

Inventario de emisiones de fuentes móviles con una distribución espacial y temporal para el área metropolitana de Cochabamba, Bolivia

Mobile source emissions inventory with a spatial and temporal distribution for the metropolitan area of Cochabamba, Bolivia

Lucía Calla Durandal & Marcos Luján Pérez

Carrera de Ingeniera Ambiental, Departamento de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad Católica Boliviana “San Pablo” Regional Cochabamba, Campus Tupuraya. Calle M. Márquez esq. Parque Trigo Andia

luli637@gmail.com

Resumen: El área metropolitana de Cochabamba surge por el crecimiento urbano de los siete municipios colindantes al municipio de Cercado (Sacaba, Tiquipaya, Colcapirhua, Quillacollo, Vinto y Sipe Sipe), este crecimiento genera un incremento del parque vehicular. En la ciudad de Cochabamba, se sabe que las fuentes móviles son las responsables de un 70% de las emisiones en general, afectando a la calidad de vida de las personas, como también afectando a bienes materiales y al medio ambiente, generando así la falta de conocimiento de cuando y donde se generan los contaminantes provenientes de este tipo de fuente.

En el estudio realizado, fueron estimadas las emisiones de fuentes móviles con una distribución temporal y espacial para el área metropolitana de Cochabamba. Para obtener dichos resultados se realizó una proyección exponencial (para el 2016) del parque automotor del lugar, de esa manera se logró conocer la población con la que se iba a trabajar.

Para el cálculo de las emisiones se utilizó el programa IVEM (International Vehicle Emission Model, <http://www.issrc.org/ive/>), se calculó las emisiones horarias de contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero, considerando que el día empezaba las 6:00 hasta 20:00 y así se generó la distribución temporal. Para conocer la distribución espacial se utilizaron los programas ArcGIS®, Google Earth y SAS Planet, con la ayuda de estos programas se exportó imágenes raster donde se demarcó las calles por tramos dentro de áreas delimitadas para cada municipio, se obtuvo información para las calles más transitadas como las de menor tráfico, de tal manera que se puede conocer el grado de exposición a estos contaminantes.

El contaminante que se emitió en mayor cantidad, dentro del área de estudio, fue el CO₂ con un valor de 791 091,71 Mg año⁻¹ que es un gas de efecto invernadero, el siguiente contaminante con mayor emisión fue el CO con un valor de 148 480,19 Mg año⁻¹, estos se generaron en mayor cantidad a comparación de los demás contaminantes, en las horas de embotellamiento del tráfico vehicular y en las zonas céntricas de cada municipio.

Palabras claves: fuentes móviles, contaminación atmosférica, inventario

1 Introducción

Uno de los problemas ambientales que enfrenta el mundo actualmente y desde la Revolución Industrial, es la contaminación atmosférica. Esta revolución fue la consecuencia del aprovechamiento del vapor para generar energía, en la cual la contaminación se hizo presente por el humo y las cenizas provenientes de la quema de carbón y aceites [1]. Este tipo de contaminación se ve más preocupante en países industrializados, como ser China y Estados Unidos, los cuales son los países con mayor cantidad de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Pero esto no significa que los demás países estén exentos de las emisiones de contaminantes. En Bolivia se tiene valores fuera de los límites permisibles establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Ley del medioambiente del país.

En agosto de 2003, la Fundación Suiza de Cooperación para el Desarrollo Técnico - Swisscontact empezó a realizar la implementación del proyecto Aire Limpio en las ciudades de La Paz, El Alto, Cochabamba y Santa Cruz de la Sierra, por ser estas las que presentan mayor flota vehicular. La finalidad, del proyecto Aire Limpio, es contribuir a la mitigación del cambio climático y a la mejora de la calidad de vida de la población de las ciudades, a su vez mejorar la calidad y eficiencia del transporte público [2]. A pesar de poseer dicho proyecto, la ciudad de Cochabamba continúa con valores preocupantes de contaminación atmosférica, especialmente cuando ocurre cambio de estaciones (invierno/verano). Por otro lado las condiciones topográficas y climáticas son inadecuadas, y desfavorecen a la dispersión y ventilación de contaminantes.

Es por eso que el artículo se enfocó a realizar una estimación de emisiones con distribución espacial y temporal, para generar un inventario y estudiar las características de los contaminantes emitidos por fuentes móviles. El trabajo se realizó utilizando el modelo de International Vehicle Emissions Model (IVEM), creado por la Environmental Protection Agency U.S. (EPA), para poder estimar las emisiones, y se trabajó con una base de datos de Sistemas de Información Geográfica (SIG), específicamente ArcGIS®, para poder generar las distribuciones espaciales y temporales.

2 Planteamiento del problema

El área metropolitana de Cochabamba, por sus características topográficas y climáticas, tiene niveles altos de contaminación atmosférica; si bien algunos contaminantes se encuentran dentro de los límites permisibles, siguen siendo perjudiciales para la salud humana y ambiental de la zona. Existen diversas causantes para dicha situación de contaminación, una de ellas es el crecimiento

urbano que ocasiona, a su vez, un crecimiento del parque vehicular y ambos generan gran cantidad de fuentes difusoras.

Un estudio realizado desde 1998 hasta el 2012 por el INE (2013), se muestra un incremento del 92,7% del parque automotor a la cifra actual de 274 759 vehículos (entre vehículos particulares, públicos y oficiales). Según el Registro Único para la Administración Tributaria Municipal (RUAT), el parque automotor en el área metropolitana de Cochabamba creció en más de un 50% entre los años 2005 y 2012 [3].

Se ha estimado que en la ciudad de Cochabamba el parque vehicular es la principal fuente de contaminación atmosférica, causantes del 92% de las emisiones de material particulado menos a 10 micras y óxidos de nitrógeno. Otra de las causas de las emisiones, de este tipo de fuente, es el ineficiente plan de mantenimiento e inspección de los vehículos, es por eso que existen vehículos obsoletos o que se encuentran en mal estado de funcionamiento, además de ser algunos vehículos importados usados y transformados mecánicamente [3]. De igual manera, el mantenimiento de calles con o sin asfalto afecta al incremento de las emisiones material particulado proveniente de la re suspensión de polvo; ya que en calles sin asfalto o en malas condiciones existen mayor cantidad de sedimentos o tierra a comparación de las calles que se encuentran asfaltadas.

Conociendo las características locales y topográficas, el incremento de población y del parque automotor y los efectos de las emisiones provenientes de las fuentes móviles, se generó el problema de la falta de información sobre cuando y donde se generan las emisiones de las fuentes móviles del área metropolitana de Cochabamba, y la falta de actualización de datos. Es así como surgió la necesidad de realizar un inventario de emisiones de fuentes móviles con distribución espacial y temporal.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Elaborar un inventario de emisiones de fuentes móviles con distribución espacial y temporal en el área metropolitana de Cochabamba, de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos, para generar una herramienta de gestión de calidad del aire.

3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las fuentes móviles de emisión en el área de estudio para determinar el aporte de las categorías vehiculares definidas

- Identificar el método adecuado de estimación de emisiones, analizando las características de las fuentes móviles
- Establecer la variación temporal diaria de las emisiones de las fuentes móviles en función de los contaminantes
- Elaborar mapas que representen las variaciones espaciales de las estimaciones de emisiones, utilizando una base de datos SIG

4 Sustento teórico

4.1 Contaminación atmosférica

Según la Ley N° 1333 del medio Ambiente de Bolivia, en su Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica, la contaminación atmosférica es la “presencia en la atmósfera de uno o más contaminantes, de tal forma que se generen o puedan generar efectos nocivos para la vida humana, la flora o la fauna, o una degradación de la calidad del aire, del agua, del suelo, los inmuebles, el patrimonio cultural o los recursos naturales en general”.

4.1.1 Fuentes móviles

La contaminación atmosférica proviene de una mezcla de varias fuentes de emisión, que van desde chimeneas industriales, el parque automotor hasta las actividades naturales. En general existen cuatro tipos de fuentes: fuentes fijas, fuentes de área, fuentes móviles y fuentes naturales [4].

Las fuentes móviles son aquellas que se pueden desplazar en forma autónoma, emitiendo contaminantes a través de su trayectoria. En áreas urbanas se considera como fuente móvil al parque automotor, constituido por automóviles, trenes, camiones, buses, aviones y otros. Estos son responsables de emitir directamente contaminantes primarios que reaccionan para convertirse en secundarios [5].

Las emisiones provenientes del parque automotor están compuestas por una gran cantidad de contaminantes (como ser CO, NO_x, SO_x y PM) provenientes de muchos procesos diferentes. Uno de los procesos comúnmente más considerado, son las emisiones del escape, que resultan de la combustión del combustible y son liberados por el escape [6]. Los otros procesos, según Radian International (1997), se los encuentra detallados a continuación:

Emisiones evaporativas del motor caliente: se generan por causa de la volatilización del combustible en el sistema de alimentación después que el motor es apagado, el calor residual proveniente del motor volatiliza el combustible.

Emisiones evaporativas de operación: son ocasionadas por las fugas de combustible que se presentan mientras el motor está funcionando.

Emisiones evaporativas durante la recarga de combustible: son emisiones generadas por el desplazamiento del combustible del tanque al momento de la recarga, esto ocurre en las gasolineras principalmente (se puede considerar como fuente de área).

Emisiones diurnas: son emisiones provenientes del tanque de combustible debido a una mayor temperatura del combustible y por su presión del vapor. Este incremento se debe a la temperatura ambiente por el sistema de escape del vehículo o por el calor reflejado en la superficie del camino.

Emisiones evaporativas en reposo: se diferencia de las anteriores, ya que ocurren cuando el motor está apagado, estas pérdidas se deben a fugas de combustible y de la permeación del vapor a través del proceso de alimentación de combustible.

