



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY  
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ**

**Propuesta metodológica para la obtención del inventario de  
emisiones de fuentes móviles terrestres en la ciudad de  
Cuenca.**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:  
INGENIERO MECÁNICO AUTOMOTRIZ**

**Autor:  
JUAN SEBASTIAN URGILES CLAVIJO**

**Director:  
MATEO COELLO**

**CUENCA - ECUADOR**

## **DEDICATORIA**

A mi madre por ser ejemplo de esfuerzo y a mis hermanos por apoyarme en todo momento, a mi hija Martina el motor de mi vida y a mi esposa Johanna quien con amor supo ayudarme a alcanzar éste objetivo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia y amigos, quienes de algún modo contribuyeron a desarrollar éste documento, un reconocimiento especial al Ing. Mateo Coello por ser el guía apropiado durante ésta investigación.

**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
GLOSARIO.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	15
1. Capítulo I: GENERALIDADES .....	17
1.1. Problemática.....	17
1.2. Marco teórico. ....	17
1.2.1. Contaminantes.....	17
1.2.2. Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos.....	18
1.2.3. Los métodos directos.....	18
1.2.4. Los métodos indirectos. ....	18
1.2.5. Factor de emisión. ....	19
1.2.6. Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE). ....	19
1.3. Estado del Arte. ....	20

1.3.1.	Metodologías utilizadas en varios países de América. ....	20
I.	Metodología utilizada en EEUU. ....	20
1.4.	Pregunta de Investigación .....	25
1.5.	Objetivo General .....	25
1.6.	Objetivos Específicos .....	25
1.7.	Alcance. ....	26
2.	Capítulo II: Análisis de ventajas y desventajas de metodologías empleadas en inventarios de emisiones de Cuenca. ....	27
2.1.	Inventarios de emisiones. ....	27
2.1.1.	Definición de inventario de emisiones de fuentes móviles. ....	27
2.2.	Antecedentes de procesos y metodologías desarrollados para la elaboración de inventarios de emisiones. ....	28
2.2.1.	Antecedentes de la EPA. ....	28
2.2.2.	Antecedentes de inventarios de emisiones en Europa. ....	29
2.2.3.	Antecedentes locales. ....	30
2.3.	Metodología utilizada en el inventario de emisiones de Cuenca 2011. ....	31
2.3.1.	Características técnicas del modelo usado para estimar la cantidad de contaminantes criterio por fuentes vehiculares. ....	31
2.3.2.	Metodología para estimar la cantidad de gases de efecto invernadero usada en Cuenca. ....	35
2.3.3.	Resultados del inventario de emisiones vehiculares del cantón Cuenca 2011. ....	37
2.4.	Análisis de ventajas y desventajas de la metodología usada en Cuenca. ....	38
2.5.	Situación actual de la calidad del aire en Cuenca. ....	40
2.6.1.	Gestión local de la calidad del aire. ....	40

2.6.2.	Análisis del Informe de la calidad del aire de Cuenca 2014. ....	41
3.	Capítulo III: Caracterización de la flota vehicular.....	45
3.1.	Composición de la flota vehicular.....	45
3.2.	Composición de flota según IVE.....	46
3.2.1.	Metodologías que existen para determinar la composición vehicular. ....	47
3.3.	Metodologías de clasificación vehicular. ....	48
3.3.1.	Título del estudio: “Desarrollo y aplicación del modelo internacional de emisiones” ( <i>Development and Application of an International Vehicle Emissions Model</i> ). ....	48
3.3.1.1.	Antecedentes del estudio. ....	48
3.3.1.2.	Características técnicas de la metodología utilizada. ....	49
3.3.1.3.	Análisis de la metodología utilizada.....	51
3.3.2.	Título del estudio: “Metodología para la estimación de las emisiones atmosféricas del transporte por carretera en las zonas urbanas de Italia” ( <i>A methodology for the estimation of road transport air emissions in urban areas of Italy</i> ). ....	52
3.3.2.1.	Antecedentes del estudio. ....	52
3.3.2.2.	Características técnicas de la metodología utilizada. ....	52
3.3.2.3.	Análisis de la metodología. ....	53
3.3.3.	Título del estudio: “Análisis de la variabilidad espacial en los patrones de actividad y la distribución de la flota vehicular” ( <i>Analysis of spatial variability in vehicle activity patterns and vehicle fleet distribution</i> ). ....	54
3.3.3.1.	Antecedentes del estudio. ....	54
3.3.3.2.	Características técnicas de la metodología utilizada. ....	55
3.3.3.3.	Análisis de la metodología utilizada.....	56

4. Capítulo IV: Metodología para estimar KVR.....	57
4.1. Definición de KVR y su importancia. ....	57
4.2. Métodos de estimación de KVR.....	57
4.2.1. Metodologías de estimación de KVR desarrolladas en EEUU.....	58
4.2.2. Metodologías de estimación de KVR desarrolladas en Europa. ....	60
4.3. Metodologías de estimación de KVR utilizadas en ciudades del mundo.....	61
4.3.1. Título del estudio: “Inventario de emisiones de vehículos y análisis de su incertidumbre para Shanghai, China” ( <i>On-road vehicle emission inventory and its uncertain analysis for Shanghai, China</i> ). ....	61
Antecedentes del estudio. ....	61
Características técnicas de la metodología utilizada.....	62
Análisis de la metodología utilizada.....	63
4.3.2. Título del estudio: “Nuevo método de estimación de AADT y VMT locales a través de modelos de circuitos de red y simulación” ( <i>Novel Estimation Method of Community AADT and VMT via Circuit Network Models and Simulation</i> ).....	64
Antecedentes del estudio. ....	64
Características técnicas de la metodología utilizada.....	64
Análisis de la metodología utilizada.....	67
4.3.3. Título del estudio: “Informe del análisis de emisiones para el Plan de Transporte en la zona rural del condado de Davidson” ( <i>Emissions Analysis Report for the Transportation Plan for the Rural Portion of Davidson County</i> ). ....	67
Antecedentes del estudio. ....	67
Características técnicas de la metodología utilizada.....	68
Análisis de la metodología utilizada.....	68

5. Capítulo V: Metodología sugerida para calcular factores de emisión ajustados a una localidad utilizando IVE.....	69
5.1. Variables que intervienen en el cálculo de factores de emisión a través del modelo IVE. ....	69
5.2. Modelo IVE, descripción de datos de entrada.....	70
5.3. Procedimiento para la elaboración del inventario de emisiones por fuentes vehiculares.....	70
5.3.1. Planteamiento de la metodología. ....	71
5.3.2. Recolección de datos en ruta.....	71
5.3.3. Elaboración de ficha flota. ....	73
5.3.3.1. Procedimiento para la obtención de datos de composición vehicular.....	73
5.3.3.2. Procedimiento para el cálculo de KVR y parámetros de conducción. ....	74
5.3.3.3. Procedimiento para la obtención de la muestra vehicular.....	75
5.3.4. Elaboración de ficha localidad.....	78
5.3.5. Manejo de información GPS.....	78
5.3.6. Cálculo y análisis de la incertidumbre.....	79
5.3.6.1. Análisis de la incertidumbre.....	79
5.3.6.2. Metodologías de evaluación de la incertidumbre.....	80
5.3.6.3. Metodología propuesta para evaluar la incertidumbre de los FE obtenidos por el modelo IVE.....	80
6. Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones.....	82
6.1 Conclusiones: .....	82

6.1.1.	Sobre las metodologías para definir la composición vehicular.....	82
6.1.2.	Sobre las metodologías de estimación de KRV. ....	84
6.1.3.	Sobre la elaboración de inventarios de emisiones.....	84
6.2	Recomendaciones:.....	85
6.2.1.	Para la metodología propuesta. ....	85
6.3	Bibliografía:.....	86
ANEXO 1	.....	89

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1:	Cantidad en toneladas por año (t/a) de contaminantes criterio y de efecto invernadero estimados en el Inventario de Emisiones por Fuentes Vehiculares en Cuenca.....	37
Figura 2-2:	Mapa de la Ciudad de Cuenca. Localización de las estaciones de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Cuenca Año 2014.....	41
Figura 2-3:	Distribución espacial de la concentración media de partículas sedimentables para el año 2014 (mg/cm <sup>2</sup> durante 30 días).....	43
Figura 2-4:	Distribución espacial de la concentración media de SO <sub>2</sub> para el año 2014 (µg/m <sup>3</sup> ).....	43
Figura 2-5:	Distribución espacial de la concentración media de NO <sub>2</sub> para el año 2014 (µg/m <sup>3</sup> ).....	44
Figura 2-6:	Distribución espacial de la concentración media de O <sub>3</sub> para el año 2014 (µg/m <sup>3</sup> ).....	44
Figura 5-1:	Esquema de la metodología propuesta para elaborar un inventario de emisiones utilizando el modelo de emisiones IVE. ....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

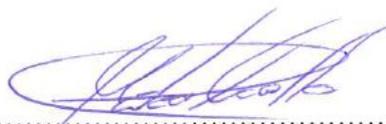
Tabla 2-1 Emisiones de CO <sub>2</sub> (t a <sup>-1</sup> ) de los inventarios de emisiones del Cantón Cuenca de los años 2007, 2009 y 2011.....	38
Tabla 2-2: Principales fuentes de emisión según el inventario de Cuenca 2011.....	42
Tabla 2-3: Valores de los mayores registros anuales de los contaminantes monitoreados.....	42
Tabla 4-1: Metodología de estimación de KVR utilizada en EEUU.....	59

## PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL INVENTARIO DE EMISIONES DE FUENTES MOVILES TERRESTRES EN CUENCA

### RESUMEN

Estudios sobre inventarios de emisiones desarrollados por el GAD de Cuenca, señalan al tráfico vehicular como la principal fuente contaminante, sin embargo, éstos no involucran en su método de predicción características que influyen significativamente sobre la cantidad y tipos de contaminantes producidos por fuentes móviles terrestres. Esta investigación analiza distintas metodologías para estimar emisiones, las cuales, han sido experimentadas en varias ciudades, mediante el análisis de dichas metodologías se proponen técnicas para captar datos acerca de la composición de una muestra vehicular y su actividad. Finalmente, se establece el proceso para elaborar un inventario de emisiones vehiculares en forma de manual metodológico a través del uso de un software de estimación de emisiones.

**Palabras Clave:** actividad vehicular, composición vehicular, inventario de emisiones, muestra vehicular, software de estimación de emisiones.



.....  
Ing. Mateo Coello  
**Director de Tesis**



.....  
Ing. Mateo Coello  
**Director de Escuela**



.....  
Juan Sebastián Urgiles Clavijo  
**Autor**

**METHODOLOGICAL PROPOSAL TO OBTAIN AN EMISSIONS  
INVENTORY FROM ON – ROAD MOBILE SOURCES IN CUENCA**

**ABSTRACT**

Studies of emission inventories developed by the GAD (Autonomous Decentralized Government, as its Spanish Acronym) of Cuenca point to vehicular traffic as the main source of pollutants; however, these studies did not include the characteristics that significantly influenced the amount and types of pollutants produced by on-road mobile sources in their prediction method. This research analyzed different methodologies to estimate emissions that have been experimented in several cities. Through the analysis of these methodologies, this study proposed techniques to capture data about the composition of a vehicle sample and its activity. Finally, the process to produce a vehicle emissions inventory as a methodological manual was established through the use of emission estimation software.

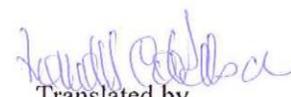
**Keywords:** vehicle activity, vehicle composition, emission inventory, vehicle sample, emissions estimation software.

Ing Mateo Coello  
**Thesis Director**

Ing. Mateo Coello  
**School Director**

Juan Sebastián Urgiles Clavijo  
**Author**

  
UNIVERSIDAD DEL  
AZUAY  
Dpto. Idiomas

  
Translated by  
Lic. Lourdes Crespo

**GLOSARIO**

<b>CO:</b>	Monóxido de Carbono
<b>CH4:</b>	Metano
<b>N2O:</b>	Óxido Nitroso.
<b>FV:</b>	Flota Vehicular.
<b>CO2:</b>	Dióxido de Carbono
<b>NH3:</b>	Amoníaco.
<b>SO2:</b>	Dióxido de Azufre
<b>NOx:</b>	Óxidos de Nitrógeno.
<b>COV:</b>	Compuestos Orgánicos Volátiles.
<b>PM2,5:</b>	Material Particulado 2,5.
<b>PM10:</b>	Material Particulado 10.
<b>TV:</b>	Tráfico Vehicular.
<b>IVE:</b>	Modelo internacional de emisiones.
<b>FE:</b>	Factor de emisión.
<b>KRV:</b>	Recorrido promedio anual.
<b>ICA:</b>	Instituto Clean Air
<b>IPCC:</b>	Panel intergubernamental de Cambio Climático.
<b>GICA:</b>	Grupo de Investigación de Calidad del Aire.
<b>NCAA:</b>	Norma de Calidad del Aire y del Ambiente.
<b>COVNM</b>	Compuestos Orgánicos Volátiles No Metánicos.

<b>EPA</b>	Agencia de protección ambiental de EEUU.
<b>HPMS</b>	Highway Performance Monitoring System.
<b>GICA</b>	El Grupo de Investigación Calidad del Aire.

Urgiles Clavijo Juan Sebastián

Ing. Mateo Coello

Julio, 2016

## **PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL INVENTARIO DE EMISIONES DE FUENTES MÓVILES TERRESTRES EN LA CIUDAD DE CUENCA.**

### **INTRODUCCIÓN**

El crecimiento demográfico y la demanda de transporte han generado el incremento del número de vehículos, esto conlleva a un mayor consumo de combustibles fósiles y por lo tanto mayor cantidad de varios tipos de contaminantes: gases tóxicos, de calentamiento global y material particulado, estas cantidades pueden ser estimadas a partir de los inventarios de emisiones (EMOV EP, 2014). Para analizar la carga, en cantidad y tipo de contaminantes, atribuida a la actividad vehicular en un área específica se utilizan modelos de emisiones, que son herramientas útiles para predecir los contaminantes provocados por fuentes móviles terrestres que circulan en una región (Clean Air, 2013). El modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE por sus siglas en inglés), financiado por la Agencia de Protección del Medioambiente de los Estados Unidos (EPA), oficina de Asuntos Internacionales, esta específicamente diseñado para tener la flexibilidad que necesitan las naciones en vías de desarrollo en su esfuerzo de reducir las emisiones de fuentes móviles (EPA, 2008). El modelo IVE es una herramienta que tiene por objetivo apoyar ciudades y regiones en el desarrollo de inventarios de emisiones para enfocarse en las estrategias más efectivas de control y planeación de transporte, asimismo predecir como diferentes decisiones afectarían las emisiones locales, y medir el progreso en la reducción de las mismas en el tiempo.

Esta investigación busca brindar un documento que sea útil, para incentivar el desarrollo de las capacidades para la elaboración de inventarios de emisiones por fuentes móviles terrestres. Para ello se analizan distintos estudios a nivel mundial, en los que se proponen

diferentes métodos para obtener los datos que alimentan al modelo internacional de emisiones vehiculares IVE, a partir de dichos estudios se plantearán las formas de recopilación de la información referente a la composición de la flota vehicular y su nivel de actividad, en la ciudad de interés, estos parámetros constituyen la base para ofrecer una aproximación real respecto a la corrección de factores de emisión para su aplicación en un inventario de emisiones por fuentes vehiculares.

## **1. Capítulo I: GENERALIDADES**

En éste capítulo se incluyen: los antecedentes, problemática, marco teórico, alcance y objetivos que se buscan cumplir a través de ésta investigación, la que permitirá obtener una base de datos confiable acerca de la cantidad y tipos de contaminantes producto de la actividad vehicular en una región específica.

### **1.1. Problemática**

En la mayoría de los países, particularmente en los subdesarrollados, las emisiones de los vehículos motorizados no han sido analizadas en profundidad. Por lo tanto, en muchos casos, la capacidad de estimar las emisiones futuras es escasa o no existe. Esto ha limitado a quienes toman las decisiones respecto a estrategias de control efectivas (EPA, 2008). En la ciudad de Cuenca, hasta ahora, no se ha ejecutado el levantamiento de un inventario de emisiones de fuentes móviles terrestres, que considere las características relevantes que corresponden al arreglo específico de la ciudad como son: topografía, tipo de vías, combustibles utilizados, parque automotor, intensidades de tráfico, etc. Por lo antes descrito, es importante proponer una metodología que permita disponer de una base de datos, con la que se pueda obtener información actual y confiable, y que facilite asimismo, la actualización periódica de la cantidad de emisiones vehiculares provenientes del parque automotor propio de una ciudad.

### **1.2. Marco teórico.**

#### **1.2.1. Contaminantes.**

La Norma de calidad del aire ambiente, dentro del compendio de definiciones, conceptualiza como contaminante criterio del aire al grupo de emisiones para las cuales se ha especificado un valor máximo de concentración permitida a nivel de suelo en el aire ambiente, y por lo tanto afecta a los receptores ya sean personas, animales, vegetación o materiales para diferentes periodos de tiempo (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2011). La misma norma establece como contaminante criterio del aire ambiente a los siguientes:

- Partículas sedimentables.
- Material particulado de diámetro aerodinámico menor a 10 micrones (MP<sub>10</sub>).
- Material particulado de diámetro aerodinámico menor a 2,5 micrones (MP<sub>2,5</sub>).
- Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).
- Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).
- Monóxido de carbono (CO).
- Ozono (O<sub>3</sub>).

La emisión de contaminantes atmosféricos criterio, puede dar origen a una polución atmosférica, que razonablemente, puede presumirse peligrosa para la salud y bienestar públicos, cuya presencia en el aire ambiental provenga de distintas fuentes móviles y estacionarias en concentraciones superiores a las máximas permitidas (Anderson, 1990). Las magnitudes de concentración de contaminantes se muestran en la Norma de calidad del aire ambiente elaborada por el Ministerio del Ambiente.

#### **1.2.2. Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos.**

Consiste en determinar las cantidades de contaminantes que se incorporan al aire, siendo éstos provenientes de todo tipo de fuente en un período dado de tiempo y en un área determinada (Jaya & Vásquez, 2012). Existen métodos directos e indirectos para estimar emisiones de fuentes móviles terrestres.

#### **1.2.3. Los métodos directos.**

Generalmente representan las emisiones de un vehículo en condiciones reales de operación. Sin embargo, el costo asociado al equipo requerido para las pruebas es alto y en ocasiones resulta poco viable para los países que no cuentan con los recursos financieros suficientes para realizar estas pruebas. Los métodos directos más populares son los siguientes: medición a bordo, pruebas en dinamómetro y sensor remoto (Clean Air, 2013).

#### **1.2.4. Los métodos indirectos.**

Sirven para el cálculo de factores de emisión, éstos se basan en modelos internacionales que utilizan información de los métodos directos, ajustados a las condiciones teóricas de

cada modelo. Los modelos más comúnmente utilizados son los siguientes: MOBILE 6, *Motor Vehicle Emission Simulator* (MOVES), *International Vehicle Emissions Model* (IVE) y *Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport* (COPERT), (Clean Air, 2013).

Las metodologías de estimación directa realizan análisis en la fuente, mientras que las metodologías indirectas emplean la correlación entre las emisiones y varios parámetros que las afectan, uno de ellos es la clasificación de la flota vehicular que circula en la zona de estudio y que será empleada como variable sustancial en la corrección de los factores de emisión.

#### **1.2.5. Factor de emisión.**

Es una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y una unidad de actividad o proceso (consumo de energía, unidades de producción, etc.). Generalmente los factores de emisión se clasifican en dos tipos los basados en procesos y los basados en censos; los primeros cubren la necesidad de realizar el muestreo en la fuente puntual de emisión al no ser económicamente factible o necesario, para ello se utilizan fuentes representativas que sirven para desarrollar factores de emisión basados en procesos y se expresan como masa de contaminante emitido por unidad de proceso. Los basados en censos son eficientes cuando las fuentes emisoras son dispersas y difíciles de caracterizar conociendo tasas de procesos, por lo cual estos factores de emisión se basan en la población de una cierta área pudiendo ser: factor de emisión per cápita y factor de emisión por empleado (Torres L., 2008).

#### **1.2.6. Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE).**

Este software fue diseñado para estimar las emisiones de vehículos motorizados y tiene como principal propósito el ser usado en países en vías de desarrollo. El modelo predice contaminantes atmosféricos locales, gases responsables del efecto invernadero y tóxicos. El desarrollo del modelo correspondió a un esfuerzo conjunto del Centro para la Investigación y Tecnología Ambiental (CE-CERT) de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de California en Riverside (UCR), Investigación de Sistemas Sustentables Globales (GSSR) