



Modelo para la estimación de emisiones vehiculares como herramienta para la gestión ambiental institucional*

Daniela Valencia-Arroyave**, Michelle Andrea Muñoz-Duque**, Alejandra Ramírez Muñoz**, Luis Alejandro Builes Jaramillo***, Carlos Arturo Hoyos-Restrepo****

A commuting emissions estimation model as a tool for the institutional environmental management

Modelo para a estimativa de emissões veiculares como ferramenta para a administração ambiental institucional

RESUMEN

Introducción. En este artículo presentamos un modelo para la estimación de las emisiones vehiculares, producidas por los viajes con motivos de trabajo y/o estudio a escala institucional, junto con un caso de aplicación en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. **Objetivo.** Desarrollar un modelo para la estimación de emisiones producto de la actividad vehicular semanal de una institución universitaria. **Materiales y Métodos.** La metodología está basada en el modelo simplificado para la estimación de emisiones (SEEM), que usa los factores de emisión desarrollados para la ciudad de Bogotá, disponibles en la base de datos del modelo internacional de estimación de emisiones (IVE). La información primaria se recolectó mediante

* Resultado del proyecto de investigación: "Estimación de las emisiones vehiculares de CO₂ equivalente producidas por los viajes desde y hacia la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia", financiado por convocatoria interna y ejecutado entre desde enero de 2013 hasta mayo de 2014. **Estudiante del programa de Ingeniería Ambiental de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. *** Ingeniero Civil, Magíster en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Docente Facultad de Arquitectura e Ingeniería, Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad. Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. **** Ingeniero Sanitario, Especialista en Sistemas de Información Geográfica. Docente Facultad de Arquitectura e Ingeniería, Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad. Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia.

encuestas diligenciadas por la comunidad institucional; en ellas se indagó por características de los vehículos empleados por estudiantes, docentes y administrativos en sus desplazamientos a la Institución. **Resultados.** Los resultados obtenidos a partir de la implementación de la metodología desarrollada permiten concluir que la Institución no aporta más del 0,025 % a las emisiones totales del Valle de Aburrá. Se proponen diferentes escenarios para el control de los contaminantes atmosféricos producidos por los viajes a la Institución, mediante la racionalización del uso del vehículo particular y se obtienen reducciones de hasta el 29 % de los contaminantes criterio: MP, CO, VOC, SO₂ y NO_x. **Conclusiones.** La metodología es de fácil aplicación y transferencia a otras instituciones o empresas con diferentes tamaños poblacionales y flujos vehiculares.

Palabras clave: contaminación del aire, modelo de estimación de emisión, IVE, control de calidad del aire, factores de emisión.

ABSTRACT

Introduction. This article introduces a model to estimate emissions produced by work and study commuting at an institutional level, along with an application case at Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. **Objective.** Develop a methodology based on the simplified emissions estimation model (SEEM), which uses the emission factors developed in Bogotá and that are available on the international model of the International Vehicle Emissions (IVE) database. The primary information was collected by the use of surveys developed by the institutional community. Those surveys included questions about the characteristics of the vehicles used by students, professors and administration staff for their commuting from and to the institution. **Results.** With the results obtained thanks to the implementation of the methodology developed, it was concluded that the institution contributes with less than 0,025 % of the total emissions in the Aburrá Valley. Several scenarios are proposed to control the atmosphere pollution produced by commuting from and to the institution, by means of rationalizing the use of private cars, thus obtaining up to 29 % in reductions of the criteria pollutants: MP, CO, VOC, SO₂ and NO_x. **Conclusions.** The methodology is easy to apply and it is also easy to transfer it to other institutions or companies with different sizes and traffic flows.

Key words: air pollution, emission estimation model, IVE, monitoring air quality, emission factors.

RESUMO

Introdução. Neste artigo apresentamos um modelo para a estimativa das emissões veiculares, produzidas pelas viagens de trabalho e/ou estudo a nível institucional, junto com um caso de aplicação na Instituição Universitária Colegio Mayor de Antioquia. **Objetivo.** Desenvolver um modelo para a estimativa de emissões produto da atividade veicular semanal de uma instituição universitária. **Materiais e Métodos.** A metodologia está baseada no modelo simplificado para a estimativa de emissões (SEEM), a qual usa os fatores de emissão desenvolvidos para a cidade de Bogotá, disponíveis na base de dados do modelo internacional de estimativa de emissões (IVE). A informação primária coletou-se mediante enquetes diligenciadas pela comunidade institucional; nelas indagou-se pelas características dos veículos empregados pelos estudantes, professores e gerentes nos seus deslocamentos à Instituição. **Resultados.** Os resultados obtidos a partir da implementação da metodologia desenvolvida permitem concluir que a Instituição não aporta mais do 0,025 % às emissões totais do Valle de Aburrá. Propõem-se diferentes cenários para o controle dos poluentes atmosféricos produzidos pelas viagens à Instituição, mediante a racionalização do uso do veículo particular e obtém-se reduções de até 29 % dos poluentes critério: MP, CO, VOC, SO₂ e NO_x. **Conclusões.** A metodologia é de fácil aplicação e transferência para outras instituições ou empresas com diferentes tamanhos populacionais e fluxos veiculares.

Palavras chave: poluição do ar, modelo de estimativa de emissão, IVE, controle de qualidade do ar, fatores de emissão.

INTRODUCCIÓN

Se define emisión vehicular como las sustancias lanzadas a la atmósfera por las fuentes de emisión (móviles en ruta o móviles fuera de ruta), que genera posteriormente una inmisión o concentración aérea de contaminantes (Gantuz y Puliafito, 2004, 1761). Existen metodologías empleadas para la estimación de emisiones vehiculares como los factores de emisión y los modelos de inventario de emisiones. Los factores de emisión brindan datos de emisión unitaria para varias combinaciones de tipos de vehículos (tecnologías) y modos de uso; son una relación entre una cantidad emitida de determinado contaminante por longitud de tramo recorrido, usualmente expresada en gramos por kilómetro –g/km– (Universidad Pontificia Bolivariana, 2010a, 42). Los modelos de inventario de emisiones vinculan la actividad urbana con los tipos de vehículos y modos de uso, a fin de calcular las emisiones totales de los vehículos y se utilizan, por ejemplo, en el análisis de la conformidad de las normas (Gantuz y Puliafito, 2004, 1763).