Existen también fuentes extras de contaminación, como ser el tipo de calle o carretera por la que circulan las fuentes móviles, ya que influyen en el levantamiento de partículas (PM). En la Figura 1 se muestran los procesos, anteriormente descritos, de emisión provenientes de vehículos automotores.

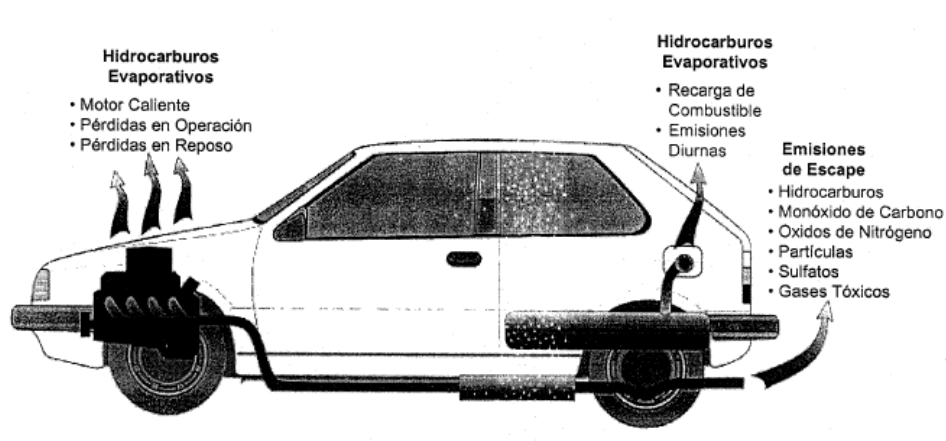


Figura 1: Procesos de emisión en vehículos automotores.

Fuente: RADIAN INTERNATIONAL 1997

4.1.2 Impactos en la salud

Según la Organización Mundial de la Salud OMS (2014) la contaminación atmosférica representa un importante riesgo hacia la salud humana; mediante una disminución de los niveles de contaminación, los países podrían reducir el valor de morbilidad derivada por las enfermedades causadas por este tipo de contaminación y así mejorar la salud cardiovascular y respiratoria de la población. Una estimación realizada por la OMS en 2014, revela que en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo se generan 7 millones de defunciones prematuras debido a la contaminación atmosférica.

Las poblaciones de países de bajos ingresos sufren desproporcionadamente la carga de morbilidad, ya que el 88 %, de los 7 millones de defunciones, corresponden a estos países [7]. A pesar del conocimiento sobre el riesgo para la salud por la contaminación atmosférica, en Bolivia existen pocos estudios que evalúen el impacto a la salud por los niveles de contaminación. Entre 2004-2005, en las ciudades de Cochabamba y La Paz, se realizó una evaluación al impacto en la salud por los contaminantes NO₂ y O₃, y PM respectivamente; los resultados mostraron un efecto significativo sobre todo en niños menores a cinco años y personas de la tercera edad [8].

4.2 Gestión de calidad del aire

Según el Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica de la Ley N° 1333 “la calidad del aire son las concentraciones de contaminantes que permiten caracterizar el aire de una región con respecto a concentraciones de referencia fijadas con el propósito de preservar la salud y bienestar de las personas”. La calidad del aire es la adecuación de los niveles de contaminación dentro de niveles permisibles, garantizan que los contaminantes en el aire no generen molestias y riesgos para la salud humana como daño ambiental.

La finalidad de una gestión de calidad del aire es de mantener la calidad de este para proteger la salud y el bienestar de los humanos, proteger a los animales, plantas, ecosistemas y materiales. Para alcanzar la meta de la gestión, se necesita desarrollar políticas y estrategias; sin un marco político apropiado y una adecuada legislación, es difícil conseguir que un programa de gestión se encuentre activo.

Las herramientas para la gestión de calidad del aire permiten estimar los niveles de emisión en una región, tomando en cuenta todas las fuentes de emisión mencionadas. Existen varias herramientas técnicas de apoyo para este tipo de gestión, algunas de ellas son: inventario de emisiones, estudio de dispersión de contaminantes y creación de modelos a mesoescala, monitoreo de la calidad del aire, evaluación de los riesgos ambientales para la salud, evaluación de daños por contaminación, análisis del costo ambiental de contaminación atmosférica, establecimiento de regulaciones y medidas de control, entre otras [9].

Según el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de la República de Colombia (2008) las herramientas básicas para la gestión de calidad son los inventarios, la modelación y las políticas en materia de contaminación atmosférica. Estas tres herramientas se integran para el programa de gestión de la siguiente manera: la medición y los inventarios de emisiones generan fundamentos científicos y técnicos para el desarrollo de políticas y estrategias; la modelación de la calidad del aire permite la formulación de políticas integrales y realizar un ajuste a las políticas existentes; y por ultimo las políticas estructuradas a partir de resultados

anteriores orientan acciones de control, como los límites permisibles, declaraciones de emergencia, entre otros.

4.2.1 Inventarios con distribución espacial y temporal

Un inventario de emisiones es un elemento base para desarrollar un programa de calidad del aire, para que este sea consistente y que se llegue a realizar una reducción equitativa y eficaz de las emisiones que producen los diversos tipos de fuentes. Un inventario completo, detallado y valido hace que la tarea de identificar con mayor precisión las fuentes contaminantes sea más sencilla, a su vez permite identificar e instrumentar acciones con metas cuantificables en la reducción de los contaminantes [10].

Según Castillo (2009) el objetivo de la distribución temporal, es representar los procesos físicos y químicos que ocurren en un lapso específico de tiempo, se puede considerar como la contabilidad de la variación de las emisiones en el tiempo. La distribución temporal más sencilla se utiliza para una fuente de emisiones en estado estable, que genera emisiones con la misma tasa en todo momento. En condiciones reales, las fuentes de emisión pueden operar sólo durante el invierno (calefacción de espacios), no operar los domingos (numerosas fuentes comerciales o industriales), o tener picos de actividad durante determinadas horas del día (tráfico vehicular en horas pico).

Las distribuciones temporales permiten modelar correctamente la variabilidad de las emisiones durante los periodos de modelado deseados y estos podrán variar dependiendo del propósito del inventario. En general, el punto de inicio para la distribución temporal en el modelado de inventarios son los estimados de emisiones anuales. Posteriormente, la distribución temporal se realiza con los perfiles de distribución temporal, que indican la distribución de emisiones en el periodo de desagregación seleccionado (estacional, semana, día). Los estimados de emisiones anuales primero son desagregados utilizando perfiles de distribución estacional (primavera, verano, otoño, invierno). Los perfiles de distribución semanal se utilizan para contabilizar las diferencias en los niveles de actividad típicos de los días de la semana, sábados y domingos. Finalmente, los perfiles de distribución por hora permiten estimar las diferencias por hora en las emisiones [11].

Realizar un análisis de la distribución espacial, es un factor que explique desde una perspectiva geográfica, para entender el patrón de ciertas enfermedades que sufre la población [12]. El conocimiento de dicha distribución de los contaminantes atmosféricos permite realizar una aproximación poblacional a la valoración de riesgo de exposición a estos. La información que proporciona una distribución de esa manera, es la de realizar acciones necesarias orientadas a minimizar los riesgos, tomando en cuenta a la población más vulnerable [13].

4.2.2 Modelos de estimación de emisiones

El desarrollo de modelos sirve para estimar las emisiones de vehículos automotores con diversas características de emisión. La ecuación básica (2.1) para estimar dichas emisiones consiste en multiplicar los datos de actividad vehicular por un factor de emisión adecuado. Para los vehículos automotores, los datos de actividad se representan por los kilómetros recorrido por vehículo (KRV), que es la distancia total recorrida por estos dentro del dominio del área de estudio; en cambio los factores de emisión se expresan en unidades de gramos de contaminante emitido por KRV. Las estimaciones de KRVs deben ser desarrolladas a partir de datos locales como modelos de transporte o conteos de tráfico en circulación [6].

$$E_p = KRV * FE_p \quad (2.1)$$

Donde:

E_p = emisiones totales del contaminante p

KRV = kilómetros recorridos por vehículo

FE_p = factor de emisión del contaminante p

La ecuación 2.1 es aplicada para la mayoría de los contaminantes gaseosos y partículas. Para otros contaminantes tales como los SOx y el plomo, las emisiones se calculan utilizando un balance de combustible, suponiendo la emisión de la totalidad del azufre o plomo contenido en el combustible [14].

Para generar la estimación de emisiones es necesario recopilar una gran variedad de datos que incluyen los KRVs; estadísticas del consumo de combustible, velocidades de manejo, datos del registro vehicular y clases de vehículos; así como también es necesario las características del combustible usado. La importancia de los diferentes datos necesarios se los agrupa en tres categorías: primarios, secundarios y terciarios. Los primarios son los mínimos requeridos para generar un inventario básico; los secundarios remplazan los parámetros clave por omisión con datos locales; los terciarios se incluyen en la medida en que estén disponibles para afinar respecto a las condiciones locales [6]. Estos datos se pueden observar en la Tabla 1.

IVEM (International Vehicle Emissions Model) es un programa en lenguaje java que permite la estimación de las emisiones de contaminantes criterio, contaminantes tóxicos y gases de efecto invernadero provenientes del parque automotor [15]. El IVEM fue desarrollado conjuntamente por investigadores del Centro Internacional de Investigación de Sistemas Sustentables y la Universidad de California en Riverside (ISSRC); el modelo utiliza la distribución local de los vehículos, combustible utilizado, distribución de arranques y factores meteorológicos para adecuar el modelo a la situación local del área de estudio [16].

