de NOx y 43.567 de CO; de las cuales las fuentes móviles poseen la mayor participación en el inventario con las siguientes participaciones: 51% de COVs, 88% de NOx y 98% de CO. La distribución horaria de COVs y NOx indica que las mayores concentraciones generadas por las fuentes móviles se presentan a las 12:00 y 19:00 horas, cuando el volumen de tráfico se incrementa. Las emisiones de las fuentes móviles se concentran en las áreas urbanas, principalmente en Barcelona.

Wang et al. (2005) desarrollaron para el año 2000 un inventario de emisiones de alta resolución provenientes de las fuentes antropogénicas (puntuales, de área, móviles) y fuentes biogénicas, ubicadas en la región este de China. Para la estimación de las emisiones referentes a las fuentes antropogénicas emplearon factores de emisión que fueron calculados considerando la calidad de los

combustibles usados por las fuentes bajo estudio. Mientras que para la estimación del inventario proveniente de las fuentes biogénicas hicieron uso del modelo MEGAN (*Model of Emissions of Gases and Aerosol from Nature*). Los investigadores evaluaron el inventario con el modelo CMAQ, para lo cual emplearon el modelo de emisiones SMOKE (*Sparse Matrix Operator Kernel Emissions*), con el fin de distribuirlo espacial y temporalmente. De acuerdo con los resultados obtenidos por el modelo de emisiones, se encuentran altas emisiones de CO, NO_x y SO₂ en áreas urbanas con altas densidades de habitantes, o lugares en donde se concentra la industria, mientras que las emisiones de fuentes biogénicas corresponden a cubiertas con vegetación y baja densidad de habitantes. Las emisiones superficiales de CO, SO₂ y NO_x muestran gran variación entre los meses correspondientes al verano (Noviembre – Abril) y meses de invierno (Mayo – Octubre). Las emisiones de COVs generadas por fuentes biogénicas son bajas en enero y se incrementan en julio.

Brulfert et al. (2005) estimaron para el año 2003 dos versiones del inventario de emisiones para el Valle Maurienne, Francia. En la primera versión emplearon factores de emisión CORINAIR (Agencia Ambiental Europea) y en la segunda versión emplearon factores de emisión tomados de BUWAL-OFEFP (Agencia Suiza para el Medio Ambiente, los Bosques y el Paisaje). En este estudio los investigadores definieron un dominio de 74 x 62 km² con resolución espacial de 1 km², en donde estimaron las emisiones de CO, NO_x, SO₂, NMCOVs y CH₄, generadas por las fuentes antropogénicas (transporte, industrias, calefacción y solventes) y biogénicas. El contaminante que domina el inventario de emisión en el área estudiada es el CO, en donde el 60% de las emisiones provienen de las fuentes móviles y el 31% se genera en los sistemas de calefacción doméstica. Las fuentes móviles son las principales generadoras de NO_x, COVs y CO representadas de la siguiente manera: 75% de NO_x, 65% de las emisiones antropogénicas de COVs y 28% del total de emisiones de COVs (antropogénicas y biogénicas). En el caso del SO₂, las principales fuentes son las emisiones

industriales que representan el 78% de las emisiones totales. Mientras que las emisiones biogénicas de NMCOVs equivalen al 47% de las emisiones totales de COVs. Los mapas elaborados por los investigadores por medio de un Sistema de Información Geográfica (SIG), muestran que estas emisiones se concentran en las carreteras y en las zonas en donde se encuentran las industrias.

Cheng et al. (2007) aplicaron un modelo de calidad de aire acoplado MM5-ARPS-CMAQ para investigar la contribución de varias fuentes de emisión a la concentración ambiente de PM_{10} en la región metropolitana de Beijing, China. Para proveer la información de emisiones al modelo de calidad de aire construyeron una base de datos en SIG de los contaminantes atmosféricos emitidos en la región, en un dominio de 36 Km x 36 km, con resolución espacial de 4 km². El sistema acoplado fue implementado para predecir la proporción horaria de varias fuentes de emisión de PM_{10} durante los meses enero, abril agosto y octubre del año 2002. Los resultados del inventario de emisiones muestran que las principales fuentes de emisión de PM_{10} ubicadas dentro de Beijing son las emisiones fugitivas generadas por fuentes industriales (19.000 ton/año), los sitios de construcción (21.000 ton/año) y el polvo resuspendido de las carreteras (49.000 ton/año). Estas emisiones representan el 11.0%, 12,1% y 28,3% respectivamente, de las emisiones totales de PM_{10} generadas en el año 2002. La contribución de las fuentes de emisión en los meses bajo estudio fueron: abril 28,67%, agosto 42.88%, octubre 42.46% y febrero 35,67%.

Con el objetivo de evaluar la calidad del aire en Portugal haciendo uso del modelo tridimensional CTM CHIMERE, Monteiro et al. (2007) obtuvieron un inventario de emisiones para el año 2001 de los contaminantes PM y aerosoles aplicando una distribución espacial *top-down*. Los investigadores emplearon el programa EMEP (*European Monitoring and Evaluation Programme*) para distribuir espacialmente el inventario en un dominio con resolución horizontal de 50 km. La distribución espacial del inventario fue realizada en 2 pasos: en primer lugar estimaron las

emisiones a nivel de municipios usando indicadores estadísticos adecuados para cada actividad del contaminante (tipos de consumo de combustible), posteriormente el inventario fue distribuido de acuerdo a la densidad poblacional. De acuerdo con los resultados obtenidos en el inventario, las fuentes que dominan las emisiones anuales de PM_{10} son la combustión residencial con el 40%, seguida por las fuentes móviles con el 20% de las emisiones anuales. Este mismo comportamiento se presenta con el inventario de $PM_{2.5}$ en donde la combustión residencial posee la mayor tasa de emisiones con el 33% y las fuentes móviles poseen una proporción del 19 % de las emisiones anuales de PM. La distribución espacial del PM_{10} generado por fuentes móviles y no móviles muestra que este contaminante se concentra en la costa oeste de Portugal y principalmente alrededor de las ciudades de Lisboa y Porto. En esta investigación repartieron temporalmente las emisiones de acuerdo con los perfiles diurnos promedio de Europa.

Borge et al. (2008) aplicaron el modelo de emisiones SMOKE en la Península Ibérica y en la región de Madrid España, con el fin de procesar el inventario oficial de emisiones para este país, y proyectarlo para los años 2000 y 2010. Esta herramienta ha sido útil para generar información sobre las emisiones para el modelo CMAQ, como también para proporcionar una valiosa plataforma para el análisis de escenarios de emisiones. En este estudio el modelo SMOKE y el modelo CMAQ fueron implementados en 2 dominios: el primero denominado D1 contó con una resolución espacial de 15 km, centrado en 40° N, 3° W, con una malla de 78 celdas en la dirección este-oeste y 66 celdas en la dirección norte-sur. El dominio interior D2 es un cuadrado de 39 x 39 celdas, con una resolución espacial de 5 km. La distribución horaria de las emisiones anuales fue elaborada a través de la aplicación de 208 perfiles mensuales, 48 perfiles semanales y 212 perfiles diarios (lo mismo para el año 2000 y 2010). Los investigadores distribuyeron espacialmente un total de 176 categorías SMOKE de fuentes de área, las emisiones de estas fuentes fueron asignadas a las celdas de la malla a

través de códigos de distribución espacial generados para los 2 dominios modelados. En la etapa de distribución temporal los investigadores encontraron que el efecto combinado de las fuentes móviles y la generación de energía tienden a producir el máximo de emisión proveniente de procesos de combustión en los meses de otoño. Las emisiones de COVs son claramente dominadas por las fuentes biogénicas, como consecuencia de las emisiones generadas en el verano, que son aproximadamente el doble de las emisiones generadas en el invierno. El análisis de la distribución espacial elaborado para las fuentes de área, identifican a las fuentes móviles como las fuentes que emiten mayores contaminantes a la atmosfera.

Sowden et al. (2008) emplearon el *Emissions Processing System* (EPS) de la US-EPA, con el fin de desarrollar un inventario de emisiones para la ciudad de Cape Town Sur África, para ser utilizarlo como dato de entrada al *Dynamic Air Pollution Prediction System (DAPPS)*². Tal sistema emplea como modelo fotoquímico de dispersión el modelo CAMx y fue puesto a prueba por los investigadores el 8 de julio del año 2005 en un dominio de 70 x 105 km², con resolución horizontal de grilla de 1 x 1 km². Las fuentes incluidas en el inventario fueron las siguientes: fuentes puntuales, fuentes móviles, emisiones provenientes de los sistemas de calefacción residencial y por último fuentes biogénicas. Los resultados de esta investigación muestran que las fuentes móviles son las que dominan el inventario de emisiones de Cape Town, distribuyéndose de la siguiente manera: 70% de PM, 80% de NOx, 95% de CO, 25% de COVs y 40% de SO₂. Mientras que las fuentes biogénicas contribuyen en un 79% y un 10% de las emisiones de COVs y NOX, respectivamente.

Baldasano et al. (2008) aplicaron el *High-Reselective Resolution Modelling Emission System* (HERMES) con el fin de estimar el inventario de emisiones de España, requerido para la implementación de un modelo de transporte químico con alta

² El DAPPS fue desarrollado por un consorcio de instituciones de Sur África

resolución. Los autores tomaron como referencia el año 2004 y estimaron las emisiones generadas por las fuentes antropogénicas y fuentes biogénicas en un dominio de 146 x 146 km, con una resolución temporal de 1 hora y una resolución espacial de 1 km². Las emisiones anuales estimadas en este estudio son las siguientes: 795 kt de NO_x, 1.025 kt de NMCOVs, 1.236 kt de CO, 1.142 kt de SO₂ y 180 kt de PST, las cuales se distribuyen en las áreas grandes de las principales ciudades, autopistas y fuentes puntuales grandes de España. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que las emisiones de NO_x, SO₂ y PM_{2.5}, presentan una alta relación con la generación de energía por el uso de carbón, alcanzando altos niveles de emisiones durante el verano debido al incremento de la demanda de energía por el uso de los sistemas de aire acondicionado. Las emisiones de NMVOCs presentan una alta relación con la temperatura y radiación solar, logrando las máximas emisiones durante los días que conforman los meses de verano. Las emisiones de CO son principalmente influenciadas por las fuentes móviles, y sus altas emisiones se producen en verano debido al aumento del tráfico promedio diario durante los días festivos. Las fuentes más significativas en el total de emisiones son las fuentes móviles (38%), combustión en plantas de generación de energía (33%), fuentes biogénicas (12%) y la combustión de industrias manufactureras (9%).

Ho. (2010) desarrolló y validó un nuevo modelo denominado EMISENS, para la generación de emisiones provenientes de las fuentes móviles, cuya validación fue realizada en la ciudad de Strasbourg, Francia. Posteriormente, utilizó el mismo modelo para distribuir el inventario de emisiones de fuentes móviles en la ciudad de Ho Chi Minh, Vietnam en un dominio de 34 km x 30 km con resolución espacial de 1 km² (año base 2006), y agregarlo al inventario de las demás fuentes, para las cuales se empleó una aproximación *top-down*. Los resultados obtenidos por el investigador muestran que las fuentes móviles son las principales fuentes de emisión de la ciudad de Ho Chi Minh: 78% de NO_x, 90% de CO y 89% de NMCOVs. De la flota que circula en la ciudad las motocicletas son las fuentes que

dominan el inventario: 94% de CO, 68% de NMCOVs, 61% de SO₂ y 99% de CH₄. Los resultados obtenidos para las fuentes móviles muestran que las principales emisiones de CO se presentan en el centro de la ciudad. Los patrones de emisiones para los NMCOVs y los otros contaminantes son similares a las emisiones de CO. Por su parte, el SO₂ domina el inventario estimado para las fuentes industriales con el 80,42%, siendo el mes de noviembre la época de año en donde se presentan las mayores emisiones de contaminantes. Su distribución espacial muestra que las industrias se localizan principalmente en el área residencial de la ciudad.

- **Experiencias nacionales:**

La Universidad Pontificia Boliviana desarrolló en el año 2001 el modelo ETROME (Emisión de Tráfico Rodado para Medellín y municipios aledaños), que fue aplicado con el fin de comparar las emisiones generadas por las fuentes móviles operadas con combustibles de baja calidad (escenario 1) y las emisiones generadas empleando combustibles que cumplan la norma europea EURO III (escenario 2). El área de influencia definida por los investigadores para el desarrollo de la investigación posee una superficie de 1.089 km² (33 km x 33 km) correspondiente al área geográfica de la ciudad de Medellín y otras zonas de sus municipios aledaños. En esta investigación el dominio fue dividido en 1089 celdas de 1 km². Para la estimación del inventario de emisiones emplearon factores de emisión CORINAIR 2006 y el modelo internacional IVE, mientras que la definición de variables de tránsito fueron obtenidas a partir de información primaria correspondientes al plan maestro de movilidad del Valle de Aburrá y las estadísticas del Ministerio de Transporte. Los resultados del inventario de emisiones empleando factores de emisión IVE (*International Vehicle Emissions*) arrojaron la siguiente participación porcentual de las emisiones generadas en el año 2005: CO 69,57%, NO_x 10,18%, COVs 18,31%, TSP 1,28% y SO₂ 0,66%. Por

su parte empleando factores de emisión CORINAIR la distribución de los mismos contaminantes es: 69,68%, 10,20%, 18,34%, 1,12% y 0,66%, respectivamente.

Toro et al. (2001) aplicó el modelo de emisiones atmosféricas para el Valle de Aburrá (MODEMED), con el fin de conocer la formación y el transporte de contaminantes fotoquímicos utilizando un modelo de pronóstico a mesoescala y un modelo de dispersión fotoquímico euleriano en el Valle de Aburrá. El inventario de emisiones se enfocó al estudio de las descargas de especies químicas que provienen de las fuentes antropogénicas (transporte y procesos productivos), así como también las emisiones biogénicas, provenientes de la vegetación. Para la estimación de emisiones emplearon metodologías de la USEPA y de CORINAIR. Los resultados reportados indican que el tráfico rodado domina el inventario de emisiones, siendo el CO el más representativo con el 79% de las emisiones anuales, seguida por los COVs y el NOx con el 17% y 11% respectivamente. Por otro lado, los procesos productivos son los que generan mayor cantidad de Partículas Suspendidas con el 49% y SO₂ equivalentes al 27%. La agregación espacial elaborada en este estudio muestra que las emisiones atmosféricas generadas por el tráfico rodado se concentran en la zona central urbana y centro occidental de la ciudad de Medellín, con horario crítico a las 7 y 19 LST.

Toro et al. (2006) determinaron, en un dominio de 360 Km² con resolución espacial de 1 km², las emisiones en caliente de CO, NOx, SO₂, TSP y COVs provenientes del tráfico rodado de la ciudad de Medellín, empleando el modelo ETROME y factores de emisión CORINAIR. De acuerdo con los resultados reportados, el CO es el contaminante que domina el inventario de fuentes móviles de Medellín, con una emisión de 104.118 ton/año, seguido por el NOx con 14.779 ton/año. Las gráficas de intensidad de emisión construidas muestran que el centro de la ciudad representa el área más afectada por el tráfico vehicular, seguida por la región centro-occidental. Los resultados arrojados por el modelo evidencian las

mayores emisiones durante las horas pico que se presentan a las 8:00 A.M y a las 7:00 P.M.

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Universidad Pontificia Boliviana en el año 2006 actualizaron el inventario de emisiones del Área Metropolitana del Valle de Aburrá para el año 2005, empleando el modelo de emisiones atmosféricas para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (MODEAM), que emplea la aproximación *bottom-up* para elaborar la distribución espacial de las emisiones de CO, NO_x, SO₂, PM y COVs generadas por las fuentes fijas, de área, móviles y biogénicas. Para tal fin, se definió un dominio de 60 km x 60 km, con resolución espacial de 1km² y resolución temporal de 1 hora. De acuerdo con los resultados reportados, el tráfico rodado emite 104,117 ton/año de CO, 14,780 ton/año de NO_x, 27,627 ton/año de COVs, 989 ton/año de PM y 929 ton/año de SO₂. Los contaminantes que más se emiten por las fuentes fijas son (en ton/año): PM y SO_x con 31,490.4 y 21,362.7, respectivamente. El centro de la ciudad de Medellín representa el área más afectada por el tránsito vehicular y las industrias, siguiendo en importancia, la región centro oriental y el municipio de Itagüí. Las mayores emisiones se presentan durante las horas de mayor tráfico automotor correspondientes a la 08:00 y a las 18:00. La mayor emisión de contaminantes provenientes de las fuentes biogénicas se presenta en el norte del Valle de Aburrá y la región de Santa Elena.

- **Locales:**

Fandiño & Behrentz (2009) efectuaron la actualización del inventario de emisiones para el año 2008 provenientes de las fuentes fijas de la ciudad mediante mediciones directas. El inventario de emisiones se llevó a cabo mediante la generación de factores de emisión a partir de muestreos isocinéticos para PM, NO_x y SO_x. De acuerdo con sus resultados, las fuentes industriales de Bogotá emitieron en el año 1.400, 2.600 y 2.200 toneladas de PM, NO_x y SO_x,

respectivamente. También confirmaron que la producción no tecnificada de ladrillo, seguida de calderas de gran tamaño que usan carbón como combustible, son las fuentes más importantes de PM, representando el 50% y el 25% de las emisiones, respectivamente.

Behrentz y Rodríguez (2009) elaboraron la actualización del inventario de emisiones provenientes de las fuentes móviles por medio de mediciones directas. Realizaron más de 200 mediciones directas del tubo de escape bajo las condiciones reales de operación de los vehículos en la ciudad. Según los resultados obtenidos, las fuentes vehiculares en Bogotá emiten anualmente más de 4.800.000 toneladas de CO₂; 450.000 toneladas de CO; 30.000 toneladas de NO_x; 60.000 toneladas de THC y 1,100 toneladas de PM_{2.5}. Finalmente, realizaron pruebas para cuantificar la disminución de emisiones de PM al operar vehículos con ACPM convencional y posteriormente con ACPM de bajo contenido de azufre, encontrando reducciones en las emisiones de PM hasta del 60%.

Manzi (2008) seleccionó y aplicó una metodología para la estimación de los factores de emisión de las fuentes móviles de la ciudad de Bogotá. Estimaron los factores de emisión del parque automotor (vehículos livianos y vehículos pesados) de la ciudad para 5 contaminantes (CO, NO_x, SO₂, COV y PM₁₀), haciendo uso de la aplicación inversa del modelo de dispersión STREET SRI, en combinación de las mediciones de las concentraciones de dichos contaminantes en el interior de un cañón urbano de alto flujo vehicular ubicado en el centro de la ciudad (Carrera 7 entre calle 13 y avenida Jiménez). Estos factores de emisión de la flota vehicular de la ciudad fueron empleados para generar el inventario de emisiones requerido por el Modelo de Calidad de Aire de Bogotá.

En 2001, la empresa INAMCO elaboró para el Departamento Administrativo de Medio Ambiente (DAMA) el inventario de fuentes fijas para la ciudad: Para tal fin visitaron cerca de 4.500 establecimientos industriales, con el propósito de recopilar

información relacionada con el consumo de combustible y los tipos de tecnología empleados en sus procesos de obtención de energía (INAMCO & DAMA, 2001). A partir de la información recopilada y haciendo uso de factores de emisión obtenidos de la base de datos AP-42 de la USEPA, encontraron que la localidad de Puente Aranda aporta más del 25% de las emisiones totales de PM₁₀ de la ciudad y la localidad de Kennedy es el sector de la ciudad que emite las mayores concentraciones de SO_x.

Zarate et al. (2007) emplearon el modelo de emisiones AIREMIS (basado en metodologías CORINAIR), con el fin de preparar el inventario de emisiones requerido por el Modelo de Calidad del Aire de Bogotá. Las fuentes de emisión seleccionadas en este estudio fueron las siguientes: Producción y Servicios (P&S), tráfico aéreo, fuentes biogénicas y tráfico rodado; mientras que los contaminantes modelados fueron: NO_x, CO, PM₁₀, NMCOVs, CO₂, SO₂ y CH₄. Emplearon los factores de emisión estimados por Manzi (2008) para determinar las emisiones provenientes de las fuentes móviles, mientras que la estimación de las emisiones generadas por las fuentes fijas se basó en la información recopilada por (INAMCO & DAMA, 2001) y los factores de emisión de la metodología CORINAIR. Para la estimación del inventario de emisiones, se tomó 2002 como año base, y se definió un dominio de 212 km x 212 km con resolución espacial y temporal de 4kmx4km y 1 hora, respectivamente. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que el tráfico rodado es el que emite las mayores cantidades de CO (840 ton/d), NMCOVs (130.4 ton/d), CO₂ (5.133,4) y NO_x (37,4 ton/d). Mientras que las emisiones provenientes de las fuentes fijas antropogénicas son: 21,9 ton/d de CO; 3,8 ton/d de NO_x; 8,1 ton/d de PM₁₀; 12,1 ton/d de NMVOC; 14,0 ton/d de SO₂, 132,7 ton/d de CH₄ y 1.095,9 ton/d de CO₂. La distribución espacial de las emisiones indica que el centro de Bogotá contribuye con emisiones significativas de CO, PM₁₀, NMCOVs y NO_x, que son generadas principalmente por el tráfico y en menor medida por uno de los principales centros industriales de la ciudad, localizado en la localidad de Puente Aranda. También se puede observar una gran

contribución de NO_x en el corredor industrial localizado en el oeste de la región; mientras que el corredor industrial ubicado al norte de la región contribuye con las mayores emisiones de PM₁₀, NO_x, CH₄, CO₂ y SO₂.

Por medio de factores de emisión determinados por pruebas dinámicas realizadas en California, Behrentz et al. (2005), elaboraron un inventario de emisiones para vehículos livianos que operan con gasolina en la ciudad. Los resultados de este estudio indican que los aportes a la contaminación atmosférica por parte de estos tipos de vehículos son los siguientes: 230.000 ton/año de CO, 3.000.000 ton/año de CO₂, 12.000 ton/año de NO_x, 25.000 ton/año de THC, 1.400 ton/año de CH₄ y 90 ton/año de N₂O.

Giraldo (2005) actualizó y validó los inventarios de emisiones para fuentes móviles elaborados hasta el momento empleando el procedimiento propuesto por el proyecto IVE. El inventario de emisiones fue estimado por medio de una campaña de toma de información propia de la ciudad y factores de emisión reportados en la literatura científica. Se cuantificaron así los aportes a la contaminación atmosférica por cada una de las categorías vehiculares definidas en el estudio y se diseñaron, a partir de una evaluación cuantitativa, las estrategias más eficientes para la reducción de las emisiones provenientes de las fuentes móviles. Los resultados mostraron que los buses pertenecientes a la flota del servicio público colectivo, los camiones y las motos dominan el inventario de emisiones de material particulado en la ciudad. Así mismo, la estrategia más eficiente para disminuir las emisiones de este contaminante propuesta era la de mejorar la calidad de los combustibles diesel (reducción del contenido de azufre) distribuidos en la ciudad.

La Agencia Internacional de Cooperación Japonesa (JICA) estableció en 1991 que uno de los principales contaminantes emitidos por las industrias a la atmósfera en Bogotá era el SO_x, con una contribución de aproximadamente el 80% del total de emisiones de este contaminante (JICA, 1992).

JUSTIFICACIÓN

Actualmente, la ciudad no cuenta con un inventario de emisiones estimado para fines de modelación de la calidad del aire. Por tal motivo con el desarrollo de este trabajo final de maestría, se le proporcionará a la ciudad y a la SDA, un inventario de emisiones de las fuentes móviles y fijas que operan dentro del casco urbano de la ciudad; distribuido espacial y temporalmente en un dominio de 55 km x 55 km, con resolución espacial y temporal de 1 km² y 1 hora respectivamente, para un día típico del año 2008. Con los resultados obtenidos en este trabajo se podrán realizar estudios de calidad del aire empleando modelos fotoquímicos de dispersión, previamente adaptando el inventario de emisión al lenguaje de programación requerido por el modelo con el que se desee estudiar la contaminación atmosférica de la ciudad.

MARCO TEÓRICO

Un inventario de emisiones es una lista completa actualizada, por fuente, de las emisiones de contaminantes del aire, y cubre un área geográfica específica para un intervalo de tiempo específico. La información obtenida de un inventario de emisión es usada para diferentes fines, como por ejemplo: evaluar el estado de la calidad del aire, estudiar los problemas de contaminación del aire, evaluar la eficacia de las políticas de contaminación del aire. (USEPA; 1999). Los inventarios de emisión constituyen un dato de entrada básico en los estudios de calidad del aire realizados por medio de modelos fotoquímicos de dispersión.

En la literatura se encuentran dos principales aproximaciones para el desarrollo de los inventarios de emisiones: *top-down* (arriba-abajo) y *bottom-up* (abajo-arriba). La aproximación *bottom-up* o a microescala requiere un conocimiento detallado de los parámetros referidos a cada actividad emisora en cada celda (tipo de uso del suelo, aforos de tráfico, consumo de combustible, densidad de población, etc.),

con el objetivo de estimar su contribución a las emisiones totales. Mientras que la aproximación *top-down* o a macroescala, calcula el total de las emisiones referidas a ciertas unidades administrativas para las cuales se dispone de datos relevantes y se distribuye entre las celdas haciendo uso de patrones locales de distribución apropiados (densidad de población, industriales o de tráfico, etc.).

Las emisiones se estiman generalmente mediante la aplicación de factores de emisión, los cuales estiman la tasa a la que es liberado un contaminante a la atmosfera, como un resultado de alguna actividad productiva. Para lo cual se emplea la ecuación 1:

$$E = FE \times A \quad (1)$$

En donde: E son las emisiones, FE es el factor de emisión y A es la tasa de actividad.

Los factores de emisión se pueden obtener de bases de datos, como por ejemplo la base de datos COPERT IV (Ntziachristos et al. 2007). En esta base de datos se puede estimar factores de emisión de CO, VOC, NOx y PM; para diferentes categorías de vehículos tales como: vehículos livianos, vehículos pesados, carros de pasajeros, buses, camiones, motocicletas, entre otras. Los factores de emisión obtenidos se clasifican en tres categorías: arranque en frio, arranque en caliente y emisiones evaporativas.

Otra base de datos en donde se pueden obtener factores de emisión es el documento AP-42 (USEPA, 1995) conocido como: compilación de factores de emisión de contaminantes del aire. La base de datos en mención contiene factores de emisión y la información de los procesos para más de 200 categorías de fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos. Los factores de emisión se desarrollaron y compilaron a partir de las siguientes fuentes de información: pruebas de chequeo, balances de materia y estimaciones de ingeniería. La

primera edición del documento AP-42 fue publicada en enero del año 1995. En los diferentes capítulos del documento en mención se encuentran los factores de emisión, principalmente para las fuentes fijas y de área, tales como: fuentes de combustión externa, combustión interna de fuentes fijas, disposición final de residuos sólidos, fuentes biogénicas, entre otras.

Adicionalmente a las bases de datos descritas anteriormente, se encuentra el modelo IVE. Este modelo se desarrolló con el fin de generar no solo una serie de factores de emisión que fuesen representativos para las condiciones de países en vía de desarrollo, sino también para diseñar y aplicar una metodología de medición de emisiones en ruta (mediciones a bordo), que pudiera ser replicada de forma estándar en varias ciudades. Por medio del modelo IVE se pueden estimar las emisiones de contaminantes criterio, gases de efecto invernadero y sustancias tóxicas; provenientes de diferentes categorías vehiculares, tales como: vehículos de pasajeros, motocicletas, buses y camiones. Este modelo se ha empleado en ciudades como Beijing y Shanghai, China (Nicole et al., 2005; Wang et al., 2006).

Como se comentó anteriormente, los inventarios de emisión constituyen una entrada fundamental en los estudios de calidad del aire realizados por medio de modelos fotoquímicos de dispersión. Para emplear las emisiones con fines de modelación de la calidad del aire, previamente es necesario distribuir las emisiones en el espacio y en el tiempo. Para tal fin existen herramientas denominadas modelos de emisiones. En el contexto de la modelación de la calidad del aire, la modelación de emisiones es el proceso por medio del cual las emisiones estimadas son preparadas para usarlas como datos de entrada en un modelo de calidad del aire. En términos generales, el modelo de emisiones es el conjunto de herramientas informáticas que llevan incorporadas las herramientas para calcular las emisiones de distintas fuentes. Son usadas para estimar y posteriormente, distribuir en el espacio y en el tiempo, las emisiones generadas por las fuentes de emisión localizadas en el área a estudiar (Wilkinson, J. 2003).

Como ejemplos de modelos de emisiones se encuentran: el modelo EMS-95 (*Emissions Modeling Systems*) (Wilkinson, 2003) y el modelo SMOKE (*Sparse Matrix Operator Kernel Emissions*) (Houyoux,1998). Cada modelo posee la capacidad de estimar las emisiones generadas por las fuentes de emisión; y prepararlas para el uso de ciertos modelos de calidad del aire, como por ejemplo: el modelo CAMx (*Comprehensive Air Quality Model*) (Zhang et al., 2005) y el modelo CMAQ (*Community Multiscale Air Quality*) (Byun & Ching, 1999).

Otro ejemplo de estas herramientas es el software AIREMIS (ACIR-ST, 2002), desarrollado por la empresa francesa ACRI, el cual estima las emisiones horarias de 7 contaminantes principales (NO, NO₂, SO₂, CO, CO₂, COV y PS), generadas por transporte (tráfico vehicular y aéreo), producción de servicios (industrias), calefacción y ambiente natural. Como se comentó en los antecedentes nacionales, esta herramienta se empleó en Bogotá con el fin de preparar las emisiones como dato de entrada al modelo de calidad del aire de Bogotá, pero actualmente no existe más soporte para esta herramienta.

Otro paso en la estimación de inventarios es la especiación, que es el proceso de desagregación de los contaminantes estimados en el inventario de emisiones, en cada especie química o en grupos de especies. La necesidad de elaborar una especiación se determina dependiendo del propósito del inventario. Los inventarios que principalmente requieren de una especiación son los que se emplearán para fines de modelación fotoquímica, inventarios de compuestos tóxicos, entre otros. De acuerdo con lo anterior, el inventario debe incluir la especiación de los siguientes contaminantes: Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Óxidos de Sulfuro (SO₂), Monóxido de Carbono (CO), Partículas Suspendidas Totales (PST), PM₁₀ ó Amonio (NH₃). Adicionalmente, para algunos modelos, las emisiones de NO_x pueden ser necesarias como Óxido de Nitrógeno (NO) y Dióxido de Nitrógeno (NO₂).

2 METODOLOGÍA

La preparación y distribución de los inventarios con fines de modelación de calidad del aire se desarrolló en 3 fases. En la fase 1, se obtuvo y preparó la información requerida, y se construyó la malla de distribución espacial de emisiones para el modelo. En la fase 2, se consolidó el inventario de emisiones provenientes de las fuentes móviles con su correspondiente distribución espacial y temporal y se realizó la especiación de los compuestos orgánicos volátiles (COVs) estimados para las fuentes móviles. En la fase 3, se elaboró el mismo trabajo para el inventario de emisiones provenientes de las fuentes fijas.

2.1 FASE 1: OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE INFORMACIÓN

La información fue obtenida de diferentes fuentes. Los factores de emisión se encuentran principalmente en las actualizaciones de los inventarios de emisiones provenientes de las fuentes móviles y fijas elaboradas por Rodríguez (2009) y Fandiño (2009); complementados con factores de emisión de COPERT IV (Ntziachristos et al. 2007) para fuentes móviles, o de la AP-42 para fuentes fijas. Las diferentes categorías vehiculares, números de vehículos en cada categoría, como también, las distancias diarias cubiertas por los diferentes vehículos fueron consultados en las actualizaciones de los inventarios y complementados con información suministrada por TransMilenio S.A. La información de las vías principales y secundarias fue entregada por la SDA, como también el mapa de localidades de la ciudad de Bogotá y la clasificación del uso del suelo urbano. La red vial empleada por TransMilenio S.A., fue suministrada por el Programa de Investigación en Tránsito y Transporte (PIT) de la UNAL. El aforo vehicular de las vías principales fue obtenido de la Secretaría Distrital de Movilidad (SDM). Finalmente, la información de las vías intermunicipales o rurales se obtuvo de archivos MapInfo® proporcionados por la Universidad de los Andes.

La evaluación de esta información mostró que se requerían algunas correcciones previas a su empleo, como se describe a continuación:

Sobre la información de las fuentes fijas se hizo una verificación manual detallada y una corrección de su localización geográfica. Se realizó un recorrido de la malla vial concerniente a las vías principales de la ciudad con el fin de comprobar la calidad de su información, detectando que contenía segmentos de vías que no se encontraban construidas en el momento de la ejecución de este estudio, es decir que estaban planificadas para su construcción en el futuro, por lo que fue necesaria su remoción. Para identificar las vías sin construir se recurrió al conocimiento de los habitantes de la localidad en donde se encontraban georeferenciadas, como también se identificaron por medio de ayudas gráficas como fotografías aéreas obtenidas de Google Map[®] y el geocodificador del Departamento de Planeación Distrital³. A demás algunas vías principales no se encontraban georeferenciadas, por lo cual se agregaron manualmente.

Los archivos Mapinfo[®] cubrían un área mucho mayor que el área modelada en este estudio y también incluían algunas vías primarias. Las vías por fuera del área modelada como también algunas localizadas dentro del área del distrito de Bogotá, se removieron con el fin de mantener solo las vías intermunicipales ubicadas en los límites del distrito.

La fase 1 también incluyó la construcción de la malla del modelo con el fin de poder calcular los valores de los elementos considerados para cada una de las celdas de la malla. La malla fue construida empleando la herramienta de análisis "Fishnet" proporcionada por ArcGIS[®]. La herramienta en mención requiere como datos de entrada para generar la malla las coordenadas de las esquinas inferior izquierda y superior derecha del área a ser cubierta por la malla, el tamaño de las

³ http://sig.dapd.gov.co/sinu/map1.jsf?titulo=1&tema=TV_ESTRAFIFICACION&wi=1109&he=586

celdas (1 km x 1 km) y el número de filas (55) y columnas (55). Se empleó la opción de producir niveles numerados para cada celda con el fin de obtener una secuencia de números (numerando las celdas fila por fila, de la celda inferior izquierda con el número 0, hasta la celda superior derecha con el número 3024), que posteriormente fueron convertidos a coordenadas X y Y, tal y como es requerido por el programa EMISENS. Dicha conversión fue realizada empleando las ecuaciones 3 y 4, como también la herramienta “calculate values” en ArcGIS® :

$$X = (id) \bmod(55) + 1 \quad (3)$$

$$Y = (id) / (55) + 1 \quad (4)$$

Donde X y Y son las coordenadas a ser determinadas, Id es el número del nivel de la celda, 55 el número de las celdas en cada fila, “mod” el modulo moderador y “/” la división de enteros empleada en Visual Basic (VBA).

2.2 FASE 2: FUENTES MÓVILES

La fase 2 se ejecutó en 5 actividades (Figura 1). Para la obtención de los resultados finales de este estudio, la metodología propuesta se implementó en 2 versiones. La principal diferencia entre las 2 versiones fue la clasificación realizada a las vías principales y secundarias. En la primera versión se clasificaron las vías de la ciudad en vías principales y secundarias, de acuerdo a su longitud y a su velocidad promedio. Al estimar las emisiones de las fuentes móviles se observó que esta clasificación no era la adecuada para tal fin, debido a que con esta clasificación de vías el programa, al realizar la distribución espacial de emisiones las sobreestimó en sectores de la ciudad que poseen alta densidad de vías secundarias, pero que se caracterizan por contar con un bajo flujo vehicular. Por lo tanto en la segunda versión se tomó la decisión de que la forma más adecuada para la clasificación de las vías primarias y secundarias era en función de su flujo vehicular más no de su longitud. De acuerdo con lo anterior estas vías se

clasificaron de acuerdo con el flujo vehicular, obteniendo 4 categorías para las vías principales y 3 categorías para las vías secundarias. En el desarrollo de la metodología aplicada en esta fase, se explicará cómo se elaboró la clasificación de vías.

Las emisiones producidas por las fuentes móviles fueron estimadas y distribuidas en el espacio y en el tiempo empleando el modelo EMISENS, (Ho, 2010). El modelo EMISENS se ha desarrollado para direccionar los principales problemas a los que se enfrentan los países en desarrollo, al tratar de confrontar el problema de la contaminación del aire. Estos problemas incluyen la complejidad de los datos necesarios para los modelos clásicos de emisiones generados por el tráfico y el poder computacional necesarios para obtener los resultados basados en la modelación de vías segmentadas. Los datos necesarios no siempre están disponibles para uso de modelos como el Circul'air, actualmente usado en varias regiones de Francia y desarrollado por la ASPA (*Association pour la Surveillance et l'Étude de la Pollution Atmosphérique en Alsace*), o el programa AIREMIS (ACIR-ST, 2002); que se utilizó anteriormente en Bogotá (Zarate et al. 2007). Por otra parte, los computadores de gran capacidad, que permiten procesar la gran cantidad de cálculos involucrados en la elaboración de inventarios de emisiones empleando otros programas en un tiempo razonable, sólo se encuentran disponibles a altos costos para la mayoría de las instituciones locales en los países en desarrollo.

Otro factor limitante es que la mayoría de estos modelos no integran las incertidumbres computacionales en variables primarias. EMISENS se encuentra en la capacidad de producir resultados sin la necesidad de información muy compleja. En lugar de diferenciar cada segmento de vía y sus vehículos asociados, y los factores de emisión; esta información en EMISENS es agregada en grandes categorías y los valores promedios son usados para los parámetros pertinentes. Este "agrupamiento" de la información produce un aumento muy

importante en la cantidad de cálculos necesarios para obtener los resultados y permite el análisis de la incertidumbre de los resultados con respecto a los parámetros de entrada y sus respectivos valores de error utilizando la metodología de Monte Carlo. Lo anterior permite a su usuario, identificar los parámetros que deben ser usados con anterioridad con el fin de obtener resultados más acordes con la realidad.

EMISENS puede ser usado con un amplio rango de niveles de complejidad. Los cálculos pueden ser realizados empleando solamente “emisiones en caliente”, es decir, las emisiones que se generan cuando el motor se encuentra caliente. Es posible estimar las “emisiones en frío” generadas cuando el motor se encuentra frío durante cierto tiempo tras el encendido inicial. Incluso está previsto que se incluya en un futuro “las emisiones evaporativas”, que son las emisiones que no son generadas por la propia combustión. Así como muchos programas que son usados para estimar inventarios de emisiones EMISENS se basa en la metodología COPERT IV para estimar factores de emisión de las diferentes categorías vehiculares y tipos de emisión. Como ya se ha mencionado, las principales diferencias con otras técnicas empleadas para elaborar inventarios de emisiones, consiste en la agrupación de los diferentes grupos de vehículos, en categorías de comportamiento similar, y la agrupación de vías basada en su velocidad y su carga vehicular.

Otra diferencia importante con los otros programas es la consistencia *bottom-up* y *top-down* adquirida con EMISENS. La aproximación *Bottom-up*, primero estima un valor global sin tener en cuenta el comportamiento de las entidades individuales. La aproximación *Bottom-up* primero considera las emisiones individuales para finalmente combinarlas en el último paso y obtener las emisiones globales.

EMISENS es capaz de combinar favorablemente estas 2 aproximaciones. Posee la capacidad de calcular en primer lugar las emisiones globales en el área bajo

estudio usando la aproximación *top-down*, y posteriormente, distribuye en el espacio y el tiempo estas emisiones empleando la metodología *bottom-up*. La consistencia entre las 2 aproximaciones es asegurada por la formulación de las emisiones en EMISENS, basada en la ecuación 2

$$E = \sum F \times A \quad (2)$$

En donde E son las emisiones en [g/h], F los factores de emisión para las diferentes fuentes en [g/unit] y A sus respectivas actividades en [unit/h]. Los factores de emisión son valores promedios y generalmente derivados usando la metodología *top-down*, mientras que las actividades son valores locales que a menudo se basan en la aproximación *bottom-up*. Si los factores de emisión usados son constantes en el espacio y en el tiempo, las emisiones totales obtenidas por la aproximación *top-down* o la aproximación *bottom-up*, serán las mismas y así se asegurará la coherencia entre los dos métodos.

EMISENS usualmente es usado en 3 diferentes fases. El primer paso consiste en una estimación de las emisiones totales basado en los ficheros de entrada necesarios, es decir, los factores de emisión y las actividades para cada vía y categoría vehicular. El segundo paso tiene en cuenta los valores de error de estos dos parámetros de entrada, para computar su influencia relativa en la incertidumbre de los resultados. Finalmente, el tercer paso requiere una información extra: segmentos de vía y la carga vehicular para cada celda y cada hora del dominio modelado, para poder distribuir las emisiones en el espacio y el tiempo.

La herramienta EMISENS fue validado comparando sus resultados, con los resultados producidos por el modelo Circul'air sobre la ciudad de Strasbourg, Francia. El modelo Circul'air es un modelo complejo y de alta precisión,

desarrollado por la ASPA y es basado en la metodología COPERT. Los resultados obtenidos por EMISENS fueron muy cercanos a los arrojados por Circul'air, presentando una diferencia entre el -1% al 20%, dependiendo de cada contaminante, (Ho, 2010).