En el contexto internacional varios países han creado modelos para la estimación de emisiones vehiculares; algunos ejemplos son el *Mobile Source Emission Factor Model (MOBILE6)* (United States Environmental Protection Agency, 2003, 2012, 2) y el *Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES)* desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency, 2003, 2012, 1); el modelo *Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport (COPERT III)* creado por la Agencia Ambiental Europea (Kouridis, Ntziachristos, y Samaras, 2000, 5); el *International Vehicle Emissions Model (IVE)* desarrollado por el *International Sustainable Systems Research Center (ISSRC)* y la Universidad de California (Davis, Lents, Osses, Nikkila, & Barth, 2005, 5) y el modelo *Simplified Emission Estimation Model (SEEM)*, desarrollado en la ciudad de Concepción-Chile (Tuia et al. 2007, 3660).

Para el contexto local, en el año 2001, el Grupo de Investigaciones Ambientales de la Universidad Pontificia Bolivariana, desarrolló el modelo Emisión de Tráfico Rodado para Medellín y municipios aledaños (ETROME), denominado de esta manera, porque la base del inventario de fuentes móviles comprendía principalmente la ciudad de Medellín (Universidad Pontificia Bolivariana, 2010b, 124); en el año 2010 se hace una revisión de dicho modelo con información actualizada sobre factores de emisión y en el año 2011, Londoño y otros hacen una estimación mediante SEEM de las emisiones de contaminación debidas a las fuentes móviles en el municipio de Envigado (Londoño, Correa, y Palacio, 2011, 154).

Las metodologías mencionadas están orientadas a la estimación de emisiones para escalas de región o ciudad; requieren de un gran nivel de detalle y desagregación de la información primaria; es esencial la construcción de una base de datos de la flota vehicular con base en la información de entidades reguladoras del transporte, y se necesita una caracterización de los patrones de movilidad de la zona de estudio, tomada de estudios de movilidad como las encuestas origen destino.

En el ámbito de instituciones universitarias, particularmente en Colombia no se conocen metodologías para la estimación de emisiones de contaminantes debidas a los viajes por motivos de estudio y trabajo hacia estos lugares, por lo que el desarrollo de este tipo de estimaciones se considera como algo novedoso y que aporta a la gestión de la responsabilidad institucional en el tema de la contaminación atmosférica local.

Con base en la revisión de metodologías para la estimación de emisiones vehiculares en los niveles internacional y local, se desarrolló un método particular para la estimación de las emisiones vehiculares semanales (que pueden ser agregadas a otras escalas temporales) que se generan por los viajes diarios de la flota utilizada por la población académica de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. La metodología propuesta es novedosa por su aplicación a escala institucional; además, puede ser empleada en otro tipo de instituciones y tiene como finalidad apoyar procesos de gestión ambiental dentro de la Institución.

La estructura del artículo es la siguiente: en la sección de materiales y métodos se describe la herramienta desarrollada para la estimación de emisiones vehiculares a escala institucional. En la sección

de resultados se presentan los principales hallazgos para el caso de estudio propuesto, según la desagregación espacial y por tipo de vehículo, definidos en la metodología, así como las propuestas de reducción de las emisiones que se desprenden del análisis particular para la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. En la última sección se elabora la discusión de los resultados y las principales conclusiones que pueden extraerse de esta investigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el nivel de una Institución Universitaria es necesario plantear una metodología ajustada que permita la estimación confiable de las emisiones debidas particularmente a su actividad. Se debe tener en cuenta que la actividad de la flota vehicular de una institución universitaria tiene influencia a escalas geográficas más limitadas, al ser comparada con una ciudad o región y genera patrones de movilidad definidos principalmente por los motivos de viaje de trabajo y estudio. Los modelos de estimación de emisiones como el IVE son empleados en grandes regiones y requieren de gran cantidad de información para la estimación de las emisiones vehiculares. Para escalas más reducidas se desarrolló una metodología del tipo *bottom up*, que construye el inventario de emisiones a partir de información particular de la flota vehicular en estudio. El modelo se desarrolló a partir de la ecuación 1 propuesta por el Modelo Simplificado de Estimación de Emisiones desarrollado por Tuia y otros (2007), basada en una aproximación simple, que no requiere mayores demandas de información primaria, calculada para tramos viales, y agregada para toda la zona de estudio.

$$E_c = \sum_j N_j \times M_j \times FE_{jc} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde:

- E_c : emisión del contaminante criterio c en gramos durante la unidad de tiempo elegida (g/tiempo),
- N_j : cantidad de vehículos del tipo j (Número de vehículos),
- M_j : kilómetros recorridos por todos los vehículos del tipo j por unidad de tiempo (km/tiempo),
- FE_{jc} : factor de emisión asociado al vehículo del tipo j para el contaminante c (g/km).

A continuación se presentan los métodos de recolección de información, el modelo desarrollado para la estimación de emisiones, la definición de contaminantes y factores de emisión empleados.

Recolección de información

La información primaria se recolectó mediante encuestas diligenciadas por la comunidad académica de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia; estas fueron aplicadas con el fin de indagar sobre las características de los vehículos usados por estudiantes, docentes y administrativos, el número de viajes que se hacen hacia y desde la Institución en la semana y los orígenes de dichos viajes.

La encuesta se desarrolló en la plataforma de documentos digitales (Google Drive) y está diseñada para recolectar información relacionada con el tipo de vehículo empleado por las personas para llevar a cabo sus viajes hacia la Institución, los cuales fueron clasificados en a) Vehículos particulares, b) Motocicletas, c) Transporte público colectivo y d) Bicicleta o a pie. Para las dos primeras categorías la encuesta incluye parámetros como cilindraje del motor, modelo del vehículo, conocimiento del kilometraje actual recorrido por el vehículo y el tipo de combustible que utiliza. En el Anexo A se detalla el instrumento de recolección de información.

A partir de un piloto desarrollado con 60 personas se verificó la coherencia en las respuestas de la comunidad institucional, y se calculó el número de encuestas necesarias para el desarrollo de un muestreo estratificado (Martínez Bencardino, 2012, 874). En la tabla 1 se presenta el número necesario de encuestas por estratos. Para definir los estratos de muestreo empleados en la recolección final de información, se tuvo en cuenta la distancia de las zonas geográficas en las que se localiza la comunidad institucional, y se partió de la suposición de que la distancia de inicio de los viajes es un factor fundamental para los patrones de uso de vehículos, número de viajes, y emisiones. Finalmente, con los resultados de la encuesta definitiva que representa una muestra estadísticamente significativa por estrato, se hace una expansión de los resultados de emisión para cada uno de los contaminantes evaluados.