Tabla 1. Datos necesarios para realizar una estimación de emisiones

Datos primarios	Datos secundarios	Datos terciarios
Datos de actividad vehicular que cubran el área de estudio, agrupados para coincidir con los datos del factor de emisión disponibles	Información sobre el programa local de inspección y mantenimiento de vehículos	Datos de las encuestas locales de hábitos de manejo para identificar las longitudes de recorrido promedio y el tiempo transcurrido entre los arranques de motor
Estándares de emisión vehicular por año y modelo	Datos de las encuestas locales de alternación de vehículos y tasas de uso de combustibles	Datos de la encuesta del patrón de manejo para identificar los patrones locales de velocidad vehicular, peso transportado y tasas de aceleración
Velocidades vehiculares promedio		
Factores de emisión por tipo de vehículo, tipo de combustible, año, modelo y velocidad de manejo		
Datos de la composición del combustible		
Distribución del parque vehicular incluyendo la fracción de vehículos no registrados		
Condiciones locales de altitud y temperatura ambiente		

Fuente: Elaboración propia basada en RADIANT INTERNATIONAL 1997
Modelo IVEM (International Vehicle Emissions Model)

El concepto de desarrollo de este modelo fue el de proveer una herramienta a los países en vías de desarrollo para que puedan realizar una estimación rápida del inventario de emisiones de fuentes móviles, además sus autoridades competentes pudieran evaluar estrategias de control y planeación del transporte. El IVEM fue desarrollado para [15]:

- Ser fácil de entender y usar
- Ser flexible en su uso
- Adaptarse a cualquier país
- Demandar pocos datos de entrada
- Utilizar mediciones de campo

- Generar resultados consistentes

Este modelo estima las emisiones generadas por automóviles, motocicletas, camiones y autobuses, contempla un total de 7 categorías vehiculares, 1 372 tecnologías predefinidas y 45 tecnologías adicionales no definidas. Las tecnologías definidas se agrupan en: tamaño de vehículo (7 subcategorías), tipo de combustible (5 subcategorías), uso del vehículo (3 subcategorías), sistema de alimentación del combustible (3 subcategorías), sistema de control de emisiones evaporativas (varias subcategorías) y sistemas de control de emisiones por escape (varias subcategorías) [15].

En la Figura 2 se muestra la arquitectura del proceso de estimación de emisiones por el modelo. La base de la estimación empieza con una tasa de emisión base y una serie de factores de corrección, que son aplicados para estimar la cantidad de polución de una variedad de vehículos. Existen tres componentes críticos que son usados en el modelo IVEM para desarrollar un inventario preciso [17]:

1. Las tasas de emisión de los vehículos (factores base de emisión y corrección)
2. Actividad vehicular (ubicación de los datos de entrada)
3. Distribución de la flota vehicular (datos de la flota)

El modelo IVEM está diseñado de manera que la tasa de emisión base se multiplique con cada factor de corrección, de esa manera adecuar las emisiones a las características locales del área de estudio. Los factores de corrección tienen varias categorías, como se observa en la Tabla 2, el valor de cada uno de estos depende de las entradas seleccionadas en el archivo de “Localidad” en el modelo.

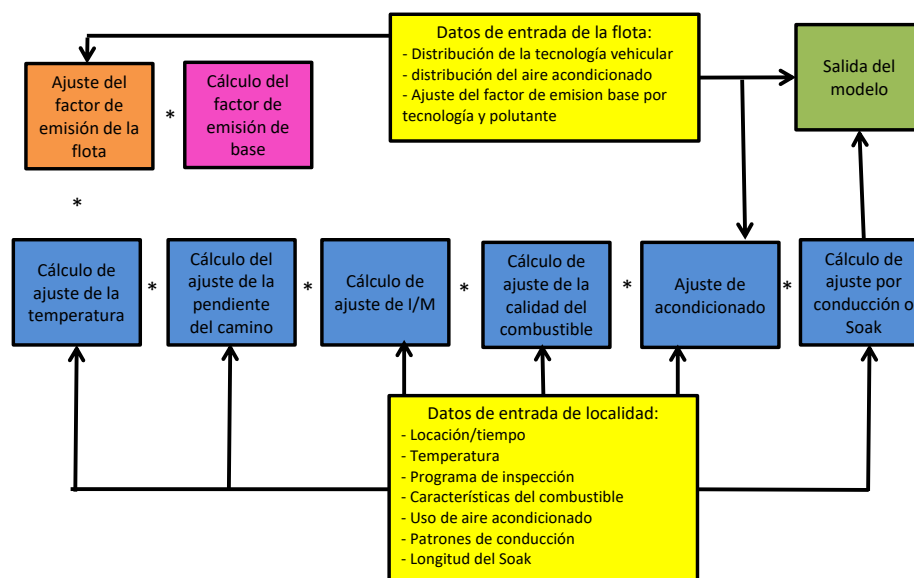


Figura 2: Arquitectura del modelo IVEM.

Fuente: Elaboración propia basada en HUI GUO, *et al.* s.f.

Tabla 2. Factores de corrección para información específica por el área de estudio

Variables Locales $K_{(x)[t]}$	Variables de Calidad de Combustible $K_{(fuel)[t]}$	Variables de Potencia y conducción $K_{[dt]}$
Temperatura ambiente	Gasolina total	Potencia Especifica Vehicular (VSP)
Humedad ambiente	Gasolina azufre	Pendiente
Altitud	Gasolina plomo	Uso de aire acondicionado
Programas de Inspección y Manutención	Gasolina Benceno	Distribución de partida en frio
Base de Factores de Corrección	Gasolina Oxigenados	
	Diesel total	
	Diesel azufre	

Fuente: ISSRC 2008

5 Metodología

5.1 Caracterización del parque automotor

Se caracterizó el parque automotor para poder determinar las características peculiares de este, con el fin de realizar una diferenciación entre los tipos de

tecnología vehicular existentes. Al ser un área de estudio muy amplia, según la metodología de inventario de emisiones, se clasificó a los vehículos en categorías en las que estos tengan características similares (como cilindrada, tipo de combustible) para luego cuantificar las emisiones de las categorías correspondientes. Los datos sobre el parque automotor se los obtuvieron mediante el INE (Instituto Nacional de Estadística) del año 2012, cuyos parámetros de crecimiento vehicular se los utilizó para realizar una proyección exponencial para el año 2016. Las categorías en las que se clasificaron las fuentes móviles son: automóviles particulares, automóviles públicos (taxis), jeep, vagonetas, camioneta, minibús, microbús, camión y motocicletas.

Luego de conocer la clasificación del parque automotor se realizó el estudio del tráfico vehicular. Para realizar dicho estudio, se necesitó conocer las áreas de estudio, tener una descripción de las rutas y las horas de recolección de datos. Se tomaron en cuenta 5 áreas, dentro del área metropolitana de Cochabamba, para poder obtener los datos necesarios para aplicar el modelo IVEM. Estas fueron elegidas para representar con mayor grado de exactitud a toda el área metropolitana, dichas áreas reflejan el parque vehicular promedio y el comportamiento global del área. El criterio de selección fue el crecimiento demográfico que fue resaltado en la Figura 3.

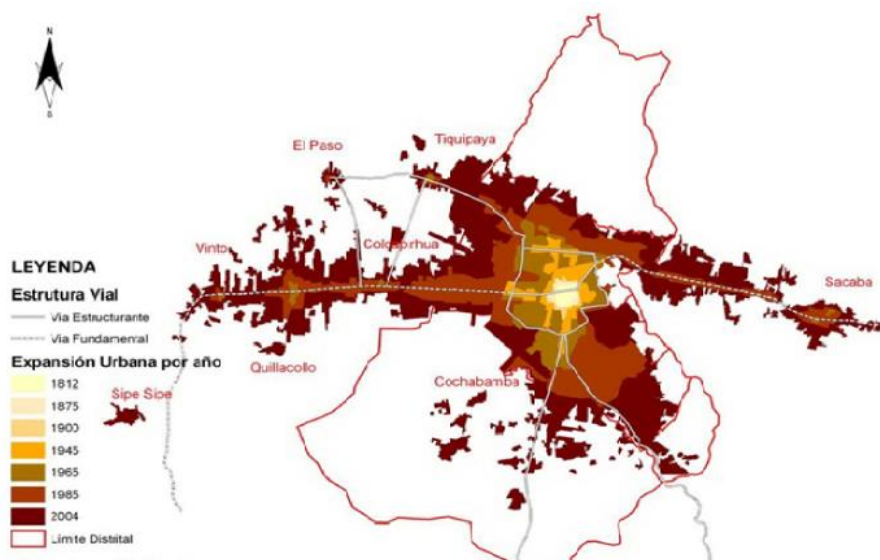


Figura 3: Expansión de la mancha urbana metropolitana.

Fuente: GOBERNACIÓN DE COCHABAMBA s.f.

Luego de determinar las áreas de estudio, se procedió a realizar la toma de decisión de las rutas, se necesitó tener como criterio cierto tipo de calles y avenidas

que sean representativas para el área de estudio, se tomó en cuenta que las calles utilizadas cumplieran con el requisito de ser de doble vía (ida y vuelta). Se realizó una descripción de las rutas de tráfico que se utilizaron para obtener datos representativos del área y de esa manera se realizó la estimación mediante el método seleccionado.

Para obtener la cantidad de cada categoría vehicular se realizó conteos, dichos conteos fueron de dos formas: contando en el momento y mediante filmaciones. El registro de conteo se llevó a cabo mediante un modelo de planilla

5.2 Estimación de emisiones con el modelo IVEM

Para la estimación de emisiones se recolectaron datos pedidos por el modelo (ver Figura 2). Dichos datos necesarios son:

- Características locales: temperatura, humedad, altura, flujo vehicular, características de los combustibles.
- Características de la tecnología y actividad del parque automotor: tecnología, kilómetros recorridos promedios diario, velocidad promedio, cantidad de arranques, distribución de evaporación, comportamiento de manejo (bins).