Figura 1 Metodología Fase 2: Fuentes Móviles



Fuente: el Autor

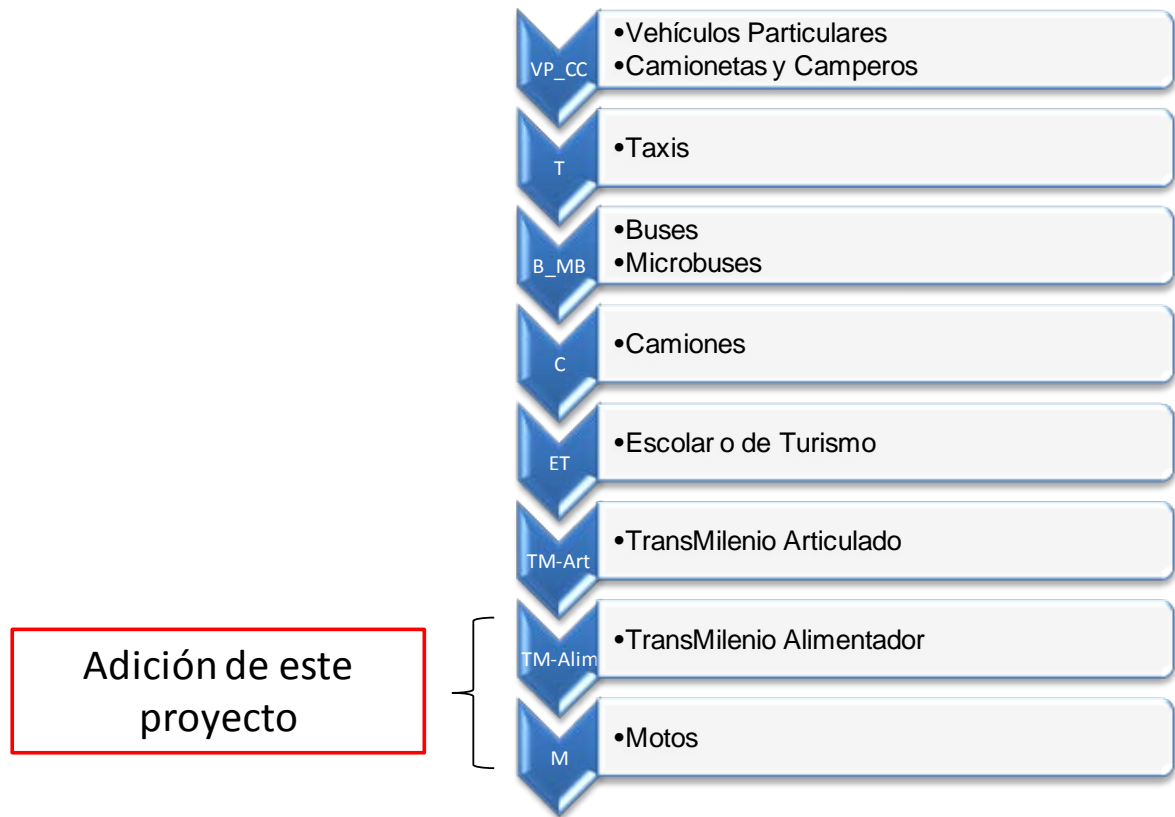
2.2.1 Definición de parámetros

EMISENS estima las emisiones generadas por las fuentes móviles en función de 2 parámetros: las categorías vehiculares y una clasificación de vías.

- **Categorías vehiculares:**

Se partió de las 18 categorías vehiculares definidas por Behrentz & Rodríguez (2009) de acuerdo con el tipo del vehículo, la tecnología del motor y la carga (Anexo 1). Con el fin de simplificar los cálculos y disminuir los tiempos computacionales por EMISENS, las 18 categorías originales fueron agrupadas en 8 categorías, basándose en comportamientos similares entre ellas (Figura 2).

Figura 2 Categorías Vehiculares Agrupadas



Fuente: El Autor, Modificado de: (Behrentz & Rodríguez, 2009).

Dado que en la actualización del inventario de emisiones no se tuvo en cuenta la flota vehicular correspondiente a los buses alimentadores del sistema TransMilenio, ni las motocicletas, se consultó y complementó la información correspondiente.

- **Clasificación de vías**

El modelo EMISENS requiere que se clasifiquen las vías en donde circulan las fuentes móviles de la ciudad. Para tal fin se consultó la información de la malla vial de Bogotá. La malla vial de la ciudad está conformada por vías principales, vías secundarias y finalmente las troncales, que son las vías exclusivas por los buses articulados del sistema TransMilenio

Teniendo en cuenta la estructura de la malla vial de la ciudad, en la primera aplicación del modelo las vías fueron clasificadas en 4 categorías en función de su longitud Tabla 1: vías principales (PRINC), vías secundarias (SEC), Buses TransMilenio Articulados (TM_Tronc) y finalmente, Buses TransMilenio Alimentadores (TM_Alím). Adicionalmente se consultó información sobre las vías rurales o intermunicipales, que se clasificaron como vías rurales (RUR).

Tabla 1 Clasificación y longitud de vías, primera aplicación de EMISENS

| Clasificación de Vías | Longitud [Km] |
|------------------------------|----------------------|
| PRINC | 626 |
| SEC | 8,735 |
| TM_Tronc | 78 |
| TM_Alím | 422 |
| RUR | 283 |

Fuente: el Autor, empleando la herramienta SIG

Para la segunda aplicación del modelo se redefinió la clasificación de las vías principales y secundarias, esta vez teniendo en cuenta el comportamiento del tráfico vehicular en cada una de ellas.

Para definir la nueva clasificación de las vías principales, se empleó un aforo vehicular elaborado en el año 2008 por la SDM, en donde realizaron conteos vehiculares durante las 24 horas del día, en 26 estaciones magistrales ubicadas en las vías principales de la ciudad.

La información obtenida del aforo vehicular fue empleada para agrupar las vías principales en 4 categorías: bajo, medio, alto y muy alto flujo vehicular. Esta clasificación fue elaborada empleando los valores máximos horarios de cada una de las categorías vehiculares aforadas en cada una de las estaciones magistrales. (Anexo 2). Las categorías vehiculares fueron clasificadas en los mismos rangos de flujo vehicular y finalmente, se calculó un valor medio para cada estación de aforo empleando el rango de clasificación mostrado en la Tabla 2.

Tabla 2 Rango establecido para clasificación de vías principales según flujo vehicular

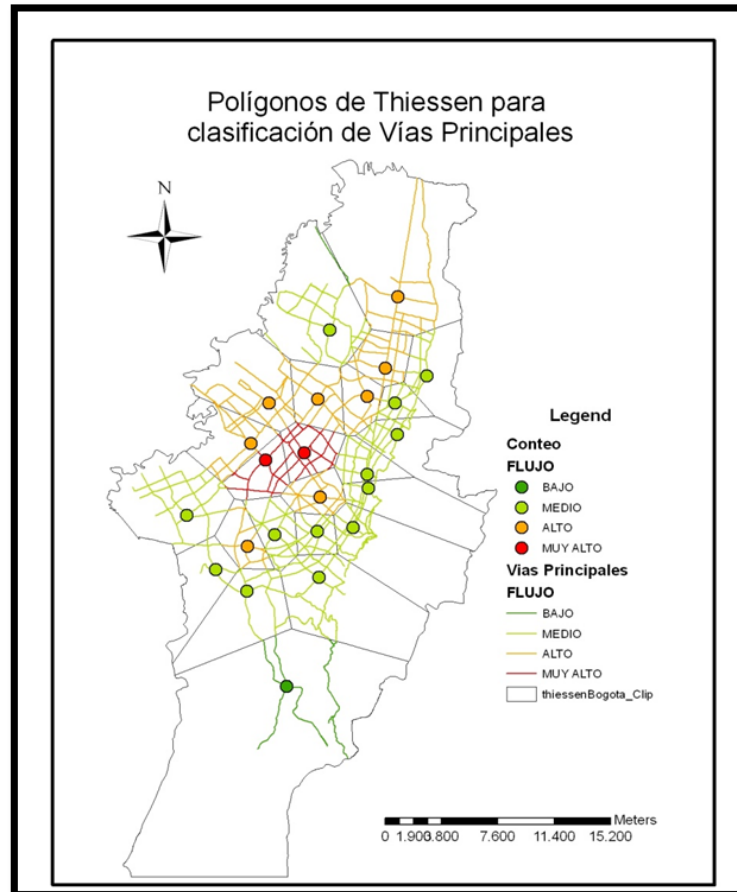
| Número de vehículo | Clasificación |
|-------------------------------------|---------------|
| <i>Vehículos Mixtos</i> | |
| Menores o iguales a 4000 vehículos | BAJO |
| Entre 4000 a 8000 vehículos | MEDIO |
| Entre 8000 a 12000 vehículos | ALTO |
| Mayores a 12000 vehículos | MUY ALTO |
| <i>Vehículos Livianos</i> | |
| Menores o iguales a 4000 vehículos | BAJO |
| Entre 4000 a 8000 vehículos | MEDIO |
| Entre 8000 a 10000 vehículos | ALTO |
| Mayores a 10000 vehículos | MUY ALTO |
| <i>Vehículos TPC</i> | |
| Menores o iguales a 500 vehículos | BAJO |
| Entre 500 a 1000 vehículos | MEDIO |
| Entre 1000 a 1500 vehículos | ALTO |
| Mayores a 1500 vehículos | MUY ALTO |
| <i>Vehículos Pesados (Camiones)</i> | |
| Menores o iguales a 400 vehículos | BAJO |
| Entre 400 a 600 vehículos | MEDIO |
| Entre 600 a 800 vehículos | ALTO |
| Mayores a 800 vehículos | MUY ALTO |

Fuente: el Autor, empleando la herramienta SIG

Dado que el flujo de vehículos no es igual en toda la longitud de las vías principales, se distribuyeron los flujos vehiculares en las vías con ayuda de los valores registrados en los puntos de aforo, para lo cual se hizo uso de la herramienta “*polígonos de Thiessen*” (“*Thiessen Polygons*”) de ArcGIS®. Esta herramienta convierte una capa de puntos en una capa de polígonos proximales. La característica especial de estos polígonos, es que se generan a partir de un solo punto de entrada y su ubicación dentro de cada polígono está más cercana a ese punto, que a los demás puntos de la capa de entrada. De esta forma, a la longitud de las vías principales que se encuentren dentro de un polígono específico, se le asignó el flujo vehicular del punto de aforo que sirvió para generar dicho polígono. (Figura 3). En el resultado de esta herramienta se puede observar los puntos de aforo clasificados según la tabla de flujo vehicular (MUY ALTO, ALTO, MEDIO y BAJO) con su respectiva zona de dominio (polígonos de Thiessen) y las vías principales influenciadas por estas. En el anexo 3 se

presentan los resultados obtenidos en el análisis realizado con los polígonos de Thiessen.

Figura 3 Polígonos de Thiessen para clasificación de vías principales.

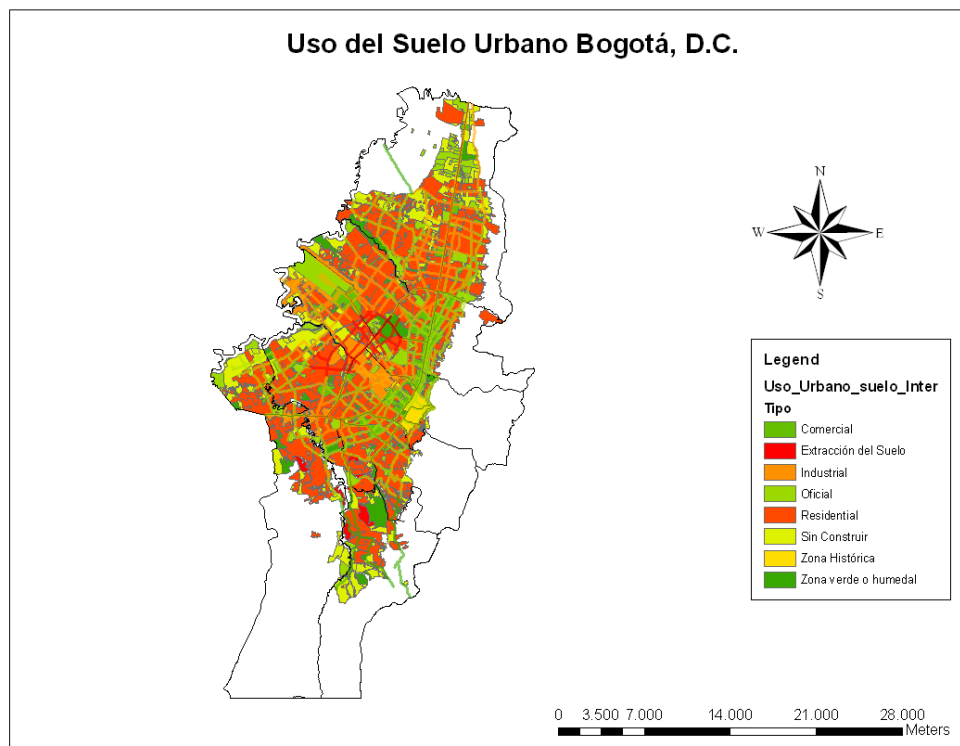


Fuente: el Autor, empleando la herramienta SIG

En la figura anterior se observa que las vías con muy alto flujo vehicular se encuentran ubicadas en las localidades de Engativá, Puente Aranda, Kennedy, Barrios Unidos, Teusaquillo y Fontibón. Para las demás localidades, las vías principales se caracterizan por poseer un flujo vehicular medio o alto. Solamente en la localidad de Usme la vía principal baja a una categoría inferior.

En cuanto a la clasificación de las vías secundarias, al no contar con aforos vehiculares que proporcionen el comportamiento de las fuentes móviles sobre estas vías, el flujo vehicular fue definido para cada una de las localidades del distrito, empleando la clasificación del uso del suelo proporcionada por la SDA (Figura 4).

Figura 4 Uso del suelo urbano de Bogotá, D.C.



Fuente: Secretaría Distrital de Ambiente, 2008

A cada uno de los usos del suelo se le atribuyó un índice de carga vehicular (Tabla 3), que va desde 0, cuando no existe tráfico vehicular, hasta 3 cuando existe alto flujo vehicular.

Tabla 3 Índice de flujo vehicular otorgado a cada uso del suelo de Bogotá D.C.

| Uso del Suelo. Zonas | Descripción | Índice de Flujo |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Verde o humedal | Parques, Humedales, zona arborizada y cuerpos de Agua. Construcción vial nula | 0 |
| Sin Construir | Lotes baldíos, zonas sin red vial o terrenos sin clasificación de actividad según POT | 0 |
| Extracción del Suelo | Áreas de arenas y explotación de minerales. Baja o ninguna extensión vial. | 1 |
| Residencial | Zonas urbanizadas de vivienda. Flujo intermedio, horas pico. | 2 |
| Industrial | Zona de actividad industrial. Tráfico pesado en horas laborales | 3 |
| Oficial | Zona de oficinas, actividades oficiales y aeropuerto. Tráfico intermitente. Tráfico alto en horas pico. | 2 |
| Zona histórica | Zona centro de la ciudad y alrededores de alcaldías locales. Alto flujo vehicular durante horas laborales y nocturnas. | 3 |
| Zona Comercial | Oficinas y establecimientos comerciales. Flujo vehicular muy alto durante todos los días. | 3 |

Fuente: el Autor, basado en el uso del suelo urbano de Bogotá D.C.

Apoyado en la superficie de cada categoría y en la superficie total del uso del suelo del área urbana de Bogotá, el índice de carga vehicular para cada localidad, fue calculada mediante la ecuación 5:

$$T_L = \frac{\sum T_i \times A_{i,L}}{\sum A_{i,L}} \quad (5)$$

En donde, T_L es el índice de tráfico para la localidad L, T_i es el índice de tráfico para cada categoría de uso de suelo i, y $A_{i,L}$ es el área del uso del suelo i en la localidad L.

Esta ponderación produjo un conjunto de índices, que varían entre aproximadamente 1 y 2,5. De acuerdo con el índice generado para cada localidad, estas se agruparon y clasificaron de la siguiente forma:

- Localidades con índice de flujo vehicular de 1 a 1,5 se clasifican como áreas con bajo flujo vehicular.
- Localidades con índice entre 1,5 y 2 como áreas con medio flujo vehicular.
- Localidades con índice entre 2 y 2,5 como áreas de alto flujo vehicular.

Finalmente, la clasificación de vías empleadas en este proyecto se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4 Longitud total de los segmentos de vías en las diferentes categorías y subcategorías de vías

| Vías Principales | PRINC_B | PRINC_M | PRINC_A | PRINC_MA |
|-------------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Longitud [Km] | 35 | 319 | 226 | 46 |
| Vías Secundarias | SEC_B | SEC_M | SEC_A | |
| Longitud [Km] | 2.300 | 5.351 | 1.084 | |
| Otras Vías | RUR | TM_TRONC | TM ALIM | |
| Longitud [Km] | 283 | 78 | 422 | |

Fuente: El autor, empleando la herramienta SIG.

En la anterior tabla se puede observar que las vías principales fueron clasificadas en cuatro subcategorías, relacionadas con el flujo vehicular:

- Vías con Baja carga vehicular: PRIN_B;
- Vías con Media carga vehicular: PRIN_M;
- Vías con Alta carga vehicular: PRIN_A y
- Vías con Muy Alta carga vehicular: PRIN_MA.

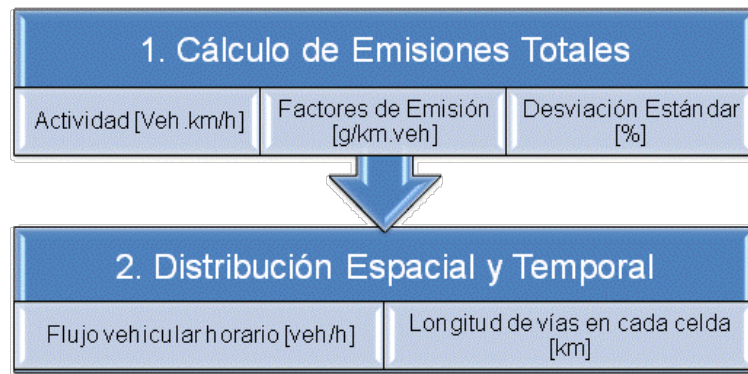
Las vías secundarias en 3 subcategorías:

- Vías con Bajo flujo vehicular: SEC_B;
- Vías con Medio flujo vehicular: SEC_M y
- Vías con Alto flujo vehicular = SEC_A.

2.2.2 Creación de ficheros de entrada (INPUT)

EMISENS requiere de 2 grupos de ficheros de entrada (Figura 5): el primer grupo es necesario para estimar las emisiones totales generadas por las fuentes móviles en el dominio modelado. El segundo grupo es empleado por el programa para elaborar la distribución en el espacio y en el tiempo de las emisiones totales.

Figura 5 Grupo de ficheros de entrada (INPUT) empleados por EMISENS



Fuente: El autor.

- **Actividad vehicular [Veh.km/h]**

Se calculó la actividad vehicular de las fuentes móviles en todo el dominio a modelar. Para tal fin, se empleó la información de a) número de fuentes que pertenecen a la categoría vehicular y b) la distancia recorrida de cada categoría vehicular. En la Tabla 5 se presenta la información en mención y la actividad vehicular calculada.

Tabla 5. Numero de fuentes, distancia recorrida y actividad vehicular, año base 2008.

| Categoría vehicular | Numero de fuentes¹ [Veh] | Distancia (A) [kmd⁻¹] | Actividad³ [Veh.Km.h⁻¹] |
|----------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| VP_CC | 889.577 | 37,8 | 1.401.083,78 |
| T | 51.953 | 231 | 500.047,63 |
| B_MB | 18.974 | 211 | 166.813,08 |
| C | 24.997 | 85 | 88.531,04 |
| ET | 368 | 172,5 | 2.645 |
| TM- Art ² | 1.070 | 300 | 13.375,0 |
| TM-Alim ² | 449 | 200 | 3.741,67 |
| M | 128.860 | 68,5 | 367.787,92 |

Fuentes: 1. Rodríguez, 2009; 2. Información proporcionada por Transmilenio S.A.; 3. El Autor

Nota: **VP_CC:** Vehículos de Pasajeros_Camperos y Camionetas, **T:** Taxis, **B_MB:** Bus y Busetas_Microbus, **C:** Camiones, **ET:** Escolar o de Turismo, **TM-Art:** TransMilenio Articulado, **TM-Alim:** TransMilenio Alimentador, **M:** Motos.

Una vez obtenida la información de la actividad vehicular en todo el dominio a modelar, se distribuyó entre las categorías vehiculares. Esta distribución se debe realizar según el flujo vehicular de las fuentes móviles que circulan en cada una de las vías. Para establecer el comportamiento de las fuentes móviles en las vías, inicialmente se definió una ponderación de 0 a 1, con el fin de indicar que porcentaje del total de fuentes móviles que pertenecen a la categoría vehicular, circulan en cada una de las vías. Tal ponderación se definió de acuerdo a consultas realizadas a personas que habitan en diferentes sectores de la ciudad. En la Tabla 6, se presenta la ponderación en mención; y en la Tabla 7, los valores obtenidos de la actividad vehicular, en cada una de las vías.

Tabla 6 Ponderación del flujo vehicular, en cada una de las vías.

| Cat. Vehicular | Princ. | Sec. | Rur. | TR - Art | TR - Alim. |
|-----------------------|---------------|-------------|-------------|-----------------|-------------------|
| VP_CC | 0,50 | 0,48 | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| T | 0,40 | 0,58 | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| B_MB | 0,73 | 0,30 | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| C | 0,70 | 0,25 | 0,05 | 0,00 | 0,00 |
| ET | 0,40 | 0,55 | 0,05 | 0,00 | 0,00 |
| TM_Art | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| TM_Ali | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| M | 0,50 | 0,48 | 0,02 | 0,00 | 0,00 |

Fuente: El Autor

Tabla 7 Actividad vehicular, por cada categoría vehicular, [Km.veh.h⁻¹], primera aplicación de EMISENS

| Cat. Vehicular | Princ. | Sec. | Rur. | TR - Art | TR - Alim. |
|-----------------------|---------------|-------------|-------------|-----------------|-------------------|
| VP_CC | 7'005.412 | 672.520 | 28.022 | 0,00 | 0,00 |
| T | 200.019 | 290.028 | 10.001 | 0,00 | 0,00 |
| B_MB | 121.774 | 41.703 | 3.336 | 0,00 | 0,00 |
| C | 61.972 | 22.133 | 4.427 | 0,00 | 0,00 |
| ET | 1.058 | 1.455 | 132 | 0,00 | 0,00 |
| TM_Art | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 13.375 | 0,00 |
| TM_Ali | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3.742 |
| M | 183.894 | 176.538 | 7.356 | 0,00 | 0,00 |

Fuente: El Autor

La información de la Tabla 7 corresponde a la clasificación de vías empleada en la primera ejecución del modelo. Para la segunda aplicación del modelo, las actividades obtenidas en la Tabla 7 se distribuyeron entre las categorías de vías definidas para aplicación final.