Tabla 1. Tamaño de muestra por estrato de muestreo

Estrato de Muestreo	Tamaño de muestra (encuestas)
E1	49
E2	43
E3	58
E4	13

Modelo de estimación de emisiones para una escala institucional

Se hizo una modificación al modelo simplificado presentado en la ecuación 1, la cual se presenta en la ecuación 2 y fue desarrollada con el fin aplicar la metodología en la Institución. La modificación permite manejar la desagregación de la información primaria recolectada a través de la encuesta.

$$E_c = \sum_{i=1}^N V_i \times D_i \times FE_{ic} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Dónde:

- i : número de encuesta.
- N : número total de encuestas.
- E_c : emisión del contaminante c en gramos durante una semana de actividad académica (g/semana).
- V_i : número de viajes realizados por el vehículo de la encuesta i en una semana (viajes/semana).
- D_i : distancia recorrida en kilómetros por el vehículo de la encuesta i en cada viaje (km/viaje).
- FE_{ic} : factor de emisión IVE asociado al vehículo de la encuesta i para el contaminante c (g/km).

La información primaria se procesa obteniendo un resultado por encuesta para cada una de las variables necesarias en la evaluación de las emisiones totales (E_c). El número de viajes por vehículo (V_i) se estima a partir de la pregunta sobre el número de viajes que se hacen en la semana hacia la Institución. Los kilómetros recorridos por cada tipo de vehículo (D_i) se estiman mediante un sistema de información geográfica de acceso libre (Google Earth, 2014), haciendo una consulta de distancias entre el punto de partida de los viajes y la Institución. Los factores de emisión por contaminante para los tipos de vehículo particular y motocicletas (FE_{ic}) se toman de la base de datos del *International Vehicle Emission Model* (L.A. Giraldo, 2005, 2; Herrera, 2007, 25; IVE, 2008, 40). Para clasificar las tecnologías del vehículo particular y las motocicletas se realizan preguntas que indagan sobre el cilindraje, el modelo, el kilometraje actual recorrido, el tipo de combustible y el sistema de paso de combustible de cada uno de los vehículos por encuesta.

Para las encuestas de la categoría de servicio de transporte público colectivo, en las cuales la persona que la diligencia no conoce la tecnología particular del vehículo, y teniendo en cuenta que puede variar en cada uno de los viajes de forma aleatoria, se emplean simulaciones del tipo Monte Carlo (Anderson, 1986, 96; Kroese, Taimre, & Botev, 2011, 96), para la asignación aleatoria del factor de emisión (FE_{ic}), con base en la información de factores de emisión típicos para este tipo de vehículos en el Valle de San Nicolás (Universidad Pontificia Bolivariana, 2010a, 42).

Factores de emisión

Los factores de emisión empleados en este estudio se tomaron para vehículos particulares y motocicletas de la base de datos del *International Vehicle Emission Model* (IVE), desarrollados especialmente para la ciudad de Bogotá (L. A. Giraldo, 2005 2; Herrera, 2007, 25); para vehículos de transporte público (buses) se tomaron los factores definidos en el estudio de estimación de emisiones para el Valle de San Nicolás (Universidad Pontificia Bolivariana, 2010a, 42). Se seleccionaron cinco contaminantes criterio: monóxido de carbono (CO), material particulado (MP), dióxido de azufre (SO₂), compuestos orgánicos volátiles (VOC) y óxido de nitrógeno (NO_x); estos fueron seleccionados entre todos los reportados por el IVE, por ser los principales contaminantes atmosféricos emitidos por las fuentes móviles y porque han sido caso de estudio en diferentes investigaciones en el nivel local y en investigaciones relacionadas con la evaluación del impacto de la contaminación asociado a daños a la salud y al ambiente. En el Anexo B, se presentan los factores de emisión empleados para vehículos particulares, motos y buses, respectivamente.

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de la aplicación de la metodología propuesta a la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia para el segundo semestre del año 2013, con una población de 3086 personas aproximadamente entre estudiantes, docentes y administrativos. Se definen los estratos para el muestreo, la caracterización de las dinámicas de movilidad según la muestra, las emisiones para la muestra particular, y las emisiones totales para la población institucional luego de la expansión. También se presenta una comparación con estimaciones de las emisiones vehiculares en el nivel regional y se finaliza la sección con una propuesta de alternativas de reducción de emisiones evaluadas para el caso particular de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia.

Definición de estratos de muestreo

La Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia se encuentra ubicada en el municipio de Medellín dentro de la zona geográfica del Valle de Aburrá en el departamento de Antioquia. Más del 90 % de la comunidad institucional reside en los 10 municipios del Valle de Aburrá, según datos suministrados por las dependencias de admisiones y planeación institucional. Los estratos de muestreo se definen dependiendo de la distancia desde las principales zonas geográficas de la región (comunas, corregimientos y municipios) a la Institución.

Se calculó la distancia desde los centroides de las zonas geográficas de la región hasta la Institución, y con base en estas distancias se definieron cuatro estratos de muestreo; *E1*, donde se incluyen zonas a menos de 3 km; *E2*, zonas que están dentro del intervalo de 5 km a 3 km; *E3*, para zonas entre 5 km y 10 km, y finalmente, *E4*, para zonas que se encuentran a más de 10 km de distancia de la Institución. En la figura 1 se presenta la distribución espacial de dichos estratos. Es importante resaltar que los

estratos de muestreo no tienen relación con los estratos de clasificación socioeconómica definidos para las ciudades colombianas (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2014).

De la información suministrada por la dependencia de Admisiones en la Institución se conoce el porcentaje de miembros de la comunidad que pertenecen a cada estrato de muestreo. Se hizo un piloto de 15 encuestas para cada uno de los cuatro estratos definidos (60 encuestas), para las cuales se desarrolló el cálculo de emisiones. A partir de la definición de muestreo estratificado, con la emisión final (E_c de la ecuación 2) como variable de respuesta, se evaluó el tamaño de muestra necesaria para cada estrato con el fin de obtener resultados estadísticamente significativos. El tamaño de muestra óptimo se presenta en la figura 1.