La información necesitada se la consiguió de las Alcaldías de los Municipios del área de estudio, SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología), INE, RUAT (Registro Único para la Administración Tributaria Municipal) y otros organismos involucrados. Otro tipo de información como las de actividad del parque automotor, se la obtuvo mediante encuestas, se utilizó el método de muestro aleatorio estratificado (ecuación 2.2).

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q}{NE^2 + Z^2 \cdot p \cdot q} \quad (2.2)$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra

z = Nivel de confianza, para un margen de confianza del 95% es 1,96

p = Variabilidad positiva, si se desconoce se maximiza a 50% es decir 0,5

q = Variabilidad negativa, igual a $1 - p$

E = Precisión o error, en caso de aceptar un error del 5% será 0,05

N = Tamaño de la población conocida

Las encuestas se las realizó en estaciones de servicio, ya que los automóviles se encuentran parqueados y los dueños o conductores pudieron brindar tiempo para el llenado de encuestas. De igual manera se realizó las encuestas en las paradas de taxis, micros y trufis.

Fue necesario adquirir datos durante distintas horas del día para poder realizar la variación temporal diaria de la flota vehicular. En estudios realizados del IVEM se realizaron durante 6 días para poder obtener tecnología vehicular y comportamiento de manejo diario. Se recolectaron los datos (para encuestas y conteo vehicular) durante 5 días a la semana (durante dos semanas), 7 horas al día, alternando las áreas de estudio entre mañanas (6:00 a 13:00) y tarde (13:00 a 20:00) que son las horas donde se encuentra mayor tráfico vehicular.

5.3 Distribución temporal y espacial de las emisiones

Para realizar la distribución espacial se utilizó el programa ArcGis®. Se realizó mediante tablas de atributos para cada tramo definido, descargado de Open Street Map, las imágenes se las obtuvieron mediante el programa SAS planet, como imágenes raster; dichas tablas se encuentran conformadas por 4 columnas: número de identificación para cada celda y los valores de las emisiones provenientes del IVEM (3 contaminantes). Los tramos se los consideró entre las calles más transitadas vistas desde Google Earth, realizando una extrapolación de datos provenientes de las calles que cuentan con conteos vehiculares.

La distribución temporal se realizó para todas las categorías, se utilizó la información recaudada en el conteo vehicular, donde se consideró que el día empezaba a las 6:00 y finalizaba a las 20:00, de igual manera se realizó una extrapolación de datos para las calles que no cuentan con un conteo correspondiente.

6 Resultados y discusión

6.1 Caracterización del parque automotor

En la Tabla 3 se puede observar la cantidad de vehículos, proyectada para el año 2016, para cada categoría propuesta dentro los correspondientes 7 municipios del área de estudio. Se tiene una cantidad de 250 021 vehículos para toda el área metropolitana de Cochabamba, donde el municipio de Cercado representa un 60% de este, luego le sigue el municipio de Quillacollo con un 21,5% del total. La razón de que estos municipios tengan mayor presencia de vehículos es porque tienen mayor densidad poblacional que los demás (ver Figura 3), ya que la densidad poblacional está fuertemente relacionada con la cantidad vehicular; por ejemplo el parque automotor del municipio de Sipe Sipe representa un 0,02% del total debido a que su densidad poblacional es menor.

Tabla 3. Proyección del parque automotor por municipio y clase de vehículo para el 2016

Clase de vehículo	Total 2012	Proyección 2016
Automóvil	54 951	57 219
Camión	26 188	26 964
Camioneta	24 726	26 821
Furgón	728	955
Jeep	8 357	8 529
Microbús	3 246	3 199
Minibús	8 314	9 082
Moto	45 644	61 318
Ómnibus	1 611	1 673
Quadra track	120	166
Torpedo	41	38
Tracto Camión	3 891	4 445
Trimóvil camión	10	10
Vagoneta	96 932	104 770
Total	274 759	305 189

Fuente: Elaboración propia basada en INE 2013

A continuación se muestran los resultados obtenidos para poder concretar el estudio del parque automotor, el cual se lo denominó *selección de las áreas de estudio*. Las áreas son (Ver Figura 4):

- Área A: comprende una fracción del municipio de Sacaba
- Área B: comprende la zona céntrica del municipio de Cercado
- Área C: comprende parte de la zona norte del municipio de Cercado y parte del municipio de Tiquipaya
- Área D: comprende desde mediados del municipio de Colcapirhua hasta mediados del municipio de Vinto (pasando por Quillacollo)
- Área E: Comprende una fracción del municipio de Sipe Sipe

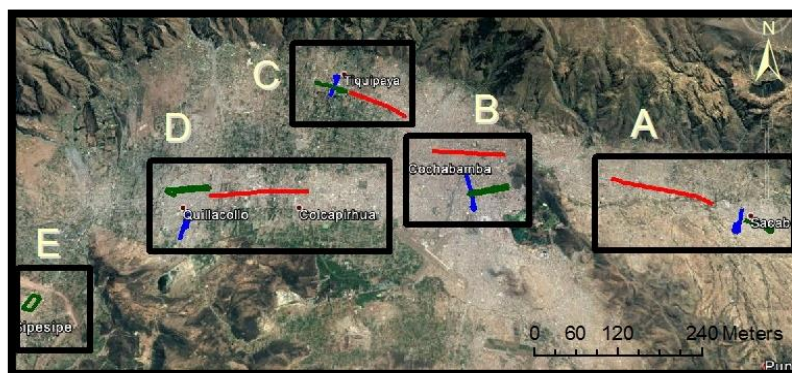


Figura 4: Áreas de estudio dentro del área metropolitana de Cochabamba.

Fuente: Elaboración propia

Las calles se las clasificó como autovía (con mayor flujo, es decir calles principales), residenciales (calles que enlazan a las personas a sus hogares o pequeños comercios) y arteriales (calles que conectan secciones principales). En nuestro caso las arteriales también se las tomó en cuenta como carreteras.

Dentro de cada área se definió circuitos, de forma que se pueda conducir para recolectar datos sobre el comportamiento de manejo. Cada área presenta dos a tres circuitos con los tres tipos de calles correspondientes, debido a que las áreas son muy extensas. Los circuitos fueron:

- En el área A: en el primer circuito, la calle autovía fue la Av. Villazón (ida y vuelta) desde la Av. Forestal hasta la unión con la calle Chapare. El segundo circuito comprende la c. Ismael Céspedes y c. Porvenir, subiendo por la Ismael Céspedes hasta la c. F4 y bajar por la c. Santa Cruz hasta la calle Porvenir. Donde la c. Ismael Céspedes corresponde a la calle arterial y la c. Porvenir a la calle residencial.
- En el área B: el primer circuito empieza en la Av. América y Plazuela Tarija, siguiendo recto la América hasta llegar al final de la Av. América (ida y vuelta); donde la Av. América corresponde a la autovía. El segundo circuito es la Av. Ayacucho (ida y vuelta) desde la Av. Aroma hasta la c. México, donde la Av. Ayacucho es la calle arterial. Por último se tiene el circuito de la c. Colombia desde la c. Junín hasta el final de la Colombia volviendo por la Av. Heroínas, la c. Colombia corresponde a la calle residencial.
- En el área C: el primer circuito a tomar en cuenta empieza desde la intersección de la Av. Centenario y la Circunvalación, siguiendo la Av. Centenario hasta llegar a la Av. Ecológica (ida y vuelta), la Av. Ecológica corresponde a la autovía. El segundo circuito empieza en la Av. Reducto y

pasaje Beni hasta que termina el asfaltado, la Av. Reducto corresponde a la calle arterial; y por último la c. Cochabamba desde el hotel Regina hasta la intersección con la Av. Ecológica, donde la c. Cochabamba es la calle residencial.

- En el área D: el primer circuito comprende la Av. Blanco Galindo (ida y vuelta) desde la rotonda de entrada a Colcapirhua hasta la Av. Germán Busch, la Av. Blanco Galindo corresponde a la autovía. El segundo circuito empieza en la Av. German Busch (ida y vuelta) y la c. Cochabamba, siendo la Av. German Busch la calle arterial. El tercer circuito corresponde a la c. Capitán Arzabe hasta bajar por la calle Thomas Bata y de Thomas Bata seguir por la calle Sucre, siguiendo la calle 14 de septiembre, hasta la Av. Ferrocarril; donde la c. Capitán Arzabe es la calle residencial.
- En el área E: será tendrá el circuito de la carretera Oruro – Cochabamba (ida y vuelta) desde la c. Mallco Chapi hasta la altura sobre la carretera de la minera MINDAI, donde la carretera es la autovía y la c. Mallco Chapi es la calle residencial.

Para conocer las características y la tecnología del parque automotor se realizó el estudio de las encuestas, con un número de muestras de 411 que se realizó con la ecuación 2.3, para toda el área metropolitana de Cochabamba. De las 411 propuestas se logró llenar 385 encuestas, la razón por la que no se pudo completar el número propuesto por la ecuación fue que algunas encuestas fueron realizadas erróneamente, ya sea por los encuestadores o por las personas encuestadas. Los encuestadores fueron estudiantes de distintas carreras y las personas encuestadas fueron conductores de cada categoría vehicular.

Según el manual del IVEM se necesita un mínimo de 300 vehículos estudiados, el número de encuestas realizadas de 385, se encontraban dentro del rango mínimo de vehículos estudiados necesarios. Los resultados de las encuestas se las uso exclusivamente para poder hacer funcionar el programa, es por eso que no se las tiene tabuladas dentro del artículo.

Para conocer los kilómetros recorridos o KRV primero se realizó los conteos vehiculares en las rutas previamente definidas, donde se pudo conocer la distribución del tráfico vehicular, dicha distribución se la tiene reflejada en la Figura 5. En esta figura se puede observar que la categoría de autos públicos presenta mayor tráfico dentro de las 5 áreas, especialmente dentro del área B que corresponde al centro del municipio de Cercado, con un valor de 8 279 veh/día. Dentro de la categoría de autos públicos las áreas A y D, de igual manera, presentan un alto tráfico vehicular con un promedio entre ambas de casi 5 000 veh/día.

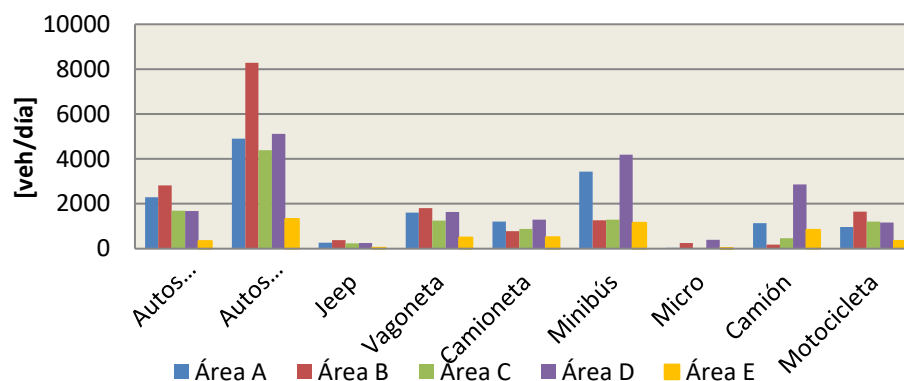


Figura 5: Distribución del tráfico vehicular del área metropolitana de Cochabamba

La razón por la cual las áreas A, B y D presentan más tráfico vehicular es por las calles donde se realizaron los conteos. Dichas calles presentaron mucho movimiento vehicular, en especial las carreteras, ya que unen el área metropolitana de Cochabamba. De igual manera en la Figura 5 se puede observar que la categoría, que sigue a los autos públicos, con mayor tráfico vehicular es la de minibuses, principalmente en las áreas A (Sacaba) y D (Colcapirhua, Quillacollo y Vinto). Las siguientes categorías que siguen son los autos particulares, vagonetas y camionetas que tiene mayor distribución vehicular dentro del área B, esto debido a que esta área es el centro de la Ciudad de Cochabamba.

El tráfico registrado para cada área de estudio no representa el 100% que se tiene para la proyección para el 2016 (ver Tabla 3); los porcentajes de representación de cada área son: A (Sacaba) con 54,6%; B (Cercado) con 11,6%; C (Tiquipaya) con 34%, D (Colcapirhua, Quillacollo y Vinto) con 27,5% y E (Sipe Sipe) con 92,2%. Esto quiere decir que no todos los vehículos registrados se encuentran circulando por las calles, debido a que estos no están registrados en sus respectivos municipios, además que transitan por toda el área metropolitana y no necesariamente solo en su municipio de origen. En total se tiene un tráfico de 68 289 veh/día para el área metropolitana de Cochabamba que representa el 27,3% del total de vehículos.

En la Tabla 4 se muestra los resultados obtenidos para los KRVs en km día⁻¹ para cada categoría dentro del área de estudio. El área A (Sacaba) es la que tiene mayor cantidad de recorrido en total con un valor de 602 547 km día⁻¹, seguida por el área D (Colcapirhua, Quillacollo y Vinto) con un recorrido de 551 433 km día⁻¹, tienen el mayor recorrido debido a las carreteras que se tomaron en cuenta, los recorridos diarios que hacen los vehículos son más largos que en las otras áreas.

Tabla 4. KRVs por categoría para el área metropolitana de Cochabamba

Tipo de vehículo	Áreas [km día ⁻¹]				
	A	B	C	D	E
Autos particulares	41 166	41 351	16 083	25 245	3 920
Autos públicos	206 136	289 765	298 520	286 888	15 792
Jeep	3 990	6 948	2 241	3 795	200
Vagoneta	33 663	32 381	14 964	19 704	2 500
Camioneta	38 528	20 952	13 290	12 940	2 540
Minibús	242 449	48 895	74 994	134 048	32 368
Micro	820	4 521	222	14 393	168
Camión	13 692	1 432	3 704	42 840	20 160
Motocicleta	22 103	27 999	8 498	11 580	8 640
TOTAL	602 547	474 244	432 516	551 433	86 288

De igual manera en la Tabla 4 se puede observar que la categoría que tiene más cantidad de kilómetros recorridos en un día, es la de autos públicos. Los autos públicos abarcan los taxis, radio taxis y taxi trufis, la mayoría de estos pertenecen a lo que se conoce como “transporte libre” y es por eso que existe una cantidad grande de estos circulando por las calles. La siguiente categoría que tiene mayor recorrido es la de los minibuses, estos de igual manera que los autos públicos, tienen una gran cantidad de vehículos; los minibuses recorren largas distancias dentro del área metropolitana, llevando a las personas de un lugar del área a otro más lejos.

Los resultados para las velocidades promedio se los obtuvo por tipo de vía, agregando otras calles más para poder tener datos más precisos para la distribución espacial, que se las puede observar en la Tabla 5. Según el Reglamento del Código de Transito de Bolivia (1978), en el artículo 113, las velocidades máximas dentro del radio urbano son:

- 10 km h⁻¹ para zonas escolares y militares
- 20 km h⁻¹ para calles donde la circulación de peatones y vehículos es intensa
- 30 km h⁻¹ para en avenidas y vías donde las condiciones de seguridad así lo permitan

En el artículo 114 de este mismo Reglamento de Tránsito, describe las velocidades promedio para carreteras y caminos fuera del radio urbano:

- 80 km h⁻¹ para carreteras asfaltadas

- 70 km h⁻¹ para caminos y carreteras ripiadas o de tierra

En la Tabla 5 se observa los 3 tipos de vía y sus respectivas velocidades promedio, las vías arteriales y residenciales se las tomo en cuenta como calles dentro del radio urbano, donde todas se encontraban dentro de las velocidades permitidas a excepción de las que superan los 30 km h⁻¹, que se encuentran marcadas de rojo en dicha tabla. Para las autovías se las considero como carreteras la Av. Villazón y Av. Blanco Galindo, ambas se encontraban dentro de las velocidades permitidas; la Av. América y Av. Ecológica se ubican dentro del radio urbano, por lo que sus velocidad máximas permitidas son 30 km h⁻¹ y como se puede observar ambas estaban dentro del límite permitido.

Es importante tomar en cuenta el tema de las velocidades promedio, ya que a mayor velocidad se tiene menor emisión de contaminantes y viceversa. Debido a que el motor se encuentra en distintas situaciones de funcionamiento.

Tabla 5. Velocidades promedio

Tipo de vía	Nombre de la Calle	Velocidad promedio [km h ⁻¹]
Autovía	Av. Villazón	45
	Av. América	18
	Av. Ecológica	25
	Av. Blanco Galindo	31
Arterial	c. Chapare	13
	Av. Juan de la Rosa	31
	Av. Ayacucho	11
	Av. Reducto	17
Residencial	c. Martín Cárdenas	15
	c. Porvenir	15
	c. Colombia	10
	c. Cochabamba	37
	c. Capitán Arzabe	18
	c. Mallco Chapi	17

6.2 Estimación de emisiones

La estimación se la realizó utilizando el modelo IVEM, al realizar el trabajo se encontró con dificultades respecto a la metodología, hablando específicamente de dicho modelo, ya que el manual no es muy claro en ciertos aspectos de fondo del programa. Donde se calcularon las emisiones de contaminantes atmosféricos y

gases de efecto invernadero; los contaminantes atmosféricos son: monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV), compuestos orgánicos volátiles evaporativos (COV evap), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), material particulado (PM), y los gases de efecto invernadero son: dióxido de carbono (CO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), metano (CH₄) y amoníaco (NH₃). La Tabla 6 refleja la estimación de emisiones, obtenidas por el IVEM, para las 5 áreas definidas en el punto 4.1 dentro del área metropolitana de Cochabamba, donde se puede observar que las emisiones se las calculó en Mg año⁻¹.

Se puede observar las emisiones totales por año, donde el contaminante que se emite en mayor cantidad, dentro las 5 áreas, es el CO₂ con un valor de 791 091,71 Mg año⁻¹ que es un gas de efecto invernadero que aporta a las contribuciones hacia el calentamiento global, el siguiente contaminante con mayor emisión es el CO con un valor de 148 480,19 Mg año⁻¹ siendo un contaminante atmosférico. El CO₂ y el CO se encuentran en mayor cantidad, en relación a los demás contaminantes, debido a que la tecnología de la mayoría del parque automotor del área de estudio, no cuentan con tecnologías que eviten y/o catalicen la emisión de estos contaminantes y de los demás a la atmósfera. Otros contaminantes que tiene un elevado valor, y se lo debe tomar en cuenta por sus efectos en la salud, son los NO_x con 8 885,31 Mg año⁻¹, ya que la exposición a este contaminante genera efectos agudos de respiración y cefálos hacia las personas. La generación de CO, CO₂ y NO_x dependen de la calidad de combustión, que esta está en función de la cantidad de oxígeno presente en el área estudio.

De igual manera en la Tabla 6 se puede observar a los contaminantes que presentaron menor emisión, estos fueron N₂O con 35,08 Mg año⁻¹, PM con 106,67 Mg año⁻¹ y SO_x con 5,60 Mg año⁻¹; la causa de emisiones de N₂O y SO_x (y demás) dependen de las características del combustible que se utiliza en el área de estudio. Las emisiones PM que se muestran en dicha tabla, solo son provenientes del escape y no así de la circulación de los vehículos por las calles asfaltadas y no asfaltadas, por eso en la Tabla 8 se muestra la estimación de PM₁₀.

Basándonos en los contaminantes con mayor y menor emisión, se observa que las áreas B (Cercado) y D (Colcapirhua, Quillacollo y Vinto) son las que presentan mayor emisión de CO₂ y CO, eso debido a la tecnología vehicular de ambas fueron similares y a su vez son las áreas con mayor flujo vehicular (ver Figura 5) y las áreas que presentaron menor emisión fueron C (Tiquipaya) y E (Sipe Sipe).

Tabla 6. Emisiones totales por área

Área	Emisiones [Mg año ⁻¹]									
	CO	COV	COV evap	NOx	SOx	PM	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	NH ₃
A	16 401,47	1 312,00	75,77	364,45	0,29	7,51	65 470,48	0,29	1 135,43	13,35
B	88 127,75	10 976,39	488,48	6 558,37	1,13	40,52	432 163,21	31,79	2 957,13	74,24
C	2 205,27	311,99	14,98	83,19	2,76	1,82	11 366,38	1,14	94,03	3,00
D	27 348,84	4 313,79	223,39	1 017,36	0,74	14,55	144 988,00	1,11	2 708,08	28,39
E	14 396,86	3 486,97	290,37	861,94	0,68	42,27	137 103,63	0,74	2 433,01	42,22
TOTAL	148 480,19	20 401,14	1 092,98	8 885,31	5,60	106,67	791 091,71	35,08	9 327,68	161,21

La siguiente área que presentó una elevada emisión de CO₂ y CO fue el área A (Sacaba), debido a que en esta área se tomó en cuenta la Av. Villazón que es una carretera y de igual manera presenta un alto flujo vehicular; en cambio, las áreas C (Tiquipaya) y E, en general, no tienen emisiones muy elevadas ya que su flujo vehicular no fue elevado.

Como se observó en la Tabla 6 el contaminante que se emite en mayor cantidad es el CO₂, que es un gas de efecto invernadero, los otros dos gases de efecto invernadero (N₂O y CH₄) se los puede representar como equivalentes de CO₂ (CO₂eq) ya que este gas es el que más aporta, por sus características, al calentamiento global. Según el Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático IPCC (2014), 1 gr de CH₄ es equivalente a 21 gr de CO₂ y 1 gr de N₂O equivale a 310 gr de CO₂, estos valores de equivalentes se lo puede observar en la Tabla 7, como también la sumatoria total de N₂O y CH₄ en CO₂eq y de CO₂.

Tabla 7. Emisiones totales de CO₂

Área	[Mg CO ₂ eq año ⁻¹]		Total de CO ₂ [Mg año ⁻¹]
	N ₂ O	CH ₄	
A	91,31	23 843,97	89 405,77
B	9 854,55	62 099,63	504 117,39
C	353,71	1 974,70	13 694,79
D	344,31	56 869,61	202 201,92
E	229,88	51 093,28	188 426,79
TOTAL	10 873,76	195 881,19	997 846,66

En la Tabla 8 se observa las emisiones de PM₁₀ por categoría vehicular, para las 5 áreas de estudio, dentro del área metropolitana, ya que los valores de las emisiones de este contaminante varían por el peso y la presencia en las calles de cada categoría vehicular. Las categorías que generan más emisiones de PM₁₀ son los autos públicos y minibuses, debido a que son los que tienen mayor recorrido o KRV dentro de las calles (ver Tabla 4) principalmente las áreas C y B. Las categorías que emite menor cantidad de PM₁₀ son la de micros y Jeep, los micros debido a que ya no se encuentran en cantidades abundantes y los Jeep porque son más ligeros que las demás categorías (a excepción de las motocicletas). El área con mayor emisión de PM₁₀, es el área A con un valor de 3 686,39 Mg año⁻¹ debido a que el municipio de Sacaba no tiene calles en buen estado, la mayoría de sus calles residenciales son de tierra/piedra o el pavimento está en mal estado; el área D (Colcapirhua, Quillacollo y Vinto) es la segunda con mayor emisiones de este

contaminante ya que tampoco presenta todas las calles asfaltadas o en buen estado, debido a que son zonas rurales en proceso de urbanización.

Tabla 8. Emisión de PM₁₀ caminos con y sin pavimento por categoría

Tipo de vehículo	Emisiones de PM ₁₀ [Mg año ⁻¹]				
	A	B	C	D	E
Autos particulares	251,85	252,99	98,40	154,45	23,99
Autos públicos	1 261,14	1 772,78	1 826,35	1 755,18	96,62
Jeep	24,41	42,51	13,71	23,22	1,22
Vagoneta	205,95	198,11	91,55	120,55	15,30
Camioneta	235,71	128,18	81,31	79,17	15,54
Minibús	1 483,31	299,14	458,81	820,11	198,03
Micro	5,02	27,66	1,36	88,06	1,03
Camión	83,77	8,76	22,66	262,10	123,34
Motocicleta	135,23	171,30	51,99	70,85	52,86
TOTAL	3 686,39	2 901,43	2 646,14	3 373,67	527,92

6.3 Distribución temporal y espacial de las emisiones

Para la presentación de este artículo, solo se mencionará las distribuciones de las áreas más afectas por los contaminantes principales que afectan más a la salud de las personas (CO, NO_x y PM₁₀) que se muestran en la Tabla 6. Dichas áreas son A, B y D; donde en el área A, que representa el municipio de Sacaba, se mostraran las distribuciones de PM₁₀. El área B representa al municipio de Cercado (el centro de la ciudad de Cochabamba), donde se mostraran las distribuciones del NO_x; y para el área D (municipios de Colcapirhua, Quillacollo y Vinto) se mostrara las del CO.

• Área A

En la Figura 6 se muestra la distribución temporal de PM₁₀ y en la Figura 7 se muestra la distribución espacial del contaminante. Los lapsos de tiempo donde se genera casi 0,1 kg hora⁻¹ son 6-7am, 8-9am y 11am-12pm, que son los lapsos en los que se registra más KRVs para los vehículos, lo cual explica la re suspensión del material particulado por la circulación de estos por las calles. Estos resultados de emisión por hora se observa también en la distribución espacial, donde se puede observar que para este contaminante las calles si llegan a estar en el rango máximo de contaminación, ya que estas calles no se encuentran pavimentadas y tienen un flujo vehicular representativo; en cambio existen otras calles que de igual manera no

tienen pavimento pero no tienen flujo vehicular, por lo cual su nivel de emisión se mantiene bajo. Las calles que no se encuentran pavimentadas son las que se encuentran en la periferia del municipio, al ser zonas alejadas los vehículos no circulan por estas de manera seguida.

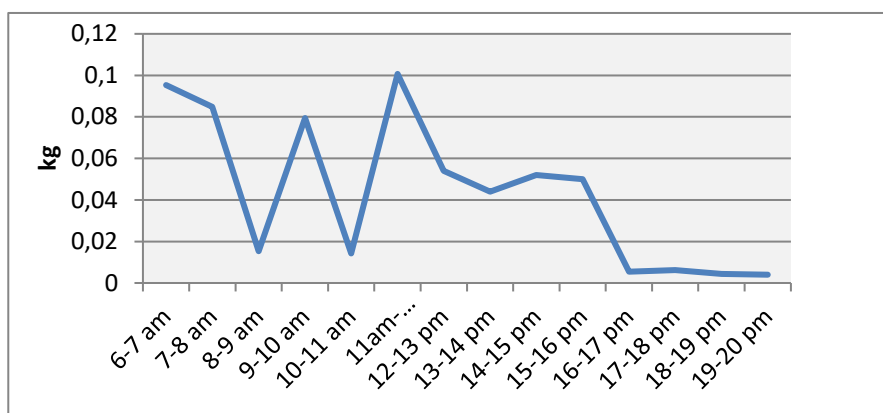


Figura 6: Distribución temporal de PM₁₀ en el área A

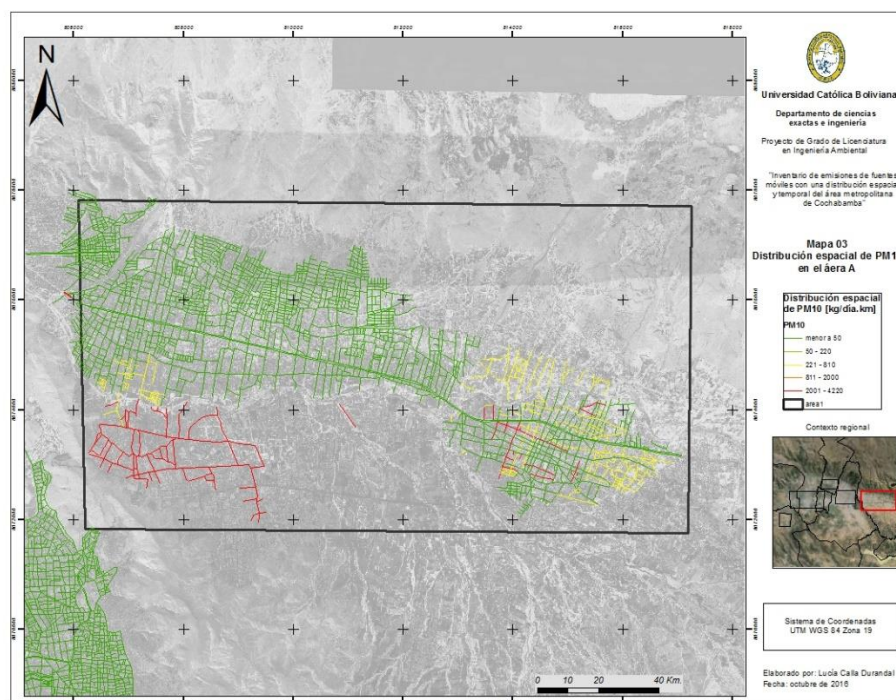


Figura 7: Distribución espacial de PM₁₀ en el área A

- **Área B**

En la Figura 8 se muestra la distribución temporal de NO_x para el área B y en la Figura 9 se muestra la distribución espacial de este mismo contaminante dentro del área B. Los lapsos de tiempo donde se emite hasta casi 35 kg hora⁻¹ son en los periodos de 7-8am, 11am-12pm y 17-18pm. Las emisiones de NO_x en esta área están relacionadas con la temperatura del motor ya que en las calles se tienen embotellamientos seguidos en dichos lapsos de tiempo, aumenta el estrés del motor, haciendo que incremente la temperatura de este y genere más NO_x que en una calle con poco tráfico vehicular. Respecto a la distribución espacial, de igual manera que el CO, se observa que las calles con más presencia de NO_x (en el rango de muy malo con 211 – 427 Mg hora⁻¹ km⁻¹) nuevamente son las que se encuentran en el centro del municipio. Las calles con mayor nivel de emisión son 16 de julio, 25 de mayo, San Martín, Lanza, Antezana y Aroma; las calles de la periferia del centro igual presentaron valores dentro del segundo rango de contaminación, estas calles son las avenidas arteriales que unen secciones de la ciudad, el resto de las calles se encuentran con niveles bajos de contaminación.

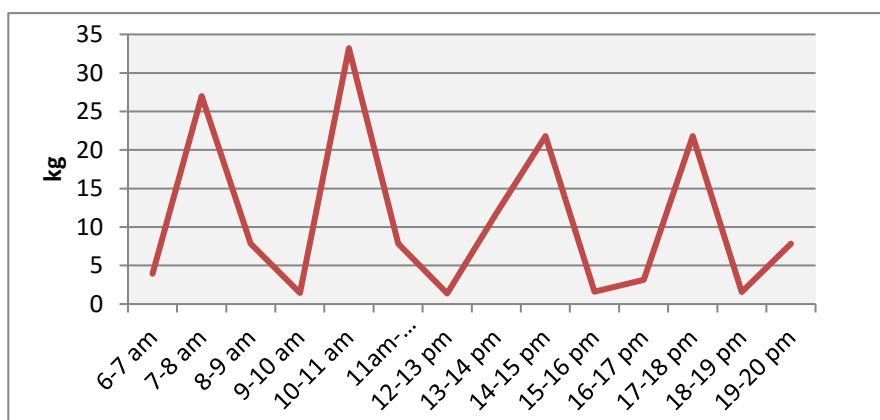


Figura 8: Distribución temporal de NO_x en el área B

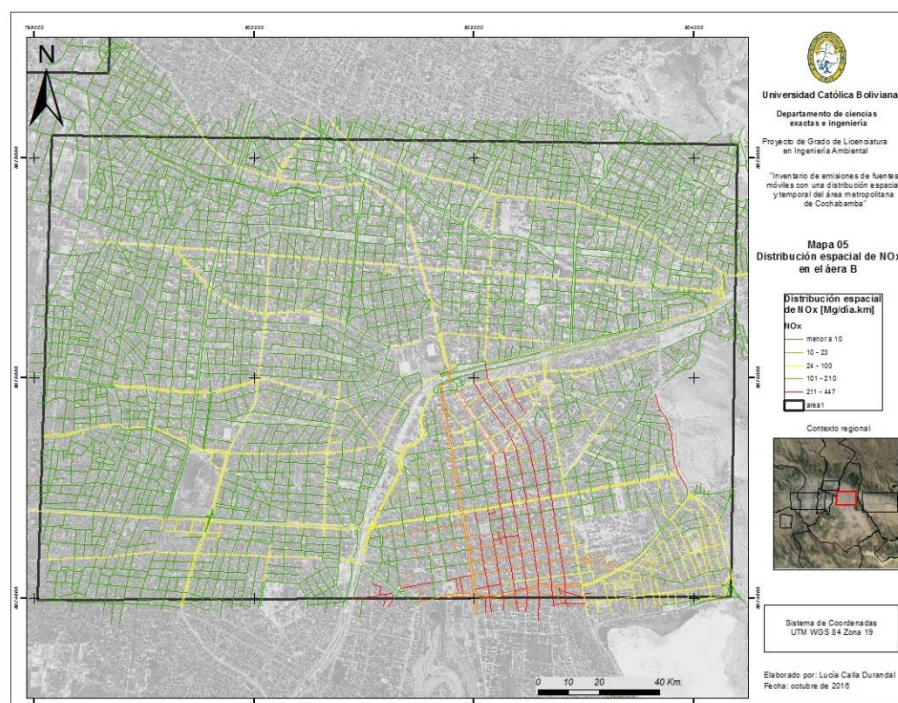


Figura 9: Distribución espacial de NOx en el área B

• Área D

En la Figura 10 se observa la distribución temporal de CO en el área D y en la Figura 11 se muestra la distribución espacial de este contaminante para la misma área. El área D representa el conjunto de municipios de Colcapirhua, Quillacollo y Vinto, donde el lapso de tiempo donde se genera más contaminación, durante el día, es a las 14-15pm. En ese lapso de tiempo es donde se tiene registrado más tráfico vehicular, con los embotellamientos, y reducen las velocidades de los vehículos aumentando el estrés del motor y así generando más contaminación.

Se muestra la distribución espacial de CO en el área D (Colcapirhua, Quillacollo y Vinto), donde se observa que la Av. Blanco Galindo se encuentra en el rango de malo con $601 - 1080 \text{ Mg día}^{-1} \text{ km}^{-1}$, y las siguientes calles con niveles regulares son las que se encuentran en el centro de la ciudad y algunas de la periferia que unen secciones de los municipios (como la Av. Cap. Ustáriz). La Av. Blanco Galindo al ser ancha, no se tiene cuellos de botella en los cuales se genere contaminación, estos embotellamientos surgen en las calles cercanas a la plaza principal como al mercado de Quillacollo, donde se disminuye la velocidad y las calles se vuelven más angostas.

Las personas que circulan por estas calles en las horas 14-15pm, principalmente por la Av. Blanco Galindo, están expuestas a respirar 500 kg hora⁻¹, lo cual puede causar, según la literatura consultada, problemas respiratorios y cardiovasculares a largo plazo, y en corto plazo tienden a presentar problemas al respirar, dolores de cabeza, náuseas y presiones en el pecho.