La distribución de las vías principales se realizó calculando el valor máximo del tráfico vehicular, para todas las categorías vehiculares; y todos los puntos de medición clasificados en la misma categoría de tráfico. La Tabla 8 muestra el valor máximo empleado para clasificar cada categoría vehicular y cada categoría de vía principal.

Tabla 8 Valores máximos de trafico [veh/h]

| Valor [veh/h] | VP_CC + T | B_MB | C | M | ET |
|----------------------|------------------|-------------|----------|----------|-----------|
| PRINC_B | 1.073 | 446 | 301 | 347 | 76 |
| PRINC_M | 3.327 | 809 | 217 | 665 | 191 |
| PRINC_A | 7.887 | 743 | 773 | 1.319 | 549 |
| PRINC_MA | 11.607 | 1.317 | 933 | 2.704 | 708 |
| TOTAL | 23.894 | 3.315 | 2.224 | 5.035 | 1.524 |

Fuente: El Autor

Estos valores máximos son el punto de partida para determinar la fracción recorrida en las vías principales. La fracción se obtuvo dividiendo cada valor máximo, entre el total de la misma categoría vehicular. Los valores en porcentajes son presentados en la Tabla 9.

Tabla 9 Porcentaje recorrido en cada categoría de vía principal, por cada categoría vehicular

| Fracción [%] | VP_CC + T | B_MB | C | M | ET |
|--------------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| PRINC_B | 4,49 | 13,45 | 13,53 | 6,89 | 4,98 |
| PRINC_M | 13,92 | 24,39 | 9,77 | 13,20 | 12,56 |
| PRINC_A | 33,01 | 22,43 | 34,74 | 26,20 | 36,02 |
| PRINC_MA | 48,58 | 39,73 | 41,96 | 53,71 | 46,44 |

Fuente: El Autor

La actividad vehicular en cada tipo de vía, por cada categoría vehicular, obtenida en la primera aplicación y que fue reportada en la Tabla 7, se distribuyó en las vías principales multiplicándola por los factores de la Tabla 9.

Con relación a las vías secundarias, la distribución de la actividad vehicular en cada tipo de vía, por cada categoría vehicular; se basó en la longitud total de cada una de las vías secundarias, ya que los datos de tráfico concernientes a esta categoría no se encuentran disponibles. Los porcentajes de la longitud de vías fueron modificados para las categorías de bajo y alto tráfico, con el fin de tener en cuenta la diferencia de flujo.

Las longitudes totales de cada categoría, el porcentaje relativo que representan y el porcentaje final tenido en cuenta para la modelación de los valores de tráfico alto y bajo, son presentados en la Tabla 10.

Tabla 10 Factores de clasificación de las vías secundarias, basados en la longitud de vía.

| Categoría vehicular | Longitud [km] | Longitud [%] | Fracción [%] |
|---------------------|---------------|--------------|--------------|
| SEC_B | 2.300 | 10% | 5% |
| SEC_M | 5.351 | 75% | 75% |
| SEC_A | 1.084 | 15% | 20% |

Fuente: El Autor

Teniendo en cuenta que las vías de TransMilenio, y las vías rurales no sufrieron modificaciones, la actividad vehicular para cada una de estas vías son los mismos valores calculados en la primera aplicación del modelo.

Los valores definitivos de la actividad vehicular en las vías principales y secundarias, son presentados en la Tabla 11.

Tabla 11 Actividad vehicular en las vías principales y secundarias por las categorías vehiculares.

| Distancia [km] | VP_CC | T | B_MB | C | ET | M |
|-----------------------|--------------|-----------|-------------|----------|-----------|-----------|
| PRINC_B | 31.457,2 | 8.981,7 | 16.379,4 | 8.385,3 | 52,7 | 12.671,7 |
| PRINC_M | 97.549,1 | 27.852,3 | 29.699,3 | 6.053,8 | 132,9 | 24.278,8 |
| PRINC_A | 231.238,1 | 66.023,2 | 27.309,7 | 21.527,3 | 381,1 | 48.180,8 |
| PRINC_MA | 340.297,5 | 97.161,9 | 48.385,3 | 26.005,4 | 491,3 | 98.762,7 |
| SEC_B | 33.626,0 | 14.501,4 | 2.085,2 | 1.106,6 | 72,7 | 8.826,9 |
| SEC_M | 504.390,2 | 217.520,7 | 31.277,5 | 16.599,6 | 1.091,1 | 132.403,7 |
| SEC_A | 134.504,0 | 58.005,5 | 8.340,7 | 4.426,6 | 291,0 | 35.307,6 |

Fuente: El Autor

- **Factores de emisión**

La información base empleada en este estudio para la estimación teórica de los factores de emisión, se obtuvo de Rodríguez & Behrentz (2009). Observando la información concerniente a los factores de emisión, se detectó que en este inventario no se calcularon los factores de emisión de algunos contaminantes de interés para todas las categorías vehiculares establecidas. Por ejemplo, para la flota vehicular pesada no fueron utilizados factores de emisión para CO, NO_x y THC. Tampoco se estimaron las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) para todas las categorías vehiculares. En este estudio, por lo tanto, se complementó la estimación de emisiones utilizando la metodología europea COPERT IV (COPERT, 2010). En la Tabla 12 se observa un consolidado de los factores de emisión reportados por Rodríguez (2009), y los estimados en este estudio.

Tabla 12 Consolidado de Factores de Emisión: Rodríguez (2009) y COPERT IV

| Cat. Vehicular | Factores de Emisión [gr/km] | | | | | | | | | |
|----------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|
| | CO | | NOx | | VOC | | PM | | SO2 | |
| | Valor | Error | Valor | Error | Valor | Error | Valor | Error | Valor | Error |
| VP1 | 7 | 3 | 0,7 | 0,2 | 0,9 | 0,4 | 0,0032 | 0,0022 | 0,34 | 0,12 |
| VP2 | 9 | 5 | 0,9 | 0,5 | 0,9 | 0,5 | 0,0032 | 0,0022 | 0,34 | 0,12 |
| VP3 | 60 | 20 | 1,63 | 0,77 | 7 | 3 | 0,0032 | 0,0022 | 1,63 | 0,56 |
| VP4 | 70 | 25 | 2 | 1 | 9 | 3,5 | 0,0032 | 0,0022 | 1,87 | 0,64 |
| CC1 | 10 | 8 | 1 | 0,5 | 0,7 | 0,3 | 0,0032 | 0,0022 | 0,25 | 0,09 |
| CC2 | 75 | 20 | 3 | 1 | 10 | 3 | 0,052 | 0,0355 | 0,22 | 0,08 |
| CC3 | 85 | 30 | 4 | 3 | 7,5 | 2 | 0,0022 | 0,0015 | 0,22 | 0,08 |
| CC4 | 40 | 25 | 3 | 1 | 4 | 1,5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| T1 | 8 | 3 | 2 | 1 | 1 | 0,5 | 0,002 | 0,0014 | 0,87 | 0,3 |
| T2 | 13 | 4 | 4 | 1,5 | 5 | 1,5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B1 | 11 | 4,17 | 7,85 | 3,7 | 2,52 | 0,89 | 0,3 | 0,2 | 0,56 | 0,19 |
| B2 | 11 | 4,17 | 11,32 | 5,33 | 2,1 | 0,74 | 1,2 | 1 | 0,75 | 0,26 |
| MB | 9 | 3,41 | 7,76 | 3,65 | 1,94 | 0,68 | 0,48 | 0,3278 | 0,57 | 0,2 |
| C1 | 4 | 1,52 | 11,49 | 5,41 | 1,73 | 0,61 | 0,9 | 0,5 | 0,67 | 0,23 |
| C2 | 4 | 1,52 | 13,11 | 6,17 | 1,86 | 0,66 | 0,8 | 0,5 | 0,75 | 0,26 |
| C3 | 3 | 1,14 | 8,99 | 4,23 | 1,16 | 0,41 | 0,3 | 0,2 | 0,61 | 0,21 |
| ET | 11 | 4,17 | 7,85 | 3,7 | 2,52 | 0,89 | 0,6 | 0,4 | 0,56 | 0,19 |
| TM-Art | 4 | 1,52 | 14,65 | 6,9 | 0,69 | 0,24 | 0,3 | 0,2049 | 1,23 | 0,42 |
| TM-Ali | 3 | 1,14 | 11,49 | 5,41 | 0,59 | 0,21 | 0,23 | 0,1571 | 0,96 | 0,33 |
| M1 | 13 | 4,93 | 0,05 | 0,02 | 6,62 | 2,33 | 0,2 | 0,1366 | 0,033 | 0,01 |
| M2 | 17 | 6,45 | 0,25 | 0,12 | 1,76 | 0,62 | 0,03 | 0,0205 | 0,064 | 0,02 |
| M3 | 22 | 8,34 | 0,35 | 0,16 | 2,05 | 0,72 | 0,04 | 0,0273 | 0,11 | 0,04 |
| M4 | 18 | 6,83 | 0,7 | 0,33 | 3,38 | 1,19 | 0,07 | 0,0478 | 0,12 | 0,04 |
| Fuente | Rodríguez (2009) | | | | | | | | | |
| | COPERT, 2007 | | | | | | | | | |
| | Estimado | | | | | | | | | |

Los factores de emisión inicialmente se encuentran estimados en función de las fuentes móviles que conforman la categoría vehicular, más no de la velocidad promedio característica de cada tipo de vía. De acuerdo con los requerimientos de EMISENS, las tasas de emisión por kilómetro recorrido se deben estimar en función de la velocidad promedio con la que operan las fuentes móviles en cada tipo de vía. En consecuencia, estos valores fueron transformados. Como paso

previo, se establecieron los promedios de velocidad de las vías principales y secundarias. Los promedios de velocidad de las vías principales se obtuvieron de SDM (2009). El valor promedio reportado es de 25 Km/h para vías de alto tráfico, valor que fue usado para todos los vehículos que circulan en las vías principales, excepto para el transporte público colectivo y los camiones. Para estas dos últimas categorías, la velocidad promedio que se utilizó fue de 20 km/h, información obtenida de las estadísticas de la Secretaría Distrital de Planeación para 2009 (SDP, 2010).

Al no contar con estudios sobre promedios de velocidad en las vías secundarias de la ciudad, se asumió una velocidad promedio de 20 km/h para las siguientes categorías: VP_CC, T, ET y M. Para las categorías B_MB y C, la velocidad que se utilizó de 13 km/h es equivalente a la velocidad de los buses alimentadores proporcionada por TransMilenio S.A, flota que principalmente circula por las vías secundarias. La velocidad promedio de los buses articulados empleada en este estudio fue de 27 km/h que fue estimada por TransMilenio S.A., a partir de mediciones reales.

En cuanto a los promedios de velocidad reportados para las vías rurales (intermunicipales), se estableció para todas las categorías, con excepción para los buses de transporte público y camiones (35 km/h), una velocidad de 47 km/h. La Tabla 13, muestra el consolidado de los promedios de velocidad promedio a la que circulan las fuentes móviles, en las categorías de vías definidas en este estudio.

Tabla 13 Velocidades promedios en las diferentes categorías de vías

| Velocidad [km/h] | PRINC ¹ | SEC | RUR ⁴ | TM_TRONC ² | TM_ALIM ² |
|------------------|--------------------|-----------------|------------------|-----------------------|----------------------|
| VP_CC | 25 | 20 ⁴ | 47 | 0 | 0 |
| T | 25 | 20 ⁴ | 47 | 0 | 0 |
| B_MB | 20 ³ | 13 ² | 35 | 0 | 0 |
| C | 20 ³ | 13 ² | 35 | 0 | 0 |
| ET | 25 | 20 ⁴ | 47 | 0 | 0 |
| TM_Art | 0 | 0 | 0 | 27 | 0 |
| TM_Alím | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 |
| M | 25 | 20 ⁴ | 47 | 0 | 0 |

Fuentes: 1. SDM, (2009); 2. TransMilenio S.A.; 3. SDP, (2010); 4. Información asumida por el autor.

Una vez definidas las velocidades medias de los vehículos en cada subcategoría vial, se procedió a realizar la adaptación de los factores de emisión de acuerdo a las velocidades anteriormente descritas. Los resultados de los factores de emisión para cada contaminante, en cada categoría vial, se presentan en el anexo 4.

- **Incertidumbres**

EMISENS tiene en cuenta los valores de error de los parámetros de entrada para calcular la influencia relativa sobre la incertidumbre de los resultados. Estos valores se muestran en la Tabla 15.

Tabla 14 Desviación Estándar para los ficheros de entrada (INPUT), [%].

| Fichero de entrada | Valor, [%] |
|---------------------|------------|
| Actividad Vehicular | 30 |
| NOx | 47,1 |
| CO | 37,93 |
| SO ₂ | 34,39 |
| THC | 35,22 |
| PM | 68,29 |

Fuente: El Autor

La desviación estándar de la actividad vehicular fue calculada comparando los dos grupos de datos empleados para obtener la actividad de las diferentes categorías vehiculares (ver Tabla 5). Por su parte, la desviación estándar para los factores de

emisión, fueron directamente derivados de los valores de varianza reportados por Rodriguez & Behrentz (2009), usando el valor promedio de todas las mediciones elaboradas para cada contaminante.

2.2.3 Distribución espacial y temporal

Para preparar los archivos que contienen la distribución en el espacio se empleó ArcGIS®. Se produjo una tabla conformada por 4 columnas con los siguientes campos: número de identificación (ID) para cada celda, coordenadas (X,Y) de las celdas y por último, longitud total de las vías segmentadas en cada celda. La longitud total de las vías segmentadas se dividió entre el total de cada una de las subcategorías de vías (ver Tabla 4), con el fin de obtener la fracción de la longitud total en cada celda. Este procedimiento se realizó para cada categoría vial.

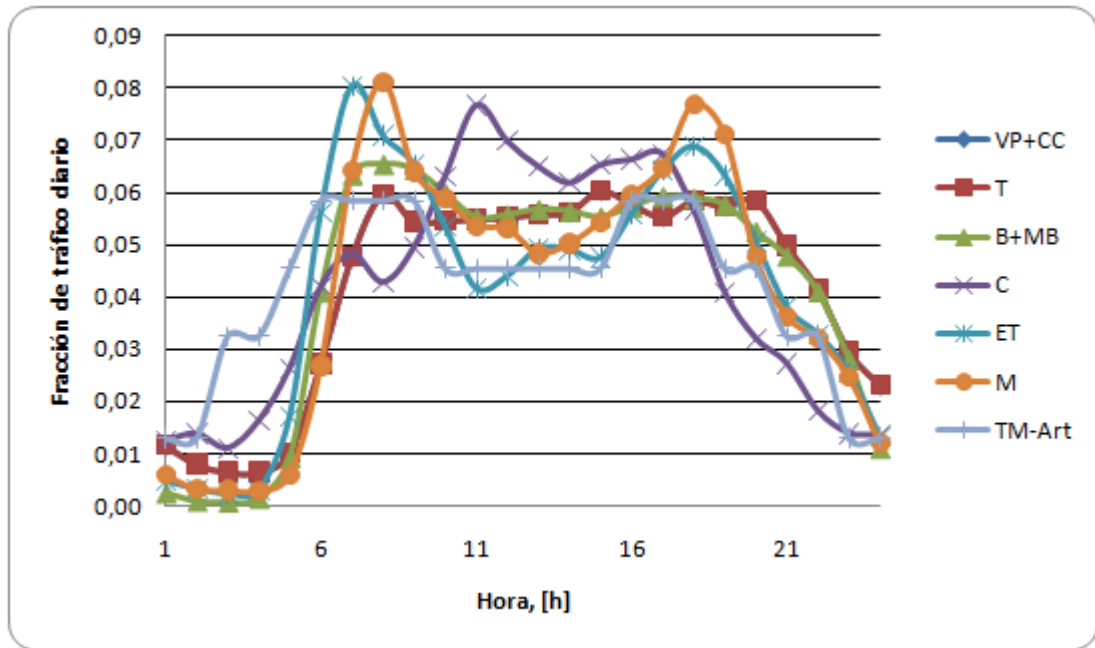
La distribución en el tiempo para todas las categorías vehiculares a excepción de aquellas del sistema TransMilenio, se realizó con base en la información de flujo vehicular que se encontraba disponible en el aforo elaborado por la SDM. La flota vehicular del sistema TransMilenio no se incluyó en el estudio de la SDM, por lo cual la información relacionada con estos flujos no es pública. Por lo tanto, la información concerniente al flujo vehicular del sistema de transporte público masivo se construyó teniendo en cuenta las horas de operación indicadas en la página web de TransMilenio S.A.⁴

Para obtener el TPD de las demás categorías vehiculares, se analizaron las estaciones magistrales del aforo vehicular, y se calcularon valores promedios para cada hora del día; lo cual se realizó para cada categoría vehicular definida en este proyecto. Dividiendo los valores individuales obtenidos de este análisis, entre el total diario de cada categoría, se obtuvo las cantidades necesarias como archivos de entrada para la distribución el tiempo.

⁴ <http://www.transmilenio.gov.co>

La distribución en el tiempo para las categorías de las vías principales, se observa en la Figura 6.

Figura 6 Fracción de tráfico diario para cada hora y categoría vehicular



Fuente: El Autor

Los picos de tráfico para cada categoría vehicular se pueden observar claramente en la mañana (alrededor de las 07:00) y por la tarde (alrededor de las 18:00). Solo los camiones presentan un comportamiento muy distinto, ya que casi no circulan durante las horas pico típicas de la ciudad. Este pico por la mañana, por ejemplo se presenta más tarde, alrededor de las 11:00.

2.2.4 Evaluación y visualización de resultados finales

Los resultados finales obtenidos por EMISENS se evaluaron comparándolos con resultados obtenidos en estudios previos realizados en la ciudad. Los resultados arrojados por EMISENS corresponden a archivos que contienen las emisiones de

las fuentes móviles distribuidas en cada una de las horas del día típico, en cada una de las 3.025 celdas en las que se dividió el dominio modelado. Con el propósito de visualizar los archivos finales obtenidos en esta etapa, los archivos arrojados por EMISENS se introdujeron a ArcGIS® para elaborar mapas de concentración, empleando escalas de color, para cada uno de los contaminantes estudiados en esta etapa, por cada una de las horas del día típico. Finalmente, se elaboró una animación GIF con cada uno de los mapas horarios elaborados para cada contaminante, con el fin de visualizar su evolución a través de las horas del día.

2.2.5 Especiación de COVs

Considerando que la mayor proporción de COVs se generan por la combustión de la gasolina (Zarate et al. 2007), solo se realizó en este estudio la especiación de los compuestos orgánicos volátiles de las fuentes móviles que operan con motores alimentados por este combustible, es decir por los vehículos de carga liviana. Para realizar la especiación química de los COVs generados por estas fuentes móviles, se usó la metodología empleada por Zarate et al. (2007), la cual utiliza los grupos de especies químicas propuestos por Stockwell et al. (1997) en su Mecanismo Químico Atmosférico Regional (RACM)⁵. Las fracciones másicas de las especies químicas que conforman los COVs empleadas para las fuentes móviles de carga liviana, se presentan en la Tabla 15.

⁵ Por sus siglas en ingles: Regional Atmospheric Chemistry Mechanism (RACM)

Tabla 15 Fracción másica COVs fuentes móviles con motores alimentados con gasolina

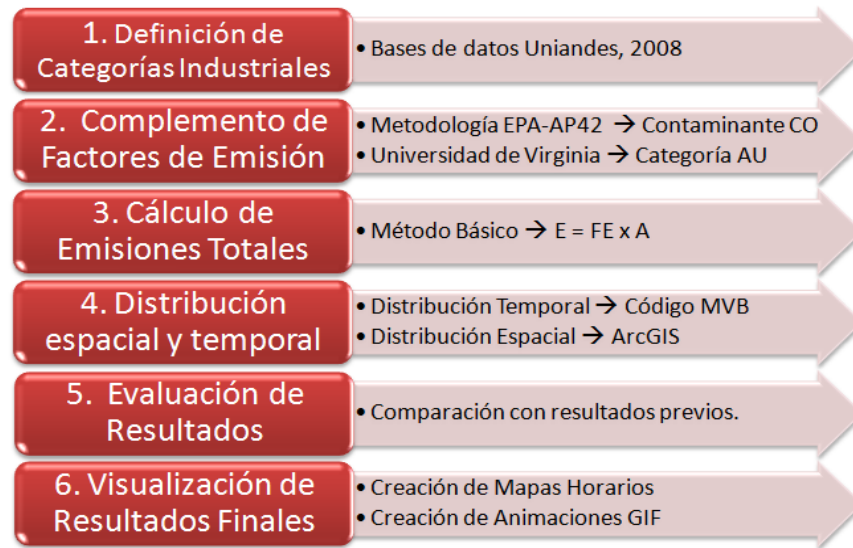
| Especie | Definición | Fracción Másica |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Alcanos | | |
| ETH | Etano | 1,13E-02 |
| HC3 | Alcanos, alcoholes, ésteres y alquinos con una constante de tasa de reacción OH menor a 3.4×10^{-12} cm ³ /s | 1,31E-01 |
| HC5 | Alcanos, alcoholes, ésteres y alquinos con una constante de tasa de reacción OH entre 3.4×10^{-12} cm ³ /s y 6.8×10^{-12} cm ³ /s | 9,66E-02 |
| HC8 | Alcanos, alcoholes, ésteres y alquinos con una constante de tasa de reacción OH mayor a 6.8×10^{-12} cm ³ /s | 6,82E-02 |
| Alquenos | | |
| ETE | Eteno | 9,03E-02 |
| OLT | Alquenos terminales | 9,61E-02 |
| OLI | Alquenos internos | 4,51E-02 |
| Aromáticos | | |
| TOL | Tolueno y otros aromáticos menos reactivos | 1,86E-01 |
| XYL | Xileno y otros aromáticos más reactivos | 1,86E-01 |
| Carbonilos | | |
| HCHO | Formaldehído | 1,85E-02 |
| ALD | Acetaldehído y aldehídos mayores | 7,08E-02 |
| KET | Cetonas | 5,00E-04 |

Fuente: el Autor, adaptado de Zarate, 2007.

2.3 FASE 3: FUENTES FIJAS

La metodología empleada en esta fase se puede observar en la Figura 7. La metodología empleada en esta fase es muy similar a la empleada en la fase anterior, inicia con una definición de categorías industriales y finaliza con la evaluación y distribución de resultados finales.

Figura 7 Metodología fase 3: fuentes fijas



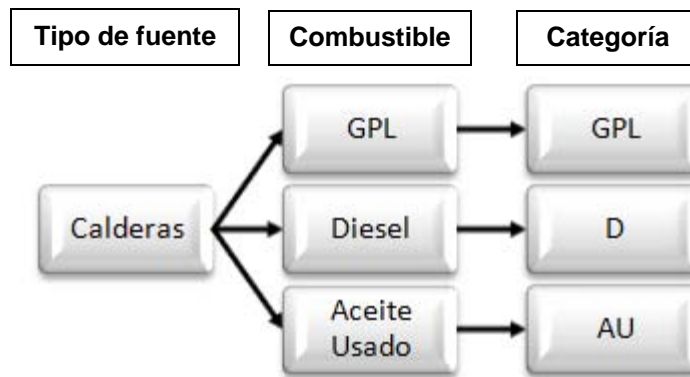
Fuente: El Autor

2.3.1 Definición de categorías industriales

Las categorías industriales empleadas en este estudio, se tomaron de las categorías definidas por Fandiño (2009) (Ver anexo 5).

Se adicionaron las categorías industriales relacionadas a las calderas que se muestran en la Figura 8.

Figura 8 Categorías industriales adicionales por este estudio



Fuente: el Autor, elaborada a partir de la base de datos de Fandiño (2009)

2.3.2 Complemento de factores de emisión

Los factores de emisión de las fuentes fijas fueron complementados con información proveniente de la base de datos AP-42 (USEPA, 1995) y de los factores publicados por DEQ-Virginia, 2008. Los factores de emisión usados se observan en la Tabla 16.

Tabla 16 Factores de emisión por categoría

| Categ. Industrial | Unidad | Factores de Emisión | | | | | | | | | |
|-------------------|---------------------|---------------------|------|-----|-----|--------|-----|------|--------|-----|--------|
| | | CO | | NOx | | | PM | | | SO2 | |
| CG1 | (g/m ³) | 1,344 | 6,5 | +/- | 5 | 0,6 | +/- | 0,5 | 0,02 | +/- | 0,015 |
| CG2 | (g/m ³) | 1,344 | 0,8 | +/- | 0,6 | 0,25 | +/- | 0,2 | 0,0005 | +/- | 0,0004 |
| CG3 | (g/m ³) | 1,334 | 1 | +/- | 0,9 | 0,05 | +/- | 0,02 | 0,005 | +/- | 0,005 |
| HG | (g/m ³) | 1,334 | 1,2 | +/- | 1 | 0,2 | +/- | 0,19 | 0,07 | +/- | 0,07 |
| CC1 | (g/kg) | 0,3 | 8 | +/- | 5 | 6 | +/- | 4 | 22 | +/- | 18 |
| CC2 | (g/kg) | 0,3 | 5 | +/- | 2 | 10 | +/- | 8 | 12 | +/- | 4 |
| HC | (g/kg) | 0,3 | 5 | +/- | 3 | 12 | +/- | 8 | 12 | +/- | 10 |
| HL | (g/kg) | 0,3 | 5 | +/- | 3 | 12 | +/- | 8 | 12 | +/- | 10 |
| GPL | (g/L) | 1,008 | 1,8 | | | 0,096 | | | 0,018 | | |
| D | (g/L) | 0,6 | 6,6 | | | 2,0406 | | | 28,26 | | |
| AU | (g/L) | 0,288 | 3,72 | | | 1,2 | | | 0,12 | | |
| Fuentes: | | Fandiño (2009) | | | | | | | | | |
| | | USEPA AP 42 | | | | | | | | | |
| | | U. VIRGINIA | | | | | | | | | |

NOTA: **CG1:** Calderas a gas natural con capacidades mayores a 100 BHP y año de fabricación previo o igual a 1997, **CG2:** Calderas a gas natural con capacidades mayores a 100 BHP y año de fabricación posterior a 1997, **CG3:** Calderas a gas natural con capacidades inferiores a 100, **HG:** Hornos de alimentos a gas natural, **CC1:** Calderas a carbón con capacidades mayores a 100 BHP, **CC2:** Calderas a carbón con capacidades menores o iguales a 100 BHP, **HC:** Hornos a carbón, **HL:** Hornos ladrilleros alimentados con carbón, **GPL:** Calderas alimentadas con Gas de petróleo Licuado, **D:** Calderas alimentadas con Diesel, **AU:** Calderas alimentadas con Aceite Usado

2.3.3 Cálculo de emisiones horarias totales

Para la estimación de las emisiones totales horarias generadas por cada una de las fuentes fijas en el dominio modelado durante un día típico del año 2008, se empleó la ecuación (1). La actividad industrial hace referencia al consumo de combustible de la fuente de emisión en su tiempo de operación, obtenida de Fandiño (2009).

2.3.4 Distribución espacial y temporal

Las emisiones horarias estimadas en la actividad anterior se distribuyeron en el tiempo y en el espacio. Teniendo en cuenta que la información recibida no incluía todos los detalles del ciclo productivo de cada una de las empresas, se definieron sus horas de operación aplicando un algoritmo de asignación aleatoria en Microsoft Visual Basic®, con base en los tiempos de operación reportados para el

inventario. Las fuentes fueron divididas en 5 grupos y el inicio de operación de cada fuente se estableció teniendo en cuenta los siguientes intervalos de tiempo:

- De 1 a 12 horas de operación diaria; iniciando operación entre las 06:00 am a las 12:00 m
- De 12 a 16 horas de operación diaria; iniciando operación entre las 02:00 am a las 08:00 am
- De 16 a 20 horas de operación diaria; iniciando operación entre la 01:00 am a las 04:00 am
- De 20 a 22 horas de operación diaria; iniciando operación entre la 01:00 am a las 02:00 am
- De 22 a 24 horas de operación diaria; iniciando operación a la 01:00 am.

La distribución en el espacio se elaboró a partir de las coordenadas geográficas de cada una de las fuentes de emisión consignadas en la base de datos recibida, después de un proceso de corrección, dado que no todas las coordenadas geográficas correspondían a las direcciones físicas de los predios en donde operan las industrias encuestadas. Se verificaron, una por una, las 1.476 fuentes de emisión que conforman la base de datos mencionada anteriormente, de las cuales fueron corregidas las coordenadas de 647 fuentes.

Con la información corregida, se construyó un fichero de entrada para la herramienta ArcGIS[®], a partir del cual se obtuvieron las emisiones totales de las fuentes fijas, para cada hora del día típico y en cada celda del dominio modelado.

2.3.5 Evaluación y visualización de resultados finales

Los resultados finales obtenidos en esta etapa se evaluaron comparándolos con resultados obtenidos en estudios previos. Posteriormente se construyeron mapas de concentración para cada uno de los contaminantes estudiados en esta etapa, y

para cada una de las horas del día típico. Finalmente, se elaboró una animación GIF con cada uno de los mapas horarios elaborados para cada contaminante, con el fin de visualizar su evolución a través de las horas del día.

3 RESULTADOS

3.1 FASE 2: FUENTES MÓVILES

3.1.1 Emisiones totales

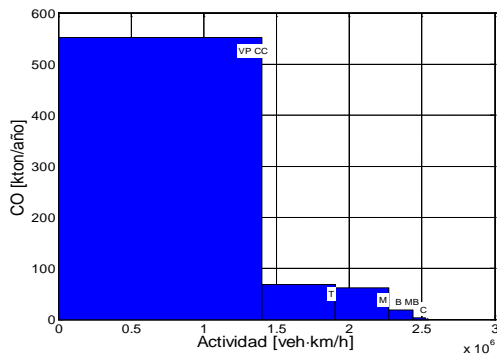
Los resultados obtenidos por el modelo EMISENS se presentan y se comparan en la Tabla 17, con los resultados estimados en estudios previos en la ciudad. Las emisiones estimadas para cada una de las categorías vehiculares son reportadas en la Figura 9 por medio de diagramas de Pareto; y en la Figura 10 se presenta la contribución por cada uno de las categorías al inventario.

Tabla 17. Comparación de resultados con estudios previos

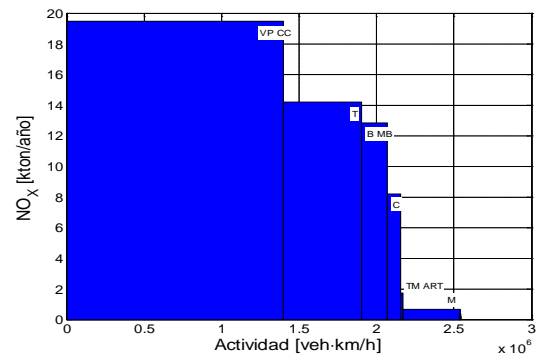
| Valores [Ton/año) | CO | NO _x | SO ₂ | PM | VOC |
|-----------------------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------|----------------|
| Este estudio | 706.925 | 57.658 | 13.009 | 1.594 | 108.011 |
| Rodríguez & Behrentz (2009) | 450.000 | 30.000 | NA | 1.100 | 60.000 |
| Bogotá 2003 | 306.162 | 13.651 | NA | 1.643 | NA |
| Bogotá (2005a) | 230.000 | 12.000 | NA | NA | 25.000 |
| Bogotá (2005b) | 900.000 | 55.000 | NA | 2.200 | NA |
| Promedio | 471.540 | 27.663 | NA | 1.648 | 42.500 |
| Mínimo (Estudios Previos) | 230.000 | 12.000 | NA | 1.100 | 25.000 |
| Máximo (Estudios Previos) | 900.000 | 55.000 | NA | 2.200 | 60.000 |

Fuente: el Autor, adaptado de Rodríguez (2009)

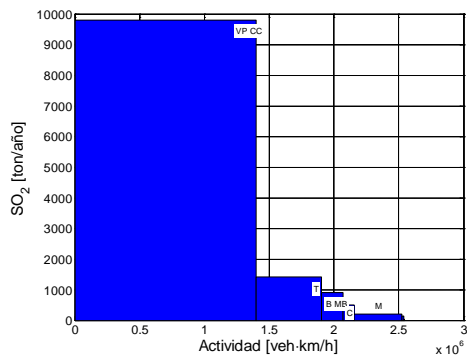
Figura 9 Diagramas de Pareto de las emisiones totales



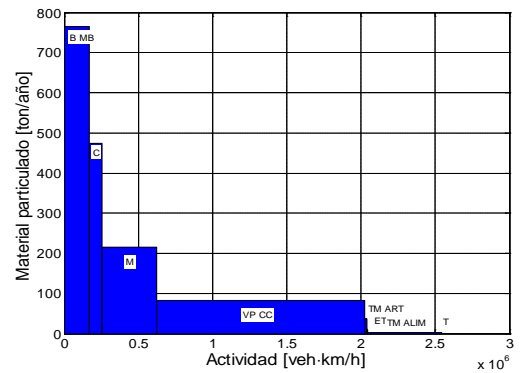
(a) CO, [kton/año]



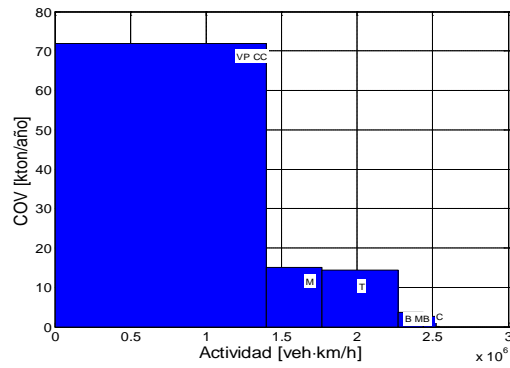
(b) NOx, [kton/año]



(c) SO₂, [ton/año]



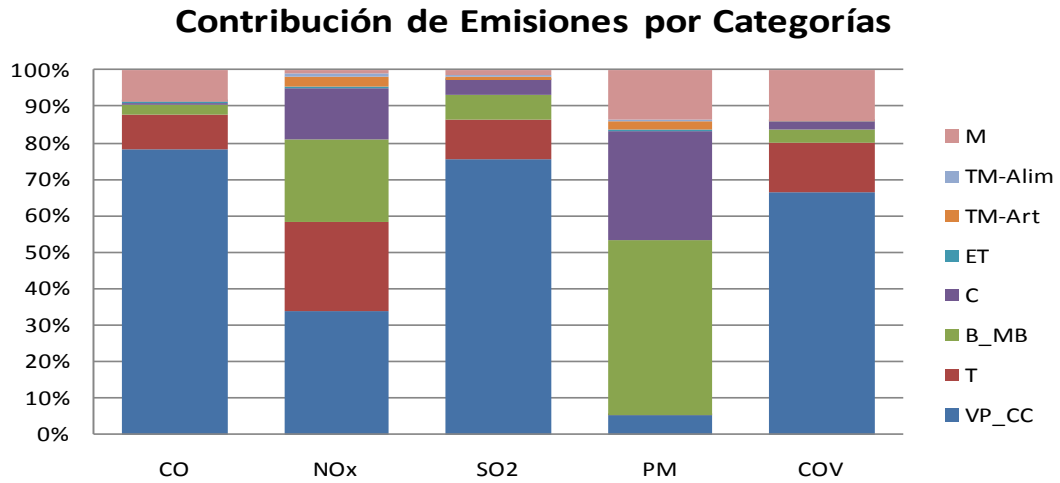
(d) PM, [ton/año]



(e) COV, [kton/año]

Fuente: el Autor

Figura 10 Contribución de las categorías vehiculares al inventario de emisiones



Fuente: el Autor

Observando los resultados obtenidos en este estudio, se puede analizar los siguientes aspectos:

Comparando los resultados de las emisiones estimadas para los 5 contaminantes estudiados, se puede observar que los valores son mayores que los obtenidos por Rodríguez (2009). Sin embargo, los resultados arrojados por EMISENS son razonables, si se considera que en el presente estudio se estimó las emisiones para toda la flota vehicular que circula en Bogotá, sin excluir categorías vehiculares. Dado que la población de vehículos en este estudio fue mayor, es lógico que las emisiones estimadas sean mayores que las estimadas en la actualización del inventario.

Los mayores contaminantes emitidos por las fuentes móviles en el dominio modelado durante el año 2008 son los siguientes: monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles (COVs), con emisiones de 706.925 ton/año y 108.011 ton/año, respectivamente. Mientras que el compuesto químico con una

menor descarga a la atmosfera es el material particulado (PM) con una emisión de 1.594 ton/año.

Las altas emisiones de CO y COVs se podría relacionar con el gran número de vehículos que conforman la categoría VP_CC (ver Tabla 5). Estos vehículos operan con motores alimentados con gasolina y alcanzan una edad media de 14 años (Rodríguez, 2009), lo que hace suponer que existe una gran proporción de fuentes móviles que no cuentan con convertidores catalíticos para disminuir las emisiones de estos contaminantes.

La categoría vehicular que domina las emisiones de CO, SO₂ y COVs es la VP_CC, con porcentajes del 78,18%, 75,30% y 66,63%, respectivamente. En esta categoría también se puede observar una contribución notoria del NOx con un porcentaje del 33,80%.

El inventario de emisiones de PM se encuentra dominado por las categorías que se encuentran conformadas por vehículos de carga pesada, específicamente por la flota de transporte público colectivo (B_MB) y los camiones (C), cada una con aportes del 47,93% y del 29,73%, respectivamente. Se puede resaltar que las motocicletas (M) que circulan dentro del dominio modelado, poseen un rol importante en el problema de la contaminación atmosférica generada por el material particulado, ya que cuentan con una contribución del 13,48% del total del PM emitido por las fuentes móviles.

Como se puede observar en la Tabla 17, los valores de CO y PM se encuentran dentro del intervalo definido por los valores máximos y mínimos de los estudios previos. Por otro lado, las emisiones obtenidas para SO₂ y COVs superan los valores máximos de los estudios previos, en un porcentaje de 9,54% y 55,55%, respectivamente. Estas diferencias probablemente se originan por el hecho de que en el presente estudio se usaron valores COPERT IV en donde se estima los

factores de emisión del SO₂ de acuerdo con los estándares de calidad de los combustibles empleados en Europa. Al comparar los estándares de calidad de los combustibles producidos en Colombia, con los estándares de calidad de los combustibles reportados en la metodología COPERT IV, se puede observar que los contenidos de Azufre, Benceno y Aromáticos son mayores en el combustible colombiano. Otro motivo por el cual podrían ser mayores las emisiones de estos contaminantes es debido a que en este estudio no se le realizaron correcciones a los factores de emisión. Se debe tener en cuenta que las tasas de emisión varían con las condiciones locales en donde operan las fuentes móviles, como por ejemplo la altura sobre el nivel del mar, humedad y temperatura.

3.1.2 Distribución espacial y temporal

Como se mencionó anteriormente, una vez EMISENS estima las emisiones totales dentro del dominio modelado, las distribuye en el espacio y en el tiempo. Los archivos arrojados por el programa contienen la distribución de las emisiones de cada uno de los contaminantes estudiados, en las 24 horas del día típico y en las 3,025 celdas en las que se dividió el dominio de modelación. A partir de estos archivos, se consolidaron las emisiones en la Tabla 18, de la cual se pudo analizar el comportamiento en el tiempo de las emisiones estimadas.

Las celdas de color amarillo indican los máximos de cada uno de los contaminantes emitidos a la atmósfera, a través de un día típico del año 2008. Los máximos para CO y COVs se presentan a las 08:00; para NOx y SO₂, las mayores emisiones se presentan a las 13:00, y para PM, a las 17:00 (Figura 11).

Con los archivos de salida arrojados por EMISENS, se construyeron mapas empleando ArcGIS®, con el fin de visualizar espacialmente las emisiones de cada contaminante en cada hora del día típico. Se obtuvieron en total 120 mapas (24 horas x 5 contaminantes). Sólo se presenta en este documento, la distribución

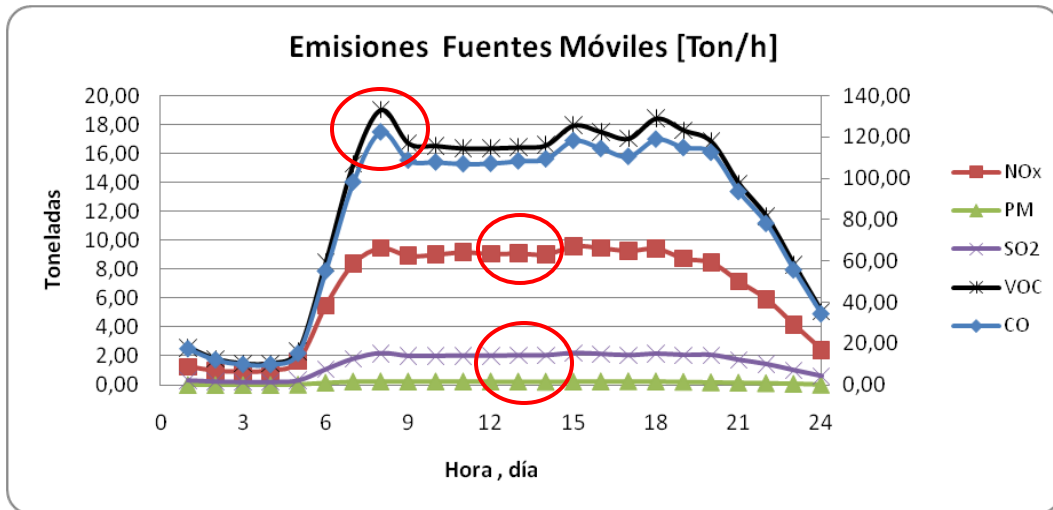
espacial para el contaminante CO a las 08:00 (Figura 12). Los mapas para todos los contaminantes, junto con las animaciones creadas, se incluirán en anexo digital, en una subcarpeta denominada “EMISIONES_MOVILES” que se puede encontrar dentro de la carpeta “RESULTADOS FINALES”.

Tabla 18 Consolidado de emisiones horarias, fuentes móviles

| Hora | Concentración, [Ton/h] | | | | |
|------|------------------------|-------------|-------------|-----------------|--------------|
| | CO | NOx | PM | SO ₂ | VOC's |
| 1 | 17,37 | 1,25 | 0,02 | 0,31 | 2,58 |
| 2 | 12,02 | 0,94 | 0,02 | 0,22 | 1,79 |
| 3 | 9,81 | 0,89 | 0,02 | 0,19 | 1,47 |
| 4 | 9,81 | 0,97 | 0,02 | 0,20 | 1,48 |
| 5 | 15,15 | 1,63 | 0,04 | 0,31 | 2,32 |
| 6 | 54,93 | 5,49 | 0,18 | 1,07 | 8,48 |
| 7 | 98,06 | 8,38 | 0,26 | 1,79 | 15,30 |
| 8 | 122,25 | 9,47 | 0,27 | 2,17 | 19,03 |
| 9 | 108,56 | 8,93 | 0,26 | 1,98 | 16,72 |
| 10 | 107,69 | 9,02 | 0,26 | 1,99 | 16,54 |
| 11 | 106,85 | 9,18 | 0,27 | 2,00 | 16,36 |
| 12 | 107,03 | 9,06 | 0,26 | 1,99 | 16,37 |
| 13 | 108,23 | 9,10 | 0,26 | 2,03 | 16,44 |
| 14 | 109,23 | 9,03 | 0,25 | 2,03 | 16,59 |
| 15 | 118,09 | 9,60 | 0,26 | 2,19 | 17,95 |
| 16 | 114,26 | 9,48 | 0,27 | 2,11 | 17,50 |
| 17 | 110,43 | 9,28 | 0,27 | 2,03 | 17,06 |
| 18 | 118,78 | 9,43 | 0,27 | 2,14 | 18,44 |
| 19 | 114,68 | 8,74 | 0,24 | 2,05 | 17,62 |
| 20 | 112,39 | 8,45 | 0,20 | 2,05 | 16,83 |
| 21 | 93,39 | 7,15 | 0,18 | 1,71 | 13,93 |
| 22 | 78,00 | 5,92 | 0,14 | 1,43 | 11,64 |
| 23 | 55,52 | 4,14 | 0,10 | 1,01 | 8,32 |
| 24 | 34,26 | 2,42 | 0,04 | 0,61 | 5,07 |

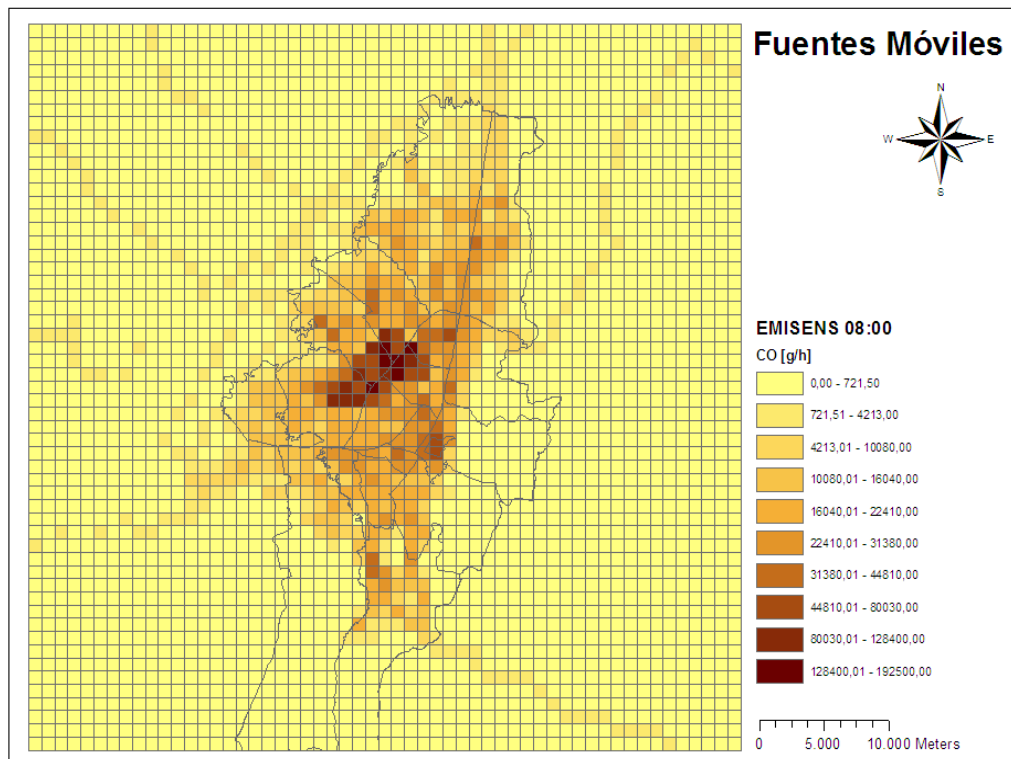
Fuente: el Autor

Figura 11 Comportamiento temporal de las emisiones, fuentes móviles



Fuente: el Autor

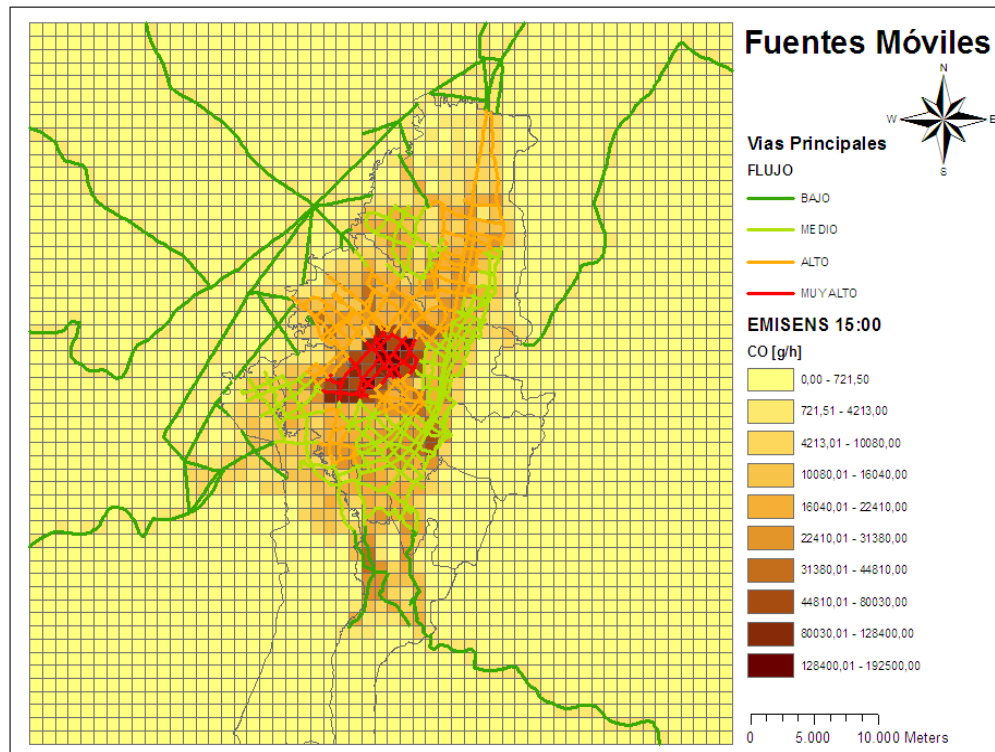
Figura 12 Emisiones de CO para las 08:00



Fuente: el Autor

El centro de mayor emisión se encuentra ubicado en las áreas que poseen el mayor flujo vehicular, es decir, en la zona industrial de Puente Aranda. Esta relación también se muestra en la Figura 13.

Figura 13 Comparación entre la emisión de CO a las 15:00 horas y la carga vehicular de las vías principales



Fuente: el Autor

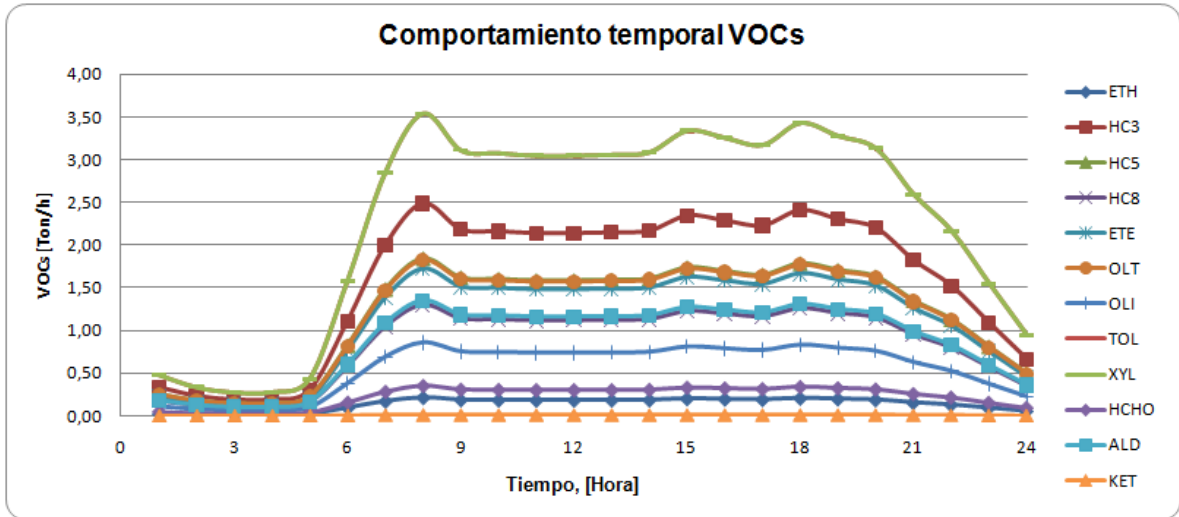
Las vías principales (PRINC_MA), señaladas con color rojo, se encuentran ubicadas en las áreas con mayores emisiones de CO, mostrando que existe una fuerte relación entre el flujo vehicular y las emisiones.

3.1.3 Especiación de COVs

La Figura 14 presenta la distribución temporal de las diferentes especies químicas que conforman los COVs emitidos por las fuentes móviles que operan con motores

alimentados con gasolina y en el anexo 6 se adjuntan los valores horarios de cada una de las especies.

Figura 14 Distribución temporal de los COVs, fuentes móviles



Fuente: el Autor

Las especies químicas que conforman los aromáticos (XYL: Xileno y otros aromáticos más reactivos; TOL: Tolueno y otros aromáticos menos reactivos), presentan el mismo comportamiento temporal y son las que más se generan en el día típico.

3.2 FASE 3: FUENTES FIJAS

3.2.1 Emisiones totales provenientes de las fuentes fijas

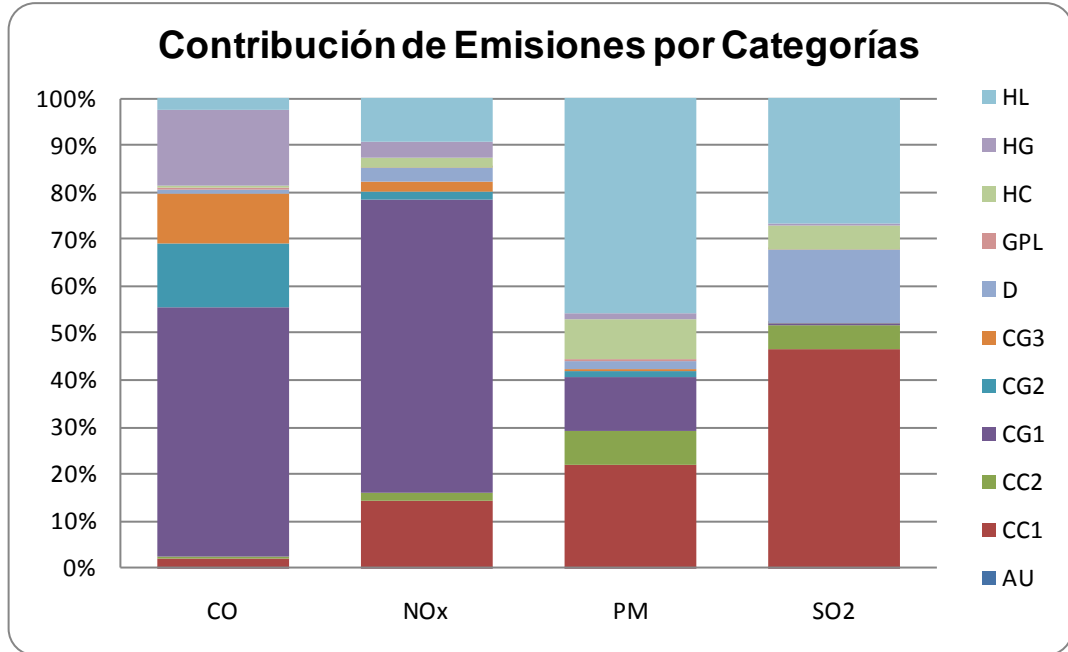
Las emisiones anuales generadas por las fuentes fijas en el dominio modelado, se presentan en la Tabla 19. En la Figura 15 se incluye la contribución de cada una de las categorías estudiadas sobre el total de las emisiones anuales emitidas por las industrias.

Tabla 19 Emisiones anuales, fuentes fijas

| Emisiones [Ton/año] | CO | NO _x | SO ₂ | PM |
|---------------------|-----|-----------------|-----------------|-------|
| Calculado | 508 | 2.088 | 1.741 | 1.017 |
| Extrapolado | 607 | 2.497 | 2.082 | 1.216 |
| Fandiño, 2009 | NA | 2.600 | 2.200 | 1.400 |

Fuente: El Autor

Figura 15 Contribución de las categorías industriales al inventario de emisiones



Fuente: El Autor

Los valores extrapolados que se consignan en la tabla anterior, incluyen las fuentes que no poseen información suficiente; motivo por el cual no se pudieron calcular sus emisiones. De las 1.478 fuentes, 242 no se tuvieron en cuenta en este estudio, cifra que representa un porcentaje del 16,37%.

Los valores obtenidos en este estudio son relativamente cercanos a los reportados en la actualización del inventario de fuentes fijas, teniendo en cuenta los enormes valores de los porcentajes de error que poseen los factores de emisión reportados por Fandiño (2009) (30-100%).

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta fase, se puede observar que el principal contaminante emitido por las fuentes fijas dentro del dominio modelado es el NOx, con una cantidad de 2.497 Ton/año. Tal y como se puede observar en la Figura 15, estas emisiones provienen principalmente de la categoría CG1 que poseen una contribución del 62,47% de las emisiones anuales.

Por su parte, el SO₂ domina en segundo lugar el inventario, las emisiones de dióxido de azufre alcanzaron 2,082 toneladas al año; y son generadas en gran proporción por la categoría CC1 con el 46,68%. Este contaminante también se origina a partir de los hornos ladrilleros (HL), que contribuyen con el 26,80% de las emisiones anuales. Se observa una contribución del 15,86% por parte de las calderas que son alimentadas con combustible Diesel (D).

Las emisiones de material particulado fueron de 1.017 ton/año. La mayor contribución de estas descargas provienen de los hornos ladrilleros (HL) con una participación del 45,81%. Seguida por las categorías CC1 y CG1 con contribuciones del 21,76% y 11,85%, respectivamente.

La Figura 15 muestra que las emisiones de CO se generan principalmente por la quema de gas natural, ya que de las 508 toneladas de CO emitidas en el año 2008, el 53% proviene de la categoría CG1, como también de las categorías HG (16,28%) y CG2 (13,57%).

3.2.2 Distribución espacial y temporal

La distribución temporal de las emisiones generadas por las fuentes fijas se pueden observar en la Tabla 20.

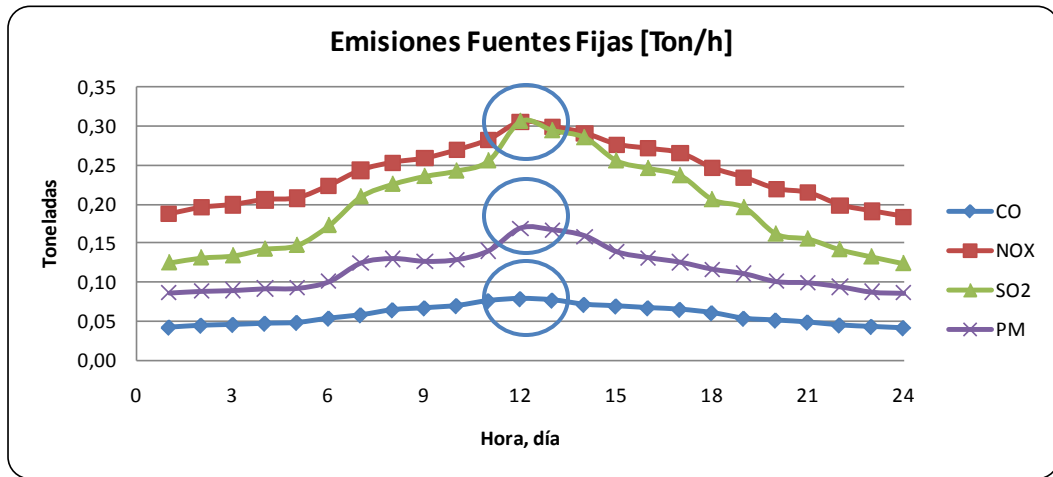
Tabla 20 Distribución temporal de las emisiones provenientes de fuentes fijas, [Ton/año].

| Hora | CO | NO_x | SO₂ | PM |
|-------------|-------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| 1 | 0,04 | 0,19 | 0,13 | 0,09 |
| 2 | 0,04 | 0,20 | 0,13 | 0,09 |
| 3 | 0,05 | 0,20 | 0,13 | 0,09 |
| 4 | 0,05 | 0,21 | 0,14 | 0,09 |
| 5 | 0,05 | 0,21 | 0,15 | 0,09 |
| 6 | 0,05 | 0,22 | 0,17 | 0,10 |
| 7 | 0,06 | 0,24 | 0,21 | 0,12 |
| 8 | 0,06 | 0,25 | 0,23 | 0,13 |
| 9 | 0,07 | 0,26 | 0,24 | 0,13 |
| 10 | 0,07 | 0,27 | 0,24 | 0,13 |
| 11 | 0,08 | 0,28 | 0,26 | 0,14 |
| 12 | 0,08 | 0,31 | 0,31 | 0,17 |
| 13 | 0,08 | 0,30 | 0,29 | 0,17 |
| 14 | 0,07 | 0,29 | 0,29 | 0,16 |
| 15 | 0,07 | 0,28 | 0,26 | 0,14 |
| 16 | 0,07 | 0,27 | 0,25 | 0,13 |
| 17 | 0,07 | 0,27 | 0,24 | 0,13 |
| 18 | 0,06 | 0,25 | 0,21 | 0,12 |
| 19 | 0,05 | 0,23 | 0,20 | 0,11 |
| 20 | 0,05 | 0,22 | 0,16 | 0,10 |
| 21 | 0,05 | 0,21 | 0,16 | 0,10 |
| 22 | 0,05 | 0,20 | 0,14 | 0,09 |
| 23 | 0,04 | 0,19 | 0,13 | 0,09 |
| 24 | 0,04 | 0,18 | 0,12 | 0,09 |

Fuente: el Autor

Los máximos horarios para los 4 contaminantes modelados, se presentan a las 12:00 (Figura 16).

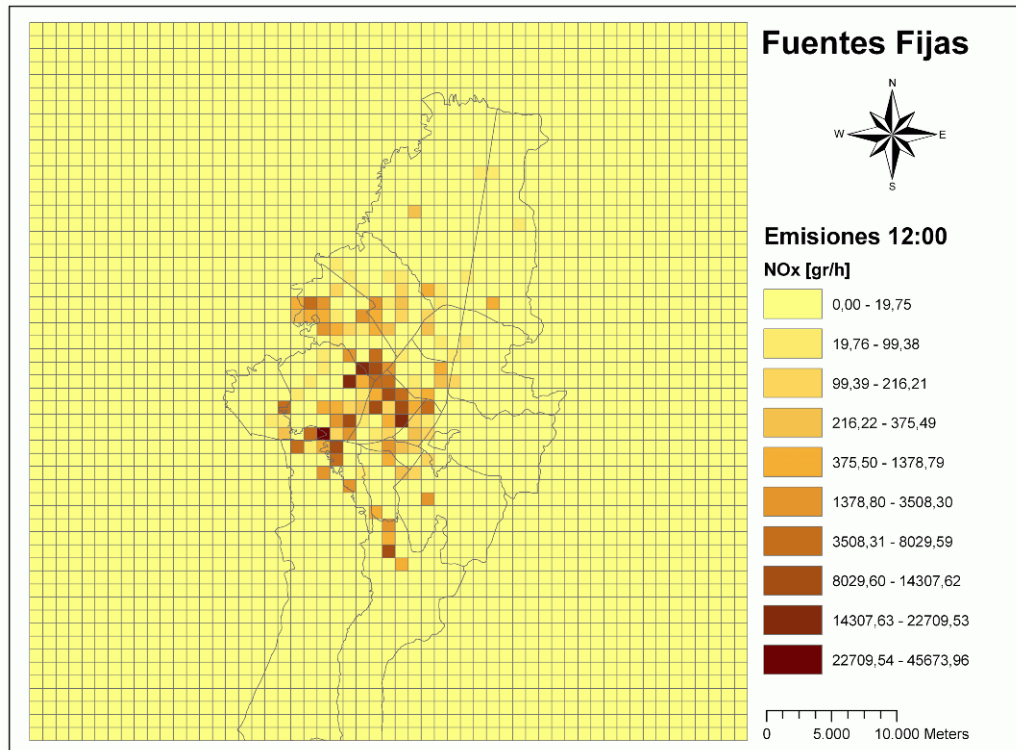
Figura 16 Comportamiento temporal de las emisiones, fuentes fijas



Fuente: el Autor

Se construyeron mapas con la herramienta SIG, para visualizar la distribución en el espacio y en el tiempo de las emisiones estimadas para las fuentes fijas. La Figura 17 muestra el mapa con la distribución espacial de las emisiones de NOx a las 12:00 del día típico. En la región sur occidental de la ciudad se encuentran las mayores emisiones de este contaminante, tal y como lo indican los tonos más oscuros en la figura. Se puede identificar que las localidades de Usme, Puente Aranda, Fontibón y Kennedy, en las cuales se presenta la mayor densidad de fuentes de emisión, son las localidades que aportan las mayores emisiones

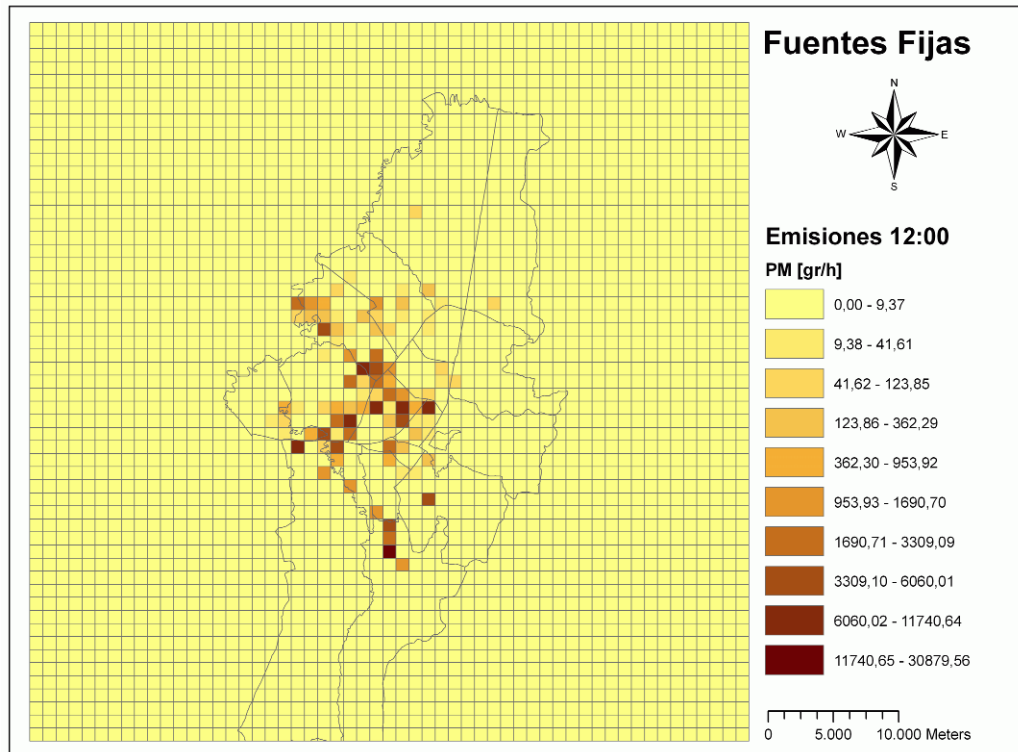
Figura 17 Emisiones de NOx para las 12:00



Fuente: el Autor

La distribución espacial de emisiones de PM es un poco diferente. Las emisiones altas aún se pueden observar en la zona industrial conformada por las localidades de Puente Aranda, Fontibón y Kennedy, pero también se presentan emisiones altas en el sur de la ciudad, principalmente en la localidad de Usme. Esta área presenta una alta densidad de hornos que queman carbón en el proceso de cocción del ladrillo. Las emisiones de PM son particularmente altas para fuentes que emplean carbón como combustible.

Figura 18 Emisiones de PM para las 12:00



Fuente: el Autor

Los mapas para todos los contaminantes, junto con las animaciones creadas, se incluirán en anexo digital, en una subcarpeta denominada “EMISIONES_FIJAS” que se puede encontrar dentro de la carpeta “RESULTADOS FINALES”.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La distribución espacial y temporal de los inventarios de emisiones provenientes de las fuentes móviles y fijas de la ciudad, en un dominio de 55 km x 55 km, con resolución de celdas de 1 km²; empleando un conjunto de herramientas conformado por el programa EMISNES, ArcGIS y Microsoft Visual Basic, tiene una resolución espacial mucho mayor que la conseguida en el inventario utilizado por Zárate (2007). Los resultados obtenidos se podrán emplear como datos de entrada a un modelo de calidad del aire, previa conversión de los archivos que contienen la distribución de contaminantes al lenguaje requerido por el modelo a emplear.

Las fuentes móviles en Bogotá emiten anualmente a la atmosfera más de 700.000 toneladas de CO, 57.658 toneladas de NO_x, 13.009 toneladas de SO₂, 1.594 toneladas de PM y 108.011 toneladas de VOC. Estos resultados son comparables a los resultados obtenidos en inventarios de emisiones realizados en la ciudad en años anteriores, mostrando una aproximación de cálculo confiable. Por su parte, las fuentes fijas que operan dentro del dominio modelado descargan a la atmosfera 607 ton/año de CO, 2.497 ton/año de NO_x, 2.082 ton/año de SO₂ y 1.400 ton/año de material particulado.

El inventario de emisiones es consistente con inventarios realizados previamente, tanto para fuentes móviles como para fuentes fijas. Se aportó la distribución temporal y se adicionaron contaminantes y categorías no utilizados anteriormente. Estos aportes permitirán la utilización de los inventarios como entrada a un modelo de calidad del aire.

Los resultados obtenidos en la distribución espacial de las emisiones generadas por las fuentes estudiadas en el proyecto fueron satisfactorios. Los sectores de la ciudad en donde se generan las mayores emisiones de contaminantes coinciden

con las localidades de la ciudad que conforman la zona industrial del Distrito Capital y las vías con mayor flujo de vehículos de carga pesada.

Los ficheros de entrada requeridos por el programa EMISENS para estimar y distribuir en el espacio y en el tiempo las emisiones en caliente generadas por las fuentes móviles, se construyeron a partir de información secundaria. Por lo anterior, se recomienda encaminar esfuerzos en futuros proyectos para obtener información primaria aplicando metodologías *in situ*, con el fin de afinar los resultados reportados en esta experiencia. De igual forma, el programa EMISENS se encuentra en la capacidad de estimar no solo las emisiones generadas por las fuentes móviles con el motor en operación, sino también sus emisiones en frío y evaporativas. Se recomienda complementar el inventario de las fuentes móviles empleando el programa en mención, lo cual sería un gran aporte para la ciudad debido a que dentro de los antecedentes no se encuentran experiencias en la ciudad que estimen estos tipos de emisiones.

REFERENCIAS

- ACRIS-ST, 2002. Air Quality Modelling –Samma software an several applications. Sophia Antipolis. France.
- Agencia de Noticias UN, (2009). Salud de los Bogotanos, amenazada por contaminación del aire, [en línea], disponible en: <http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/nc/detalle/article/salud-de-los-bogotanos-amenazada-por-contaminacion-del-aire/>, recuperado el: 06 de octubre de 2010.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá & Universidad Pontificia Bolivariana, 2005. Actualización del Inventario de Emisiones Atmosféricas en el Valle de Aburrá con Georreferenciación de éstas (Convenio 323/2005).
- Baldasano, J.M., Güereca, L., López, E., Gassó, S. & Jimenez, P. (2008). Development of a high-resolution (1 km x 1 km, 1h) emission model for Spain: The High Elective Resolution Modelling Emission System (HERMES). *Atmospheric Environment*, 42, 7215-7233. Recuperado el 09 de noviembre de 2010 de la base de datos ScienceDirect.
- Baldasano, J.M. & Toll, M. (2000). Modeling of photochemical air pollution in the Barcelona area with highly disaggregated anthropogenic and biogenic emissions. *Atmospheric Environment*, 34, 3069-3084. Recuperado el 09 de noviembre de 2010 de la base de datos ScienceDirect.
- Behrentz, Belalcazar & Echeverry, 2005. Estimation of pollutant and greenhouse gas emission for mobile sources in Bogotá. Advanced institute on urbanization, emissions and the global carbon cycle. The global change system for analysis, research and training (START).
- Borge, R., Lumbreras, J. & Rodriguez, E. (2008). Development of a high-resolution emission inventory for Spain using the SMOKE modelling system: A case study for the years 2000 and 2010. *Environmental Modelling & Software*, 23, 1026-1044. Recuperado el 09 de noviembre de 2010 de la base de datos ScienceDirect.
- Brunekreef, B & Holgate, S. (2002), Air pollution and health. *The Lancet*, 360, 1233 – 1244. Recuperado el 01 de noviembre de 2008 de la base de datos ScienceDirect.

- Brulfert, G., Chollet, J.P., Jouve, B. & Villard, H. (2005). Atmospheric emission inventory of the Maurienne valley for an atmospheric numerical model. *Science of total Environment*, 349, 232-248. Recuperado el 09 de noviembre de 2010 de la base de datos ScienceDirect.
- Byun, D.W., Ching, J.K.S., 1999. Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) Modeling System. EPA/600/R-99/030, US EPA National Exposure Research Laboratory, ResearchTriangle Park, NC.
- Cámara de Comercio de Bogotá (CCB), (2009). “Perfil económico y empresarial de las localidades: Ciudad Bolívar y Bosa”, [en línea], disponible en: http://camara.ccb.org.co/documentos/4392_Bosa_ciudadb.pdf, recuperado: 06 de octubre de 2010.
- Cancino, J. (2006). “Validación y análisis de la información de la red de calidad del aire de Bogotá”, [en línea], disponible en: http://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis_2007_primer_semestre/00002306.pdf, recuperado el: 07 de octubre de 2010.
- Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2006, 04 de abril), “Resolución 0601 del 04 de abril de 2006, por la cual se establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia”, en Diario Oficial, núm. 46.232, 05 de abril de 2006, Bogotá.
- Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, “Manual de Fundamentos y Planeación de Inventarios de Emisión: Borrador V2”, [en línea], disponible en: http://www.minambiente.gov.co/documentos/3110_1_Planeacion.pdf, recuperado: 27 de octubre de 2009.
- Colombia, Secretaria Distrital de Ambiente. (2008), “Informe anual de calidad del aire de Bogotá, año 2007”, [en línea:], disponible en: <http://www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/pdf/Informe%20Anual%202007%20RM CAB%20FINAL.pdf>, recuperado: 25 de octubre de 2008.
- Cheng, S.; Chen, D.; Li, j.; Wang, H. & Guo, X. (2007). The assessment of emission-source contributions to air quality by using a coupled MM5-ARPS-CMAQ Modeling System: A case Study in the Beijing metropolitan region, China. *Environmental Modelling & Software*, 22, 1601-1616. Recuperado el 09 de noviembre de 2010 de la base de datos ScienceDirect.

- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), (2005). "Estimaciones de proyección 1985-2005, y proyecciones de población 2005-2010 nacional y departamentales, por sexos, según grupos quinquenales de edad y área", [en línea], disponible en: http://www.dane.gov.co/daneweb_V09/index.php?option=com_content&view=article&id=238&Itemid=121, recuperado: 06 de octubre de 2010.
- DEQ-Virginia. (2008). Memorandum - Interim Guidance on Alternative Fuel Permitting in Industrial Boilers. Redmond, USA: Department of Environmental Quality of the Commonwealth of Virginia.
- Fandiño, M & Behrentz, E. (2009). "Actualización del inventario de emisiones de fuentes fijas para la ciudad de Bogotá, a través de mediciones directas", [en línea], disponible en: http://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis_12009_primer_semestre/525.pdf, recuperado el: 07 de octubre de 2010.
- Giraldo, L. (2005). "Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá", [en línea], disponible en: http://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis_2006_primer_semestre/00006639.pdf, recuperado el: 07 de octubre de 2010.
- Ho, Q.B, (2010). "Optima Methodology to Generate Road Traffic Emissions for Air Quality Modeling: Application to Ho Chi Minh City", [en línea], disponible en: http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2010/4793/EPFL_TH4793.pdf, recuperado el: 25 de octubre de 2010.
- Houyoux, M.R. (1998). Technical report: plume rise algorithm summary for the Sparse Matrix Operator Modeling System (SMOKE). Prepared for North Carolina Department of Environment and Natural Resources. ENV-98TR004eTR0v1.0.
- Ingeniería Ambiental de Colombia Ltda. (INAMCO) & Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). (2001). Elaboración del inventario de fuentes fijas de emisión de contaminantes a la atmósfera en la ciudad de Bogotá D.C.
- JICA. (1992). Study on Air Pollution Control Plan in Santafe de Bogota City Are, Final Report. Tokyo, Japan: Japan International Cooperation Agency (JICA).

- Manzi, V. (2003). "Selección y aplicación de una metodología para la estimación de los factores de emisión de las fuentes móviles vehiculares de la ciudad de Bogotá", [en línea], disponible en: http://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis_2003_segundo_semestre/00002172.pdf, recuperado el: 07 de octubre de 2010.
- Monteiro, A., Miranda, A., Borrego, C., Vautard, R., Ferreira, J. & Pérez, A. (2007). Long-term assessment of particulate matter using CHIMERE model. *Atmospheric Environment*, 41, 7726-7738. Recuperado el 09 de noviembre de 2010 de la base de datos ScienceDirect.
- Nicole D, James L, Mauricio O et al., 2005. Transportation research board 81st annual meeting[C]. Washington D.C., Jan, 2005.
- Ntziachristos, L; Samaras, Z; Gkatzoflias, D; Kouridis., 2007. COPERT IV – Computer programme to calculate emissions from road transport, User manual (version 5.0). EEA, 2007.
- Ostro, B. (2004). Outdoor Air Pollution: Assessing the Environmental Burden of Disease at National and Local Levels. Environmental Burden of Disease Series, No. 5; World Health Organization: Geneva, [en línea], disponible en: http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/ebd5.pdf, recuperado el: 08 de noviembre de 2010.
- Páez, Magda. (2009, 12 de julio). Respirar, en Bogotá, puede amenazar la vida. UNperiódico, ISSN 1657-0987, No 124, pp 6. Disponible en: <http://www.unperiodico.unal.edu.co/uploads/media/UnPeriodico124.pdf>, recuperado: 06 de octubre de 2010.
- Rodriguez, P & Behrentz, E. (2009). "Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá, a través de mediciones directas", [en línea], disponible en: http://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis_12009_primer_semestre/524.pdf, recuperado el: 07 de octubre de 2010.
- Secretaría Distrital de Movilidad. (SDM). (2009). "Informe anual Pico y Placa 2008". Bogotá, Colombia.
- Secretaría Distrital de Planeación (SDP). (2010). "Velocidad de recorrido promedio del transporte público colectivo (2001-2009)", [en línea], disponible en: http://portald.dapd.gov.co:7788/ci/ficha.php?id_item=501, recuperado el: 15 de mayo de 2010.

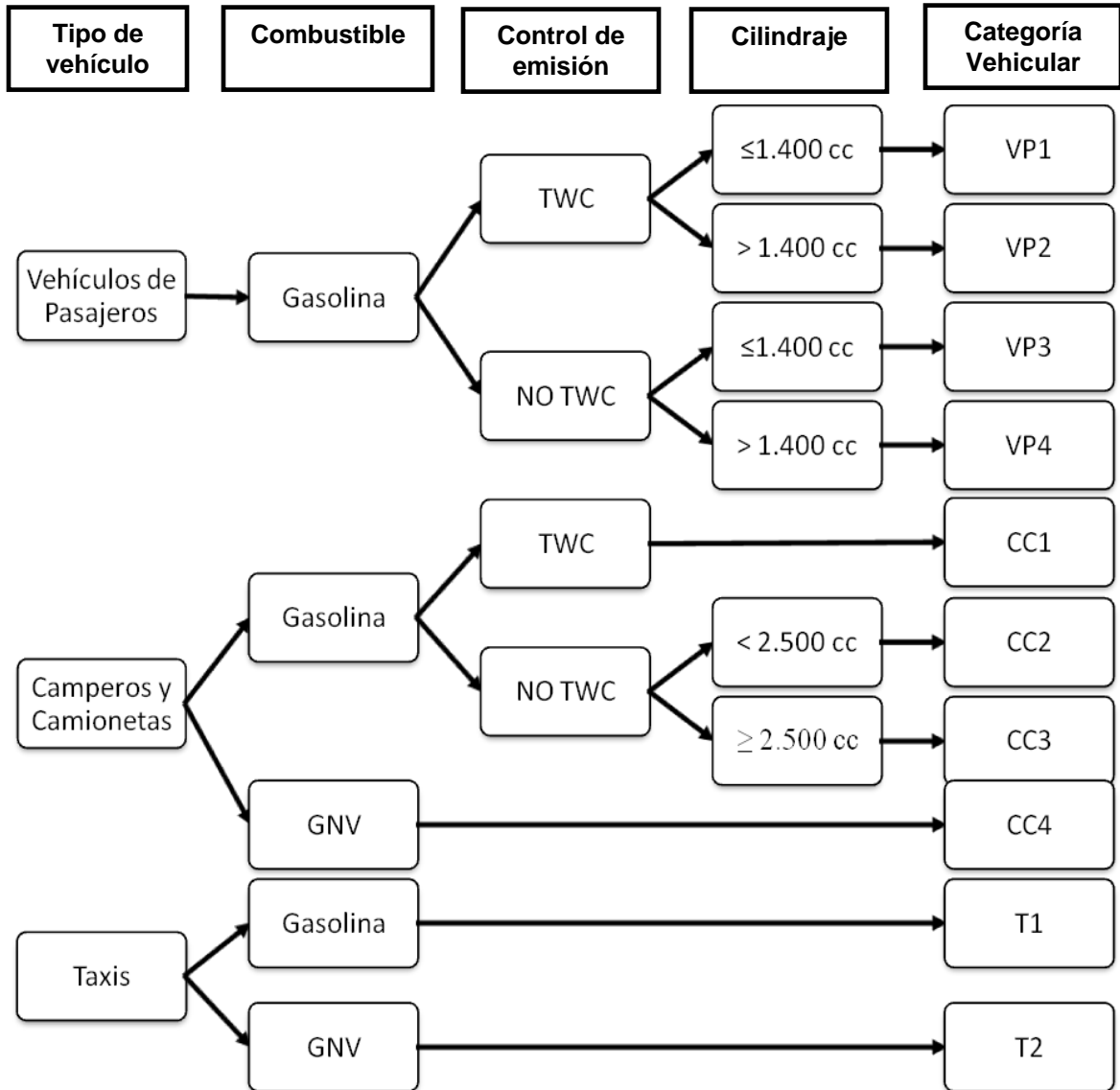
- Sowden, M., Cairncross, E., Wilson, G., Zunckel, M., Kirillova, E., Reddy, V. & Hietkamp, S. (2008). Developing a spatially a temporally resolved emission inventory for photochemical modeling in the City of Cape Town and assessing its uncertainty. *Atmospheric Environment*, 42, 7155-7164. Recuperado el 09 de noviembre de 2010 de la base de datos ScienceDirect.
- Stockwell, W., Kirchner, F., Kuhn, M., (1997). A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling. *Journal of geophysical research*. Vol 102. No D22. Páginas 25,847 a 25,879. Noviembre, 1997.
- Toro, M.V. (2001). Modelo de emisiones atmosféricas para el Valle de Aburrá MODEMED.
- Toro, M.V, Ramírez. J, Quinceno. R & Zuluaga. C. 2006. Cálculo de la emisión vehicular de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Medellín mediante factores de emisión CORINAIR, [en línea], disponible en: <http://www.cepis.org.pe/bvsci/e/fulltext/medellin/vehiculos.pdf>, recuperado el: 06 de noviembre de 2010.
- Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, 2005. Estudio de emisión y dispersión de contaminantes para condiciones de cambio de combustibles, [en línea], disponible en: http://www.metropol.gov.co/aire/compartidos/docs/emisin_y_dispersin_con_cambio_de_combustible.pdf, recuperado el: 06 de noviembre de 2010.
- USEPA, (1999). Handbook of criteria pollutant Inventory Development. A Beginner's Guide for Point and Area Sources, United Sates Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC. EPA-454/R-99-037,
- USEPA, (1995). Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42, Fifth Edtion, Volume I: Stationary Point and Area Sources, United Sates Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC.
- Wang H K, Chen C H, Huang C et al., 2006. Application of the International Vehicle Emission model for estimating of vehicle emissions in Shanghai[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(1): 1–9.
- Wang. X., Mauzerall, D., Hu, Y., Russell, A., Larson, E., Woo, J. Streets, D. & Guenther, A. (2005). A high-resolution emission inventory for eastern China in 2000 and three scenarios for 2020. *Atmospheric Environment*, 39, 5917-5933. Recuperado el 09 de noviembre de 2010 de la base de datos ScienceDirect.

- Wilkinson, J. (2003). Emission Modeling. Chapter 3 of AIR QUALITY MODELING – Theories, Methodologies, Computational Techniques, and Available Databases and Software. Vol. I – Fundamentals (P. Zannetti, Editor). Published by The EnviroComp Institute and the Air & Waste Management Association.
- Zárate, E. (2007), Understanding the origins and fate of air pollution in Bogotá, Colombia [tesis doctoral], Lausanne (Suiza), École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Doctorado en Ciencias.
- Zárate, E., Belalcázar, L. C., Clappier, A., Manzi, V., & Van den Bergh, H. (2007). Air quality modelling over Bogota, Colombia: Combined techniques to estimate and evaluate emission inventories. *Atmospheric Environment* 41, 6302–6318.
- Zhang, Y., Vijayaraghavan, K., Seigneur, C. (2005). Evaluation of three probing techniques in a three-dimensional air quality model. *Journal of Geophysical Research* 110, D02305.

ANEXOS

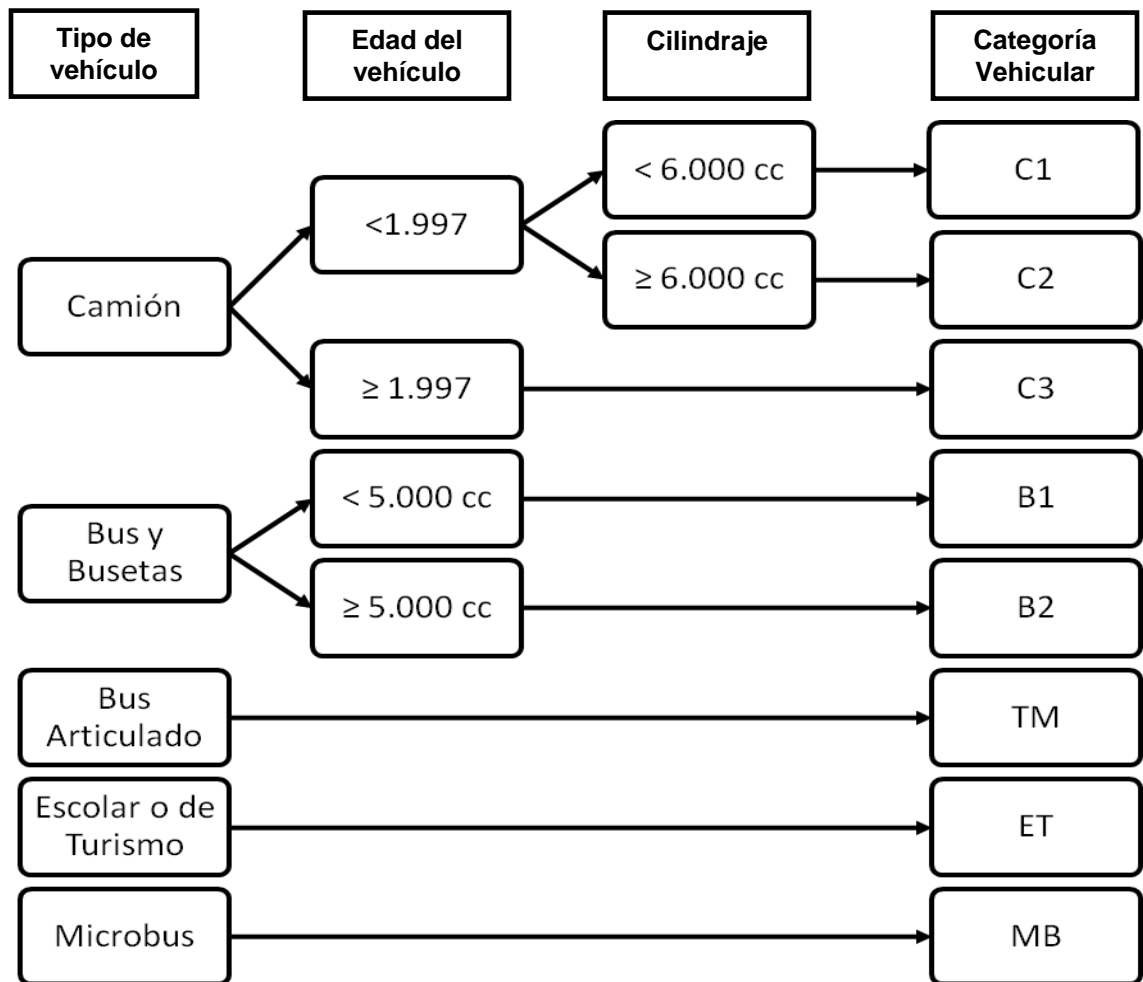
ANEXO 1. Categorías Vehiculares

Vehículos Livianos



Fuente: (Rodríguez, P & Behrentz, E, 2009).

Vehículos pesados



Fuente: (Rodriguez, P & Behrentz, E, 2009).

ANEXO 2. Valores Máximos para cada Categoría en el Aforo Vehicular

| ESTACION | Mixtos | Livianos | Bus | Camión |
|------------------------------|--------|----------|-------|--------|
| KR 10 X CL 19 | 6.876 | 3.906 | 2.117 | 95 |
| AUTOPISTA NORTE X CL 127 | 17.559 | 14.758 | 413 | 747 |
| AV. BOYACÁ X CL 72 | 11.962 | 8.315 | 1.186 | 732 |
| AV. AMÉRICAS X KR 42B - CL19 | 8.620 | 6.481 | 819 | 410 |
| AUTOPISTA SUR X AV 68 | 8.715 | 5.385 | 765 | 617 |
| AUTONORTE X CL 170 | 12.262 | 9.899 | 506 | 783 |
| KR 7 X CL 85 | 5.528 | 4.506 | 400 | 118 |
| AC 6 X KR 24-27 | 8.577 | 6.200 | 714 | 353 |
| AV. BOYACÁ X CAI YOMASA | 2.053 | 1.073 | 446 | 301 |
| AV 1 DE MAYO X TV 42 | 7.340 | 5.238 | 789 | 395 |
| AK 68 X AC 26 | 19.028 | 14.784 | 1.568 | 687 |
| CL 26 X KR 92 | 8.633 | 6.556 | 816 | 602 |
| AV. BOYACÁ X CL 13 | 14.839 | 9.059 | 1.067 | 1.222 |
| AV. BOYACÁ X AV V.CIO | 6.093 | 3.196 | 635 | 662 |
| KR 13 X CL 53 | 3.391 | 2.488 | 510 | 49 |
| KR 91-94 X CL 131 | 2.537 | 1.120 | 892 | 86 |
| KR 7 X CL 127 | 5.589 | 4.629 | 618 | 190 |
| KR 10 X AV 1 DE MAYO | 4.587 | 2.270 | 1.350 | 109 |
| KR 7 X CL 45 | 5.962 | 4.642 | 781 | 74 |
| AV. SUBA X CL 100 | 11.032 | 8.914 | 586 | 291 |
| AV. A MEJÍA X AV 1 DE MAYO | 4.520 | 1.919 | 775 | 398 |
| KR 15 X CL 100 | 6.912 | 5.538 | 768 | 137 |
| AV. V.CIO X AV G. CORTES | 4.330 | 1.983 | 991 | 289 |
| AV. CENTENARIO X AV. CALI | 11.839 | 7.363 | 1.020 | 2.013 |

Fuente: Aforo vehicular proporcionado por la Secretaría Distrital de Movilidad, (SDM, 2008)

ANEXO 3. Resultados del análisis de los datos del aforo vehicular

| ESTACION | Mixtos | Livianos | Bus | Camión |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| KR 10 X CL 19 | MEDIO | BAJO | MUY ALTO | BAJO |
| AUTOPISTA NORTE X CL 127 | MUY ALTO | MUY ALTO | BAJO | ALTO |
| AV. BOYACÁ X CL 72 | ALTO | ALTO | ALTO | ALTO |
| AV. AMÉRICAS X KR 42B - CL19 | ALTO | MEDIO | MEDIO | MEDIO |
| AUTOPISTA SUR X AV 68 | ALTO | MEDIO | MEDIO | ALTO |
| AUTONORTE X CL 170 | MUY ALTO | ALTO | MEDIO | ALTO |
| KR 7 X CL 85 | MEDIO | MEDIO | BAJO | BAJO |
| AC 6 X KR 24-27 | ALTO | MEDIO | MEDIO | BAJO |
| AV. BOYACÁ X CAI YOMASA | BAJO | BAJO | BAJO | BAJO |
| AV 1 DE MAYO X TV 42 | MEDIO | MEDIO | MEDIO | BAJO |
| AK 68 X AC 26 | MUY ALTO | MUY ALTO | MUY ALTO | ALTO |
| CL 26 X KR 92 | ALTO | MEDIO | MEDIO | ALTO |
| AV. BOYACÁ X CL 13 | MUY ALTO | ALTO | ALTO | MUY ALTO |
| AV. BOYACÁ X AV V.CIO | MEDIO | BAJO | MEDIO | ALTO |
| KR 13 X CL 53 | BAJO | BAJO | MEDIO | BAJO |
| KR 91-94 X CL 131 | BAJO | BAJO | MEDIO | BAJO |
| KR 7 X CL 127 | MEDIO | MEDIO | MEDIO | BAJO |
| KR 10 X AV 1 DE MAYO | MEDIO | BAJO | ALTO | BAJO |
| KR 7 X CL 45 | MEDIO | MEDIO | MEDIO | BAJO |
| AV. SUBA X CL 100 | ALTO | ALTO | MEDIO | BAJO |
| AV. A MEJÍA X AV 1 DE MAYO | MEDIO | BAJO | MEDIO | BAJO |
| KR 15 X CL 100 | MEDIO | MEDIO | MEDIO | BAJO |
| AV. V.CIO X AV G. CORTES | MEDIO | BAJO | MEDIO | BAJO |
| AV. CENTENARIO X AV. CALI | ALTO | MEDIO | ALTO | MUY ALTO |

Fuente: Aforo vehicular proporcionado por la Secretaría Distrital de Movilidad, (SDM, 2008)

ANEXO 4. Factores de Emisión para cada Categoría Vehicular, en cada Categoría vial

| CO | PRINC_B | PRINC_M | PRINC_A | PRINC_MA | SEC_B | SEC_M | SEC_A | RUR | TM_TRONC | TM ALIM |
|---------|---------|---------|---------|----------|-------|-------|-------|-------|----------|---------|
| VP_CC | 40,60 | 40,60 | 40,60 | 40,60 | 50,13 | 50,13 | 50,13 | 33,38 | 0,00 | 0,00 |
| T | 11,14 | 11,14 | 11,14 | 11,14 | 19,18 | 19,18 | 19,18 | 6,57 | 0,00 | 0,00 |
| B_MB | 13,45 | 13,45 | 13,45 | 13,45 | 11,60 | 11,60 | 11,60 | 8,50 | 0,00 | 0,00 |
| C | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 5,09 | 3,99 | 3,99 | 3,99 | 2,63 | 0,00 | 0,00 |
| ET | 11,00 | 11,00 | 11,00 | 11,00 | 11,50 | 11,50 | 11,50 | 6,90 | 0,00 | 0,00 |
| TM-Art | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 4,35 | 0,00 |
| TM-Alim | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,40 |
| M | 16,42 | 16,42 | 16,42 | 16,42 | 22,49 | 22,49 | 22,49 | 13,68 | 0,00 | 0,00 |

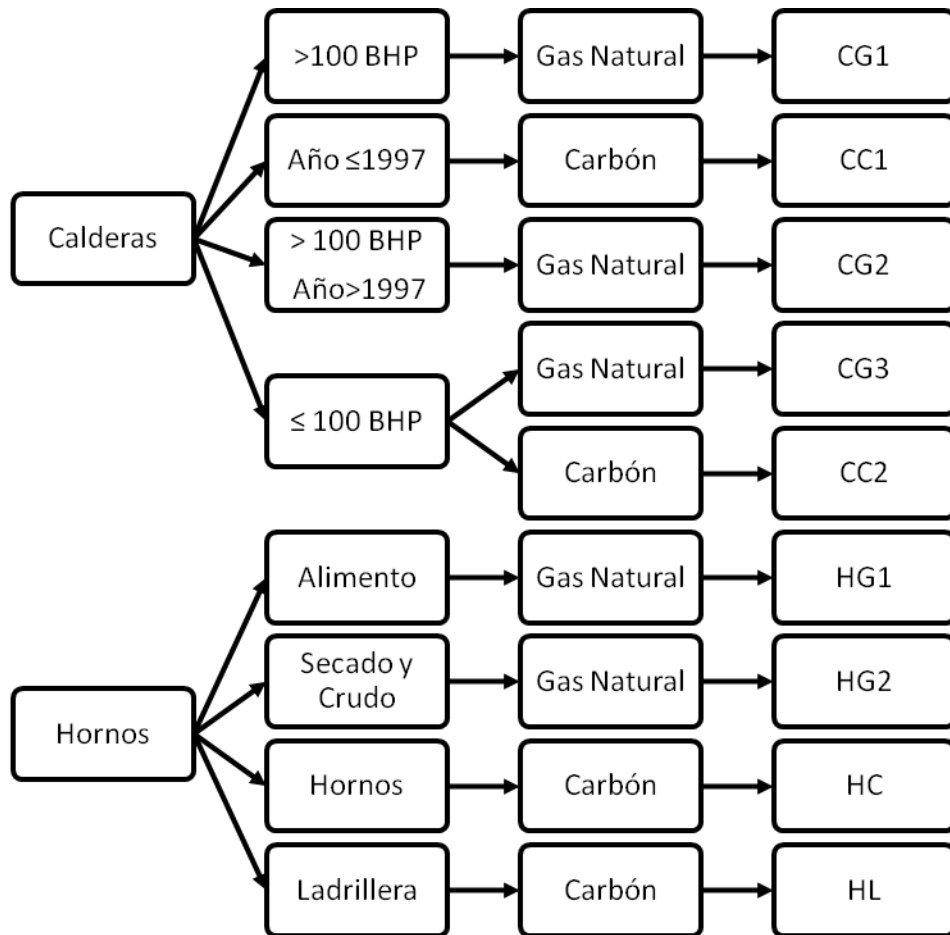
| NOx | PRINC_B | PRINC_M | PRINC_A | PRINC_MA | SEC_B | SEC_M | SEC_A | RUR | TM_TRONC | TM ALIM |
|---------|---------|---------|---------|----------|-------|-------|-------|-------|----------|---------|
| VP_CC | 1,68 | 1,68 | 1,68 | 1,68 | 1,48 | 1,48 | 1,48 | 2,00 | 0,00 | 0,00 |
| T | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 3,22 | 3,22 | 3,22 | 3,55 | 0,00 | 0,00 |
| B_MB | 8,80 | 8,80 | 8,80 | 8,80 | 8,76 | 8,76 | 8,76 | 8,83 | 0,00 | 0,00 |
| C | 10,55 | 10,55 | 10,55 | 10,55 | 10,55 | 10,55 | 10,55 | 10,65 | 0,00 | 0,00 |
| ET | 7,85 | 7,85 | 7,85 | 7,85 | 7,90 | 7,90 | 7,90 | 8,10 | 0,00 | 0,00 |
| TM-Art | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 14,70 | 0,00 |
| TM-Alim | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,50 |
| M | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,30 | 0,00 | 0,00 |

| PM | PRINC_B | PRINC_M | PRINC_A | PRINC_MA | SEC_B | SEC_M | SEC_A | RUR | TM_TRONC | TM ALIM |
|---------|---------|---------|---------|----------|-------|-------|-------|------|----------|---------|
| VP_CC | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |
| T | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| B_MB | 0,54 | 0,54 | 0,54 | 0,54 | 0,49 | 0,49 | 0,49 | 0,44 | 0,00 | 0,00 |
| C | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,50 | 0,00 | 0,00 |
| ET | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,38 | 0,00 | 0,00 |
| TM-Art | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,32 | 0,00 |
| TM-Alim | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,26 |
| M | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,00 | 0,00 |

| SO2 | PRINC_B | PRINC_M | PRINC_A | PRINC_MA | SEC_B | SEC_M | SEC_A | RUR | TM_TRONC | TM ALIM |
|---------|---------|---------|---------|----------|-------|-------|-------|------|----------|---------|
| VP_CC | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,00 | 0,00 |
| T | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,00 | 0,00 |
| B_MB | 0,62 | 0,62 | 0,62 | 0,62 | 0,62 | 0,62 | 0,62 | 0,62 | 0,00 | 0,00 |
| C | 0,66 | 0,66 | 0,66 | 0,66 | 0,66 | 0,66 | 0,66 | 0,66 | 0,00 | 0,00 |
| ET | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,00 | 0,00 |
| TM-Art | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,23 | 0,00 |
| TM-Alim | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,96 |
| M | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,00 | 0,00 |

| VOC | PRINC_B | PRINC_M | PRINC_A | PRINC_MA | SEC_B | SEC_M | SEC_A | RUR | TM_TRONC | TM ALIM |
|---------|---------|---------|---------|----------|-------|-------|-------|------|----------|---------|
| VP_CC | 5,07 | 5,07 | 5,07 | 5,07 | 6,76 | 6,76 | 6,76 | 4,07 | 0,00 | 0,00 |
| T | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 2,73 | 3,72 | 3,72 | 3,72 | 2,03 | 0,00 | 0,00 |
| B_MB | 2,75 | 2,75 | 2,75 | 2,75 | 2,01 | 2,01 | 2,01 | 1,37 | 0,00 | 0,00 |
| C | 3,65 | 3,65 | 3,65 | 3,65 | 2,98 | 2,98 | 2,98 | 2,10 | 0,00 | 0,00 |
| ET | 2,52 | 2,52 | 2,52 | 2,52 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 1,55 | 0,00 | 0,00 |
| TM-Art | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,70 | 0,00 |
| TM-Alim | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,14 |
| M | 4,94 | 4,94 | 4,94 | 4,94 | 4,41 | 4,41 | 4,41 | 5,22 | 0,00 | 0,00 |

ANEXO 5. Categorías Industriales



Fuente: (Fandiño, M & Behrentz, E, 2009).

ANEXO 6. Especiación horaria de COVs

| | HORA 1 | HORA 2 | HORA 3 | HORA 4 | HORA 5 | HORA 6 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ETH | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,10 |
| HC3 | 0,34 | 0,23 | 0,19 | 0,19 | 0,30 | 1,11 |
| HC5 | 0,25 | 0,17 | 0,14 | 0,14 | 0,22 | 0,82 |
| HC8 | 0,18 | 0,12 | 0,10 | 0,10 | 0,16 | 0,58 |
| ETE | 0,23 | 0,16 | 0,13 | 0,13 | 0,21 | 0,77 |
| OLT | 0,25 | 0,17 | 0,14 | 0,14 | 0,22 | 0,82 |
| OLI | 0,12 | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,10 | 0,38 |
| TOL | 0,48 | 0,33 | 0,27 | 0,28 | 0,43 | 1,58 |
| XYL | 0,48 | 0,33 | 0,27 | 0,28 | 0,43 | 1,58 |
| HCHO | 0,05 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,16 |
| ALD | 0,18 | 0,13 | 0,10 | 0,10 | 0,16 | 0,60 |
| KET | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

| | HORA 7 | HORA 8 | HORA 9 | HORA 10 | HORA 11 | HORA 12 |
|------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| ETH | 0,17 | 0,22 | 0,19 | 0,19 | 0,18 | 0,18 |
| HC3 | 2,00 | 2,49 | 2,19 | 2,16 | 2,14 | 2,14 |
| HC5 | 1,48 | 1,84 | 1,62 | 1,60 | 1,58 | 1,58 |
| HC8 | 1,04 | 1,30 | 1,14 | 1,13 | 1,12 | 1,12 |
| ETE | 1,38 | 1,72 | 1,51 | 1,49 | 1,48 | 1,48 |
| OLT | 1,47 | 1,83 | 1,61 | 1,59 | 1,57 | 1,57 |
| OLI | 0,69 | 0,86 | 0,75 | 0,75 | 0,74 | 0,74 |
| TOL | 2,84 | 3,53 | 3,11 | 3,07 | 3,04 | 3,04 |
| XYL | 2,85 | 3,54 | 3,11 | 3,08 | 3,04 | 3,05 |
| HCHO | 0,28 | 0,35 | 0,31 | 0,31 | 0,30 | 0,30 |
| ALD | 1,08 | 1,35 | 1,18 | 1,17 | 1,16 | 1,16 |
| KET | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

| | HORA 13 | HORA 14 | HORA 15 | HORA 16 | HORA 17 | HORA 18 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ETH | 0,19 | 0,19 | 0,20 | 0,20 | 0,19 | 0,21 |
| HC3 | 2,15 | 2,17 | 2,35 | 2,29 | 2,23 | 2,41 |
| HC5 | 1,59 | 1,60 | 1,73 | 1,69 | 1,65 | 1,78 |
| HC8 | 1,12 | 1,13 | 1,22 | 1,19 | 1,16 | 1,26 |
| ETE | 1,48 | 1,50 | 1,62 | 1,58 | 1,54 | 1,66 |
| OLT | 1,58 | 1,59 | 1,72 | 1,68 | 1,64 | 1,77 |
| OLI | 0,74 | 0,75 | 0,81 | 0,79 | 0,77 | 0,83 |
| TOL | 3,05 | 3,08 | 3,33 | 3,25 | 3,17 | 3,42 |
| XYL | 3,06 | 3,09 | 3,34 | 3,26 | 3,17 | 3,43 |
| HCHO | 0,30 | 0,31 | 0,33 | 0,32 | 0,32 | 0,34 |
| ALD | 1,16 | 1,17 | 1,27 | 1,24 | 1,21 | 1,31 |
| KET | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

| | HORA 19 | HORA 20 | HORA 21 | HORA 22 | HORA 23 | HORA 24 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ETH | 0,20 | 0,19 | 0,16 | 0,13 | 0,09 | 0,06 |
| HC3 | 2,30 | 2,20 | 1,82 | 1,52 | 1,09 | 0,66 |
| HC5 | 1,70 | 1,63 | 1,35 | 1,12 | 0,80 | 0,49 |
| HC8 | 1,20 | 1,15 | 0,95 | 0,79 | 0,57 | 0,35 |
| ETE | 1,59 | 1,52 | 1,26 | 1,05 | 0,75 | 0,46 |
| OLT | 1,69 | 1,62 | 1,34 | 1,12 | 0,80 | 0,49 |
| OLI | 0,79 | 0,76 | 0,63 | 0,53 | 0,38 | 0,23 |
| TOL | 3,27 | 3,12 | 2,59 | 2,16 | 1,55 | 0,94 |
| XYL | 3,28 | 3,13 | 2,59 | 2,17 | 1,55 | 0,94 |
| HCHO | 0,33 | 0,31 | 0,26 | 0,22 | 0,15 | 0,09 |
| ALD | 1,25 | 1,19 | 0,99 | 0,82 | 0,59 | 0,36 |
| KET | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |

Fuente: el Autor