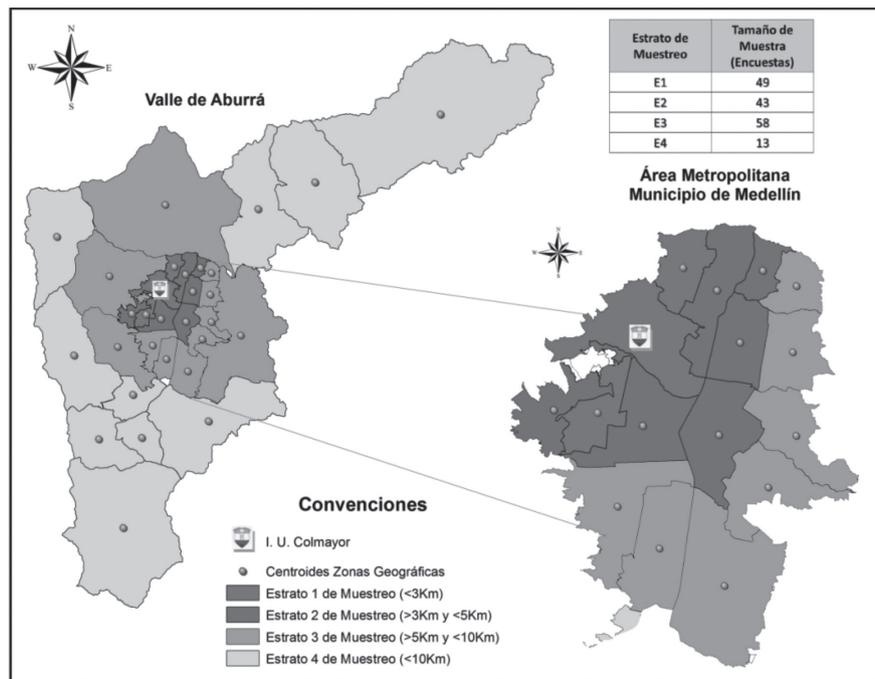


Figura 1. Estratos de muestreo y número de encuestas necesarias por estrato para generar una muestra estadísticamente significativa

Caracterización del parque automotor y patrones de movilidad

Con las muestras para cada uno de los estratos se hace una caracterización del uso de vehículos para la movilización desde y hacia la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. En todos los estratos predomina el uso del transporte público colectivo con porcentajes mayores al 50 %, seguido de la moto, el vehículo particular, los viajes a pie y en bicicleta, y se encuentra una participación nula de los viajes en taxi. No se registran viajes a pie y en bicicleta para estratos diferentes del primero y segundo, los cuales se encuentran en zonas a máximo cinco kilómetros de la Institución. En la figura 2, se muestra la distribución porcentual del uso de vehículos para la Institución según el estrato de muestreo. En la tabla 2 se presenta el promedio de la distancia de viajes por estrato, que corresponde aproximadamente a las distancias entre las zonas geográficas ubicadas en dicho estrato y la Institución, y se encuentra que los estratos 2 y 3 de muestreo son aquellos en los que se genera la mayor cantidad de viajes a la semana desde y hacia la Institución.

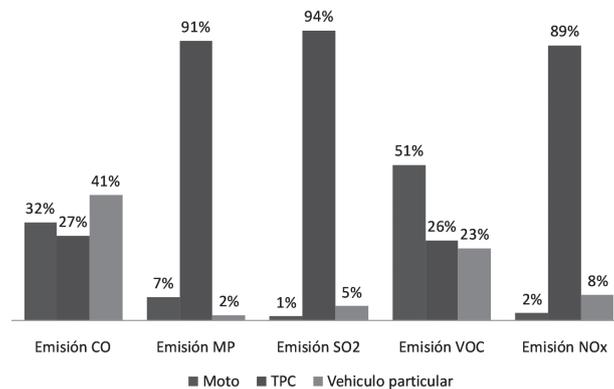


Figura 2. Distribución porcentual de los tipos de vehículo por estrato de muestreo

Tabla 2. Número de viajes a la Institución en la semana y distancias promedio para la muestra

Estrato	Número de viajes por semana	Distancia promedio de los viajes (km)
E1	57	3,7
E2	126	5,4
E3	90	9,0
E4	54	21,2

Emisiones y expansión

Conocidos los componentes de la ecuación 2, mediante el muestreo, se desarrolla la estimación de las emisiones para cada una de las encuestas diligenciadas en la muestra. En el Anexo C se presentan los resultados de las emisiones en unidades de gramos de contaminante producidos en una semana para la muestra. Los resultados de la muestra obtenidos con la encuesta se expanden para estimar las emisiones totales de la población institucional; el proceso de cálculo de los factores de expansión se hace por estrato de muestreo, tomando como base el número de encuestas por tipo de vehículo, así como su emisión total. Como las muestras por estrato son estadísticamente representativas para toda la comunidad, se considera que la expansión lograda en esta investigación es una aproximación robusta, y representa de manera confiable las emisiones semanales generadas por los viajes a la Institución. En la tabla 3 se presentan los datos de las emisiones totales generadas por la población institucional, teniendo en cuenta su estrato y tipo de vehículo, en unidades de gramos por semana de contaminantes criterio, a partir de la expansión realizada.

En la figura 3 se muestran los porcentajes de emisión para cada tipo de vehículo donde se encuentra que para el CO, el vehículo particular es el mayor emisor con un 41 %, debido a la combustión de gasolina corriente, la cual fue reportada como el combustible más empleado. Para los contaminantes MP, SO₂ y NO_x el transporte público colectivo es el mayor responsable de este tipo de emisiones con un 91 % de MP, 94 % de SO₂ y un 89 % de NO_x debido al alto nivel de impurezas y a la quema ineficiente del tipo de combustible utilizado.

Se encontró que las emisiones de VOC son generadas principalmente por las motos, que aportan un 51 % de la emisión total de este contaminante como se presenta en la figura 3. Este resultado se atribuye a que el proceso de combustión es menos eficiente en las tecnologías de las motos y estas

no cuentan con elementos de captura, recirculación y control de VOC (canister y/o catalizadores). Además, las motos con tecnologías de combustión a dos tiempos generan la mezcla del lubricante dentro el combustible; este aceite penetra en la cámara de combustión y se quema generando la emisión de VOC (Restrepo, Izquierdo, & López, 2007, 270).

Tabla 3. Emisiones por estrato y por tipo de vehículo de la población total de la Institución

Estrato	Tipo de transporte	Emisión CO	Emisión MP	Emisión SO ₂	Emisión VOC	Emisión NO _x
E1	A pie/Bicicleta	-	-	-	-	-
E1	Moto	14738	189	10	3784	632
E1	Transporte Público Colectivo	18757	3356	2005	3629	36821
E1	Vehículo particular	33857	7	38	4157	2656
E2	A pie/Bicicleta	-	-	-	-	-
E2	Moto	24864	375	23	10844	685
E2	Transporte Público Colectivo	21003	3757	2244	4063	41208
E2	Vehículo particular	26526	15	66	3294	2178
E3	Moto	51148	606	64	15192	2399
E3	Transporte Público Colectivo	34173	6097	3640	6611	66970
E3	Vehículo particular	59652	65	205	6661	7076
E4	Moto	9248	89	18	2699	516
E4	Transporte Público Colectivo	12271	2168	1292	2374	23870
E4	Vehículo particular	7992	183	130	963	3670
Total Emisiones (g/semana)		314228	16908	9735	64271	188681
Total Emisiones (g/año)		10055287	541050	311525	2056684	6037786

Se hizo la comparación de los resultados de emisión en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia con las emisiones estimadas para la región desarrolladas por la Universidad Pontificia Bolivariana (Universidad Pontificia Bolivariana, 2010b, 34). Esta comparación se presenta en la tabla 4, donde se muestra que la Institución no representa más del 0,025 % de las emisiones regionales para ninguno de los contaminantes criterio, tenidos en cuenta.

Propuestas de reducción de las emisiones a nivel Institucional

Para la disminución de las emisiones de contaminantes producidas por los viajes con motivos de estudio y trabajo desde y hacia la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia se formularon escenarios de reducción de emisiones. Los escenarios se fundamentan en la regulación del uso del vehículo particular a través del aumento del factor de ocupación en los viajes que se realizan a la Institución. Se hace una caracterización de los factores de ocupación en los viajes realizados con vehículos particulares. El factor de ocupación (FO) se define como la cantidad de asientos ocupados en el

vehículo durante el viaje, se toma la capacidad promedio de los vehículos particulares en la Institución como de cuatro pasajeros. Un FO del 25 % significa que en el viaje solo había un pasajero, el conductor. En la tabla 5 se presentan los factores de ocupación por estrato; encontramos que para los cuatro estratos la mayoría de los viajes únicamente incluyen al conductor (factor de ocupación del 25 %).

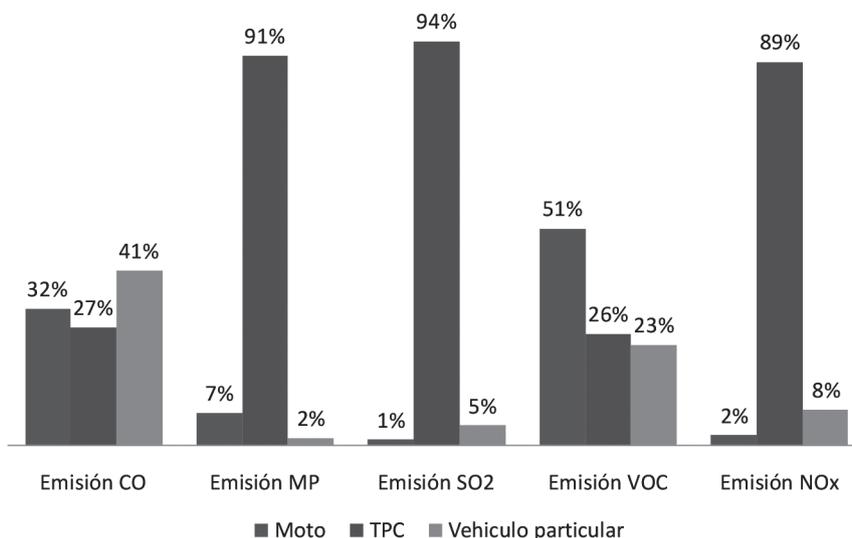


Figura 3. Distribución porcentual de los tipos de vehículo por estrato de muestreo

Tabla 4. Comparación de las emisiones de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia con respecto a las emisiones del Valle de Aburrá

	CO	MP	VOC	NOX
Valle de Aburrá (Ton/año)	166,89	2,37	25,65	29,32
Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia (Ton/año)	10,06	0,54	2,06	6,04
Porcentaje	0,006%	0,023%	0,008%	0,021%

Tabla 5. Caracterización del factor de ocupación generado por la comunidad académica según su estrato

Estrato	FO (25%)	FO (50%)	FO (75%)	FO (100%)
E1	100%	0	0	0
E2	73%	13%	7%	7%
E3	61%	17%	6%	17%
E4	69%	8%	8%	15%

Se proponen tres escenarios para la reducción de emisiones de contaminación mediante el uso racional del vehículo particular. Primer escenario: dos personas por vehículo; en este se mantienen los viajes con un factor de ocupación de 50 %, 75 % y 100 % por estrato, pero todos los viajes con un factor de ocupación del 25 % se agrupan en viajes con FO del 50 %. Segundo escenario: tres personas por vehículo; se mantienen los viajes con un factor de ocupación de 75 % y 100 % por estrato; y los viajes con un factor de ocupación de 25 % y 50 % se convierten a viajes del 75 % mediante la agrupación. Tercer escenario: cuatro personas por vehículo); se mantienen todos los viajes del 100 % de factor de ocupación, y los viajes con un 25 %, 50 % y 75 % se agrupan en viajes del 100 % de ocupación. En las tablas 6 y 7 se presentan los resultados de la estimación de número de viajes, emisiones totales de contaminantes criterio, y reducción de contaminación para cada uno de los escenarios propuestos de racionalización del uso del vehículo particular en la Institución.

Tabla 6. Número de viajes según los escenarios propuestos

Estrato	N.º de viajes en vehículo particular población	N.º de viajes en vehículo particular Escenario 1	N.º de viajes en vehículo particular Escenario 2	N.º de viajes en vehículo particular Escenario 3
E1	82	41	27	20
E2	98	62	39	29
E3	219	152	105	61
E4	57	38	25	15
Total	456	293	197	126

Tabla 7. Emisiones (Em.) de contaminantes criterio para la población (Pob.) y cada escenario Esc. (gr/semana) y porcentajes de reducción (% R.), asociados a cada escenario (Esc.) con respecto a la población por contaminante criterio

Esc.	Em. CO	(% R) CO	Em. MP	(% R) MP	Em. SO ₂	(% R) SO ₂	Em. VOC	(% R) VOC	Em. NO _x	(% R) NO _x
Pob.	314228	-	16908	-	9,73	-	64271	-	188681	-
Esc. 1	266580	15,2 %	16815	0,5 %	9,58	1,6 %	58616	8,8 %	183121	2,9 %
Esc. 2	240302	23,5 %	16757	0,9 %	9,49	2,5 %	55526	13,6%	179864	4,7%
Esc. 3	221345	29,6 %	16711	1,2 %	9,41	3,3 %	53333	17,0%	177371	6,0%

Las reducciones se calculan con base en la emisión estimada por la actividad de la población total de la Institución. Se encontró que para el primer escenario es posible lograr reducciones de hasta el 15 % en emisiones totales de CO, lo que representa una disminución de aproximadamente 48.000 gramos semanales; para el segundo escenario se alcanzan reducciones del 23,5 % de CO y para el tercer escenario reducciones de aproximadamente el 30 %, como se muestra en la tabla 7.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo de tipo *Bottom up* para la estimación de emisiones a escalas institucionales. Esta metodología se basa en la ecuación del modelo SEEM, no es intensiva en la demanda de informa-

ción primaria, es de fácil manejo y adaptable a otros ambientes institucionales, no necesariamente universitarios, teniendo en cuenta que a mayor población será mayor el aporte a la contaminación local. Para el contexto regional, el modelo se presenta como una herramienta novedosa debido a que logra una formulación de escenarios para el control de la contaminación emitida por las actividades de una institución universitaria. Experiencias similares como la presentada por Giraldo, (K. Giraldo, 2011), logran la caracterización y estimación de las emisiones producidas por la actividad vehicular en las vías aledañas a las instituciones universitarias, y están orientadas a evaluar el impacto de estas emisiones en la salud de las comunidades académicas, pero no se evalúa cuál es el aporte debido a la actividad particular de la institución, lo que dificulta las intervenciones para el control de la contaminación.

Tradicionalmente los inventarios de emisiones en el nivel institucional se han convertido en herramientas para la evaluación de la contribución de estas a las concentraciones de gases de efecto invernadero; con ellos se busca la estimación de unidades de CO₂ equivalente, y de esta forma se evalúa el potencial de reducción de la contribución al aumento del calentamiento atmosférico (Güereca, Torres, & Noyola, 2013, 397; Klein-Banai & Theis, 2013, 31; Mathez et al. 2013, 135). El calentamiento de la atmósfera mediante el efecto invernadero es un proceso natural de largo plazo, para el cual se debe tener en cuenta un inventario global de emisiones, en el que el aporte de instituciones pequeñas puede ser asumido como despreciable. Es por eso que la metodología propuesta busca la estimación de contaminantes criterio relacionados con problemas de concentración a escala local y problemas de salud en la comunidad, y es una herramienta interesante para la evaluación de iniciativas de mejoramiento de las condiciones de contaminación en ciudades o regiones metropolitanas. Consideramos que la metodología desarrollada puede ser adaptada para la estimación de gases de efecto invernadero logrando la cuantificación del aporte local a dinámicas de corte global.

Los escenarios de reducción propuestos funcionan como una herramienta para minimizar la emisión de contaminantes atmosféricos generados por instituciones o empresas con mediana y alta población, e impactan directamente el transporte particular por ser el vehículo más sencillo de controlar debido al fácil acceso a la información necesaria para generar la agrupación de personas que tengan una ruta en común y utilicen un solo automóvil en su trayecto. Los resultados encontrados en este estudio son un parámetro de referencia para la gestión ambiental institucional, porque es a través de acciones positivas, motivadas desde la administración, como se logran reducciones significativas en las emisiones de contaminantes producidas por la actividad semanal de las instituciones. En cuanto a la implementación de los escenarios de reducción, es necesario levantar de forma detallada la información primaria, incluyendo preguntas sobre los días y horarios de los viajes, con el fin de generar de forma efectiva agrupaciones de viajeros.

Se encontró que el transporte público colectivo es el modo de transporte más utilizado por la comunidad de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, con un 75 % del total de los viajes; este, a su vez, representa el 91 % de las emisiones de material particulado (MP), contaminante asociado a afectaciones serias sobre la salud humana, debido a que las impurezas y la combustión ineficiente pueden producir partículas que entran por las vías respiratorias, llegan a los pulmones e ingresan hasta el torrente sanguíneo ocasionando enfermedades como cáncer, afección en los sistemas respiratorios y cardiovasculares, incluso la muerte (Oyarzún, 2010, 20).

Si bien las emisiones asociadas al transporte público colectivo representan aproximadamente el 90 % de MP, SO₂ y NO_x, no es posible generar propuestas para la racionalización del uso de este tipo de transporte desde la escala institucional, porque se trata de un servicio público ofrecido a toda la población de la región y no únicamente a la población que viaja hacia la institución. Se dificulta la agrupación de personas en las mismas rutas de transporte y en un mismo horario, y es a través de políticas de chatarrización y actualización de estas tecnologías como se puede prestar este tipo de servicios públicos con menores impactos sobre la calidad del aire local. En este mismo sentido, para las motos que representan los

mayores porcentajes de emisión de VOC, se evidencia la necesidad de mantener opciones de control a la contaminación como el pico y placa para motos de dos tiempos, e incentivar la reposición de motos de dos tiempos por motos de cuatro tiempos y recomendar que en todos los casos es importante tener estos vehículos en óptimas condiciones de operación.

Los factores de emisión empleados para el desarrollo de este estudio fueron tomados de la base de datos del modelo IVE definidos para la ciudad de Bogotá, donde se tomaron en cuenta variables ambientales particulares de la ciudad como la humedad, la temperatura ambiente y la altura, entre otros, por lo que su uso para las condiciones del Valle de Aburrá puede generar desviaciones con respecto a los resultados reales. El software desarrollado por el modelo IVE calcula factores de corrección para los factores de emisión, dependiendo de las condiciones locales, para mejorar las aproximaciones. Estos factores de corrección no fueron empleados para el desarrollo de este proyecto, debido a que el modelo IVE fue utilizado como base de datos de factores de emisión y no como metodología de cálculo de las emisiones.

Los resultados encontrados en el estudio desarrollado por Londoño y otros (2011) para el municipio de Envigado muestran cómo las actividades vehiculares de motos y vehículos particulares, que representan el 23 % y 64 %, respectivamente, generan una proporción de emisiones de VOC de 34 % para motos y 39 % para vehículos particulares (ver figura 4 en la fuente). Esta proporción nos indica que la participación de las motos en la emisión de VOC es mayor que la de los vehículos particulares, si se tiene en cuenta que la actividad de estas es 41 % menor que la de los vehículos. Este patrón de emisión se comprueba en los resultados del presente estudio, en el cual el uso de vehículos particulares y motos representa una proporción igual de la flota de la Institución (16 %), pero con una participación de las motos en las emisiones de VOC igual al 51 %.

En cuanto a las emisiones totales generadas por la Institución, comparadas con las del Valle de Aburrá, no representan un valor significativo, ya que solo se emite el 0,025 % a las emisiones totales regionales. Es importante aclarar que la institución tiene una población pequeña (3086 personas) a comparación de otro tipo de entidades y universidades de la ciudad. La implementación del modelo presentado en este artículo en lugares con población y flujo vehicular superiores facilitaría el control de la contaminación y generaría un impacto significativo en cuanto a la reducción de contaminantes atmosféricos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. El modelo que se presenta en este estudio se convierte en una herramienta por medio de la cual, las empresas e instituciones pueden complementar sus proyectos de responsabilidad social empresarial.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia por su apoyo no solo en la financiación de este proyecto sino también por la disposición en el momento del diligenciamiento de las encuestas y por todo el apoyo logístico recibido desde de la Dirección de Investigación en cabeza de la profesora Ángela María Gaviria Núñez. También queremos extender nuestro agradecimiento a la organización y comité científico del IV Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública por los valiosos aportes metodológicos para el desarrollo de este proyecto. Y finalmente agradecemos de forma muy especial a los investigadores Joan Amir Arroyave Rojas y Laura Lotero Vélez por los comentarios y apoyo en el proceso de revisión de este artículo.

ANEXOS

**Anexo A. Formato de la encuesta empleada
para la recolección de información primaria**

Medio de transporte	Información básica requerida para cada tipo de transporte			
Preguntas Generales (Para todos los encuestados)	¿Tipo de su vinculación con la Institución?			
	Estudiante	Docente/Administrativo		
	¿En qué medio de transporte realiza los viajes para llegar a la Universidad?			
	Vehículo particular	Moto	Transporte público colectivo	A pie/bicicleta
	¿Cuántos viajes por semana hace a la Institución?			
	¿Cuál es lugar de partida de sus viajes hacia la institución?			
	¿Comuna en la que se inicia el viaje?			
a) Vehículo Particular	¿Con cuántas personas inicia el viaje?			
	¿Cuál es la referencia de su vehículo?			
	¿Cuál es el cilindraje de su motor?			
	¿Cuál es el modelo de su vehículo?			
	¿Conoce el kilometraje actual recorrido por su vehículo?			
	¿Qué combustible consume su vehículo?			
	Diésel	Gasolina	Gas natural	
	¿Qué sistema de paso de combustible tiene su vehículo?			
	Carburador	Inyección multipunto	Inyección Mono punto	
	b) Motocicleta	¿Cuál es el tipo de motor que tiene su moto?		
2 tiempos		4 tiempos		
¿Cuál es el modelo de su moto?				
¿Qué combustible consume su moto?				
Gasolina		Energía eléctrica		
¿Cuál es el cilindraje de su moto?				
¿Conoce el kilometraje actual recorrido por su moto?				
c) Transporte público colectivo	¿Qué tipo de transporte público utiliza usted?			
	Metro	Metroplús	Bus	Taxi
	¿Cuántos transportes utiliza usted para llegar a la universidad?			

Anexo B. Factores de emisión empleados para la estimación de emisión
Factores de emisión para vehículos particulares (g/km)

Índice IVE (Índice IVE 2009)	CO	MP	SO ₂	VOC	NOx
2	34,2	0,006	0,027	4,30	2,15
5	34,2	0,008	0,032	4,30	2,15
8	34,6	0,071	0,041	5,25	3,58
45	22,4	0,003	0,020	2,72	1,75
48	22,4	0,003	0,024	2,72	1,75
49	27,1	0,003	0,023	3,35	1,81
180	0,8	0,003	0,016	0,09	0,17
181	1,1	0,003	0,017	0,23	0,22
182	3,5	0,007	0,017	0,40	0,32
183	0,8	0,003	0,021	0,10	0,31
184	3,7	0,003	0,022	0,32	0,36
185	8,0	0,009	0,023	0,66	0,43
186	0,8	0,003	0,028	0,13	0,89
187	3,9	0,003	0,029	0,44	1,02
224	34,6	0,064	0,001	0,05	3,58
797	0,7	0,166	0,030	0,08	1,75

Fuente: (L. A. Giraldo, 2005, 3; Herrera, 2007, 28)

Factores de emisión para motos (g/km)

Tecnología vehicular (Índice IVE 2009)	CO	MP	SO ₂	VOC	NOx
1172	15,3	0,29	0,003	8,40	0,05
1197	2,20	0,05	0,004	1,50	0,01
1198	2,80	0,06	0,004	1,90	0,01
1199	3,60	0,08	0,004	2,40	0,02
1206	5,20	0,07	0,003	1,30	0,21
1207	6,50	0,09	0,003	1,60	0,26
1208	8,30	0,11	0,003	2,10	0,34
1209	6,50	0,09	0,005	1,60	0,26
1212	13,0	0,18	0,007	3,30	0,53
1242	1,20	0,01	0,003	0,40	0,08
1243	1,60	0,01	0,003	0,50	0,10
1244	2,10	0,02	0,004	0,60	0,13
1245	1,50	0,01	0,005	0,50	0,09
1248	3,10	0,03	0,007	0,90	0,19
1249	4,00	0,03	0,008	1,20	0,24

Fuentes: (L. A. Giraldo, 2005, 3; Herrera, 2007, 26)

Factores de emisión para buses (g/km)

Tecnología vehicular	CO	MP	SO ₂	VOC	NO _x
Buses Modelo ≤ 1980	12,24	1,51	0,83	2,36	20,02
1980 < Buses Modelo ≤ 2000	12,24	1,51	0,83	2,36	20,02
2000 < Buses Modelo ≤ 2005	2,18	1,21	0,81	0,46	18,55
Buses Modelo ≥ 2005	2,18	1,21	0,81	0,43	5,74

Fuente: (Universidad Pontificia Bolivariana, 2010a, 42)

Anexo C. Emisiones por estrato y por tipo de vehículo-muestra (g/semana)

Estrato	Tipo de transporte	Emisión CO	Emisión MP	Emisión SO ₂	Emisión VOC	Emisión NO _x
E1	A pie/Bicicleta	-	-	-	-	-
E1	Moto	901	12	1	231	39
E1	Transporte Público Colectivo	1146	205	123	222	2251
E1	Vehículo particular	2069	0	2	254	162
E2	A pie/Bicicleta	-	-	-	-	-
E2	Moto	3795	57	4	1655	104
E2	Transporte Público Colectivo	3205	573	342	620	6289
E2	Vehículo particular	4048	2	10	503	332
E3	Moto	4210	50	5	1250	197
E3	Transporte Público Colectivo	2813	502	300	544	5513
E3	Vehículo particular	4910	5	17	548	582
E4	Moto	2092	20	4	610	117
E4	Transporte Público Colectivo	2775	490	292	537	5399
E4	Vehículo particular	1808	41	29	218	830
Total Emisiones (g/semana)		33773	1959	1129	7193	21815

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, H. L. (1986). Metropolis, Monte Carlo, and the MANIAC. *Los Alamos Science*, (14), 96-108.
- Davis, N.; Lents, J.; Osses, M.; Nikkila, N, y Barth, M. (2005). Development and Application of an International Vehicle Emissions Model. In *Transportation Research Board 81st Annual Meeting* (pp. 1–20). Washington, D.C.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2014). La estratificación socioeconómica en el régimen de los servicios públicos domiciliarios. *Estratificación Socioeconómica para Servicios Públicos Domiciliarios*. Retrieved from <http://www.dane.gov.co/index.php/estratificacion-socioeconomica/generalidades>
- Gantuz, M. A. y Puliafito, J. L. (2004). Fuentes móviles y la caracterización de vías de circulación : una aproximación a los modelos de emisión grillados. In G. Buscaglia, E.

- Dari, y O. Zamonsky (Eds.), *Mecánica Computacional* (Vol. XXIII, pp. 1761–1786). Bariloche, Argentina.
- Giraldo, K. (2011). *Caracterización y estimación de emisiones vehiculares en la Universidad Autónoma de Occidente*. Universidad Autónoma de Occidente.
- Giraldo, L. A. (2005). *Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes*. Universidad de los Andes.
- Google. (2014). Google Earth. *La información geográfica del mundo en tu mano*. Retrieved from <http://www.google.es/intl/es/earth/index.html>
- Güereca, L. P.; Torres, N. y Noyola, A. (2013). Carbon Footprint as a basis for a cleaner research institute in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 47, 396–403. doi:10.1016/j.jclepro.2013.01.030
- Herrera, D. (2007). *Modelo de emisiones vehiculares para la ciudad de Bogotá (EVB)*. Universidad de los Andes.
- IVE. (2008). *Manual de Usuario del modelo IVE* (p. 55).
- Klein-Banai, C. y Theis, T. L. (2013). Quantitative analysis of factors affecting greenhouse gas emissions at institutions of higher education. *Journal of Cleaner Production*, 48, 29–38. doi:10.1016/j.jclepro.2011.06.004
- Kouridis, C. Ntziachristos, L. y Samaras, Z. (2000). *COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport. User Manual (Version 2.1)* (p. 46). Retrieved from http://www.eea.europa.eu/publications/Technical_report_No_49
- Kroese, D. Taimre, T. y Botev, Z. (2011). *Handbook of Monte Carlo Methods*. (Wiley, Ed.) (p. 722). Wiley and Sons.
- Londoño, J.; Correa, M. A. y Palacio, C. A. (2011). Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en área urbana de Envigado, Colombia. *Revista EIA*, 16, 149–162.
- Martínez Bencardino, C. (2012). *Estadística y Muestreo*. (E. Ediciones, Ed.) (13th ed., p. 874).
- Mathez, A.; Hall, B.; Manaugh, K.; Chakour, V.; Mechanics, A.; Building, M. E. & El-geneidy, A. (2013). How can we alter our carbon footprint? Estimating GHG emissions based on travel survey information. *Transportation*, 40(1), 131–149.
- Oyarzún, M. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 26, 16–25.
- Restrepo, Á.; Izquierdo, S. y López, R. (2007). Estimación de Factores que inciden sobre la contaminación ambiental generada por fuentes móviles en Pereira. *Scientia et Technica*, (37), 267–272.
- Tuía, D.; Ossés de Eicker, M.; Zah, R.; Osses, M.; Zarate, E.; y Clappier, A. (2007). Evaluation of a simplified top-down model for the spatial assessment of hot traffic emissions in mid-sized cities. *Atmospheric Environment*, 41(17), 3658–3671. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.12.045
- United States Environmental Protection Agency. (2003). *User's Guide to Mobile Source Emission Factor Model MOBILE6* (p. 262).

- United States Environmental Protection Agency. (2012). *Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES): User Guide Version, MOVES2010b (EPA-420-B-12-001b, June 2012)* (p. 202). Retrieved from <http://www.epa.gov/otaq/models/moves/#generalinfo>
- Universidad Pontificia Bolivariana. (2010a). Inventario de emisiones fuentes móviles y eólicas. In *Estudio de la dispersión de contaminantes en el Valle de San Nicolás Jurisdicción de la Corporación Aunonoma Regional Rionegro-Nare* (p. 70). Medellín.
- Universidad Pontificia Bolivariana. (2010b). Simulaciones especiales Tarea 1: Optimización del inventario de Emisiones atmosféricas. In *Evaluación de los niveles de contaminación atmosférica en las zonas urbanas del Valle de Aburrá* (p. 161). Medellín.