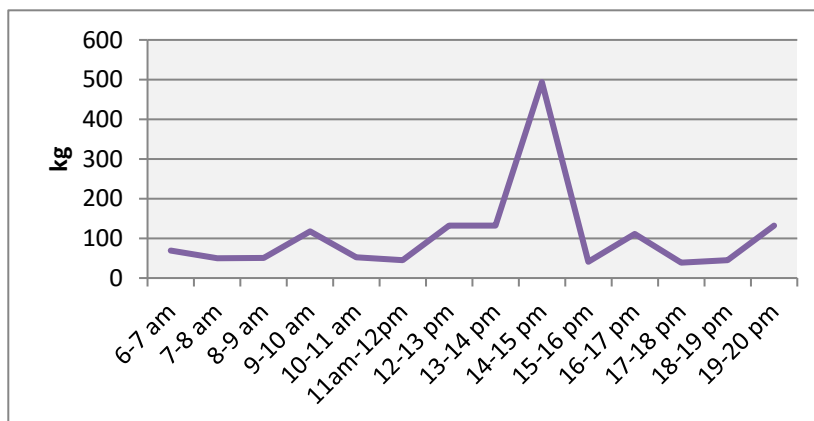


Figura 10: Distribución temporal de CO en el área D

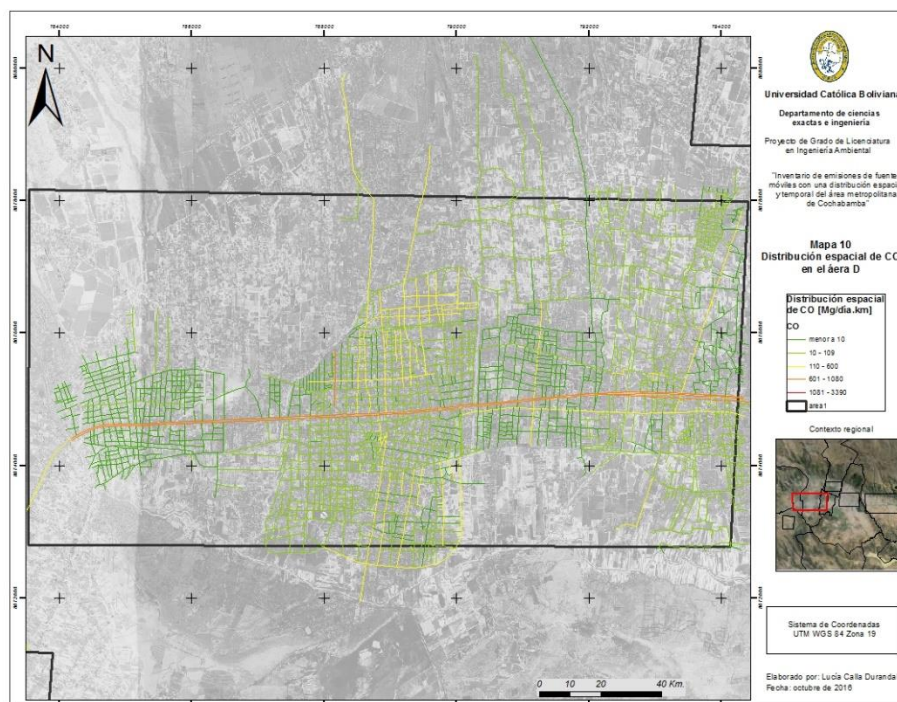


Figura 11: Distribución espacial de CO en el área D

7 Conclusiones

Para realizar las conclusiones del trabajo, nos basamos en los objetivos propuestos desde el inicio de este. Respecto a la caracterización de las fuentes móviles, se caracterizaron 7 categorías vehiculares, de las cuales la categoría que generó más emisiones fue la de autos públicos, que comprende de los taxis, radio taxis, taxi trufis y surubies; esta categoría emitió más debido a que hacen varios largos recorridos durante el día y son los que tienen mayor cantidad de KRV. Se concluye que se debería optar por opciones de transporte masivo, como también el fomento del uso de bicicletas o movilidades que generen menos contaminantes, para así lograr tener una mejor gestión de la calidad del aire. Con el transporte masivo se disminuye la cantidad de vehículos y la cantidad de contaminantes emitidos por estos, hasta se mejoraría el tráfico vehicular evitando embotellamientos innecesarios en las horas picos.

Luego de conocer las características climáticas y topográficas del área metropolitana de Cochabamba, como también el parque vehicular que esta tiene, se concluye que la mejor opción para realizar la estimación de emisiones es el uso del modelo IVEM. Al utilizar dicho modelo se consiguen las emisiones diarias y horarias, las cuales son un instrumento importante para la realización de un inventario de emisiones con distribución temporal. Se concluyó que los contaminantes más emitidos por los vehículos, luego de realizar la estimación en el programa, fueron: CO con 148 480,19 Mg año⁻¹; CO₂ con 791 091,7 Mg año⁻¹; COV con 20 401,14Mg año⁻¹; NO_x con 8 885,31 Mg año⁻¹ y PM₁₀ con 13 135,54 Mg año⁻¹. Estos contaminantes se concentran más en los centros de las ciudades de los municipios, como se vio en los mapas, afectando a la salud de las personas cuando están expuestos a estos. Para disminuir la cantidad de contaminantes, generando una gestión de calidad del aire, se puede optar por el transporte masivo como se explicó, también mejorar el estado de las calles, pavimentarlas en su mayoría para poder bajar la re suspensión de material particulado; como también, al ver los resultados, se podría considerar, como parte de la gestión de la calidad del aire, el implemento, cumplimiento y seguimiento de una adecuación ambiental del parque vehicular (como el decreto 771). Se debería tomar decisiones al respecto, ya que estos contaminantes son perjudiciales para la salud de las personas y para el medio ambiente, afectando a la calidad de vida.

En el Proyecto de Grado también se propuso realizar las distribuciones temporales y espaciales de los contaminantes, estas se realizaron basadas en las áreas de estudio definidas. Para la distribución temporal, los resultados obtenidos de mayor emisión sucedieron en los lapsos de 8-9am, 10-11am, 15-16pm y 18-19 pm fueron los horarios con mayor emisión de contaminantes para las 5 áreas. De los 7 municipios del área metropolitana, el municipio de Cercado es el que presentó una distribución de contaminantes elevada respecto a los demás, encontrándose en

los niveles de malo y muy malo para CO y NOx. La mayor emisión de contaminantes proviene del municipio de Cercado y de Quillacollo durante los lapsos de tiempos mencionados.

Es por eso que se concluye, en general, que las emisiones provenientes de las fuentes móviles suponen ser las de mayor contribución a la mala calidad atmosférica del área de estudio. Si no se controlan las emisiones de estas fuentes se generaran problemas a largo o corto plazo de afección a la salud de las personas, incrementando casos de mortalidad debido a este tipo de contaminación, y del medio ambiente. Y es así que este inventario con distribuciones se convierte en un aporte como herramienta para mejorar la gestión de calidad del aire, y así poder controlar los niveles de contaminación provenientes de las fuentes móviles del área metropolitana de Cochabamba.

Referencias Bibliográficas

- [1] VALLERO, Daniel (2008a). Fundamentals of Air Pollution. The changing Face of Air Pollution. California: Editorial Elsevier.
- [2] SWISSCONTACT (2014). “Proyecto de Aire Limpio”. En: <<http://www.swisscontact.org/es/proyectos-y-paises/buscar-proyectos/p/Project/show/aire-limpio-1.html>>, (fecha de consulta 09/03/2016)
- [3] GOBERNACIÓN DE COCHABAMBA (2014). “Planes Maestros Metropolitanos de Agua Potable y Saneamiento de Cochabamba. Anexo 2 Crecimiento demográfico en el área metropolitana de Cochabamba”. En: <[http://200.105.194.245/PlanesMaestrosMetropolitanos/CBBA/PMM-CBBA-INF.PRELIM-30-SEP-2013/Infome%20Etapa%20III%20\(PDF\)/04%20Volumen%20IV%20Anexos%20y%203/12%20Anexo%202.%20Crecimiento%20Demogr%C3%A1fico/Anexo%202.%20CRECIMIENTO%20DEMOGR%C3%81FICO.pdf](http://200.105.194.245/PlanesMaestrosMetropolitanos/CBBA/PMM-CBBA-INF.PRELIM-30-SEP-2013/Infome%20Etapa%20III%20(PDF)/04%20Volumen%20IV%20Anexos%20y%203/12%20Anexo%202.%20Crecimiento%20Demogr%C3%A1fico/Anexo%202.%20CRECIMIENTO%20DEMOGR%C3%81FICO.pdf)>, (fecha de consulta 24/05/2016).
- [4] UNAD (s/f). “Fuentes de contaminantes atmosféricos: fuentes móviles, fijas, puntuales y de área”. En: <http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358007/Contenido_en_linea_Caracterizacion/leccin_7_fuentes_de_contaminantes_atmosfricos_fuentes_mviles_fijas_puntuales_y_de_rea.html>, (fecha de consulta 09/03/2016).
- [5] EPA (2016). “Overview: Pollutants and Programs. Mobile Source Air Toxics”. En: <<https://www3.epa.gov/otaq/toxics.htm>>, (fecha de consulta 08/02/2016).

- [6] RADIANT INTERNATIONAL (2000). Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México. DF.
- [7] OMS (2014). “Calidad del aire (exterior) y salud”. En: <
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/> >, (fecha de consulta: 11/05/2016).
- [8] LUJÁN, Marcos (2008). “Evaluación preliminar del impacto de la contaminación atmosférica en la salud de la población de la ciudad de Cochabamba”. En: *Acta Nova*, Universidad Católica Boliviana “San Pablo” Regional Cochabamba, 2008, N^o 4, Cochabamba.
- [9] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (2008). “Manual para la elaboración de planes de gestión de la calidad del aire”. En: <
<http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527540/Manual+para+la+Elaboraci%C3%B3n+de+Planes+de+Gesti%C3%B3n+de+la+Calidad+del+Aire.pdf/27cbbaaf-0ecf-4d86-b0dc-18a2402d694e> >, (fecha de consulta: 13/05/2016).
- [10] FERNÁNDEZ, Adrián (s.f.). “Principios básicos de inventarios de emisiones”. En: <<https://www3.epa.gov/ttn/catc/dir1/cursos.pdf>>, (fecha de consulta 04/03/2016).
- [11] CASTILLO, Heriberto (2009). “Actualización de una herramienta para el procesamiento del inventario nacional de emisiones para su aplicación en México. Diagnóstico del estado actual de desempeño del sistema de procesamiento de emisiones SMOKE”. En: <
http://www.inecc.gob.mx/descargas/calair/2009_inf_act_smoke.pdf>, (fecha de consulta 24/03/2016).
- [12] RÍOS, Felipe (2014). Relaciones entre enfermedades respiratorias y la distribución espacial de contaminantes atmosféricos. Distribución de los contaminantes. Tesis en Licenciatura en Geografía, Universidad Academia de Humanismo Cristiano, Santiago de Chile.
- [13] ESTARLICH, Marisa *et al.* (2013). “Variación espacial de la exposición a contaminación atmosférica en la ciudad de Valencia y su relación con un índice de privación”. En: <
http://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=S0213-91112013000200008&script=sci_arttext>, (fecha de consulta 25/03/2016).
- [14] INCHE, Jorge (2001). “Estimación de emisiones en vehículos en circulación”. En: <
http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/indata/v04_n1/estimacion.htm >, (fecha de consulta 16/05/2016).

-
- [15] SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México) (2009). “Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas”. En: < <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/618/modelos.pdf> >, (fecha de consulta 13/05/2016).
- [16] DAVIS, Nicole; LENTS, James; OSSES, Mauricio; NIKKILA, Nick y BARTH, Matthew (s.f.). “Development and Application of an International Vehicle Emissions Model”. En: < <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/124925> >, (fecha de consulta 20/04/2016).
- [17] HUI GUO, *et. al.* (s.f.). “Development of High-Resolution Motor Vehicle Emission Inventories for City-Wide Air Quality Impact Analysis in China”. En: < <https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei17/session3/guo.pdf> >, (fecha de consulta 16/04/2016).
- [18] INE (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA) (2013). “Estadísticas del parque automotor 1998 – 2012”. En: < http://www.ine.gob.bo/pdf/Parque_automotor2013/Parque_Automotor_2013.pdf >, (fecha de consulta 13/04/2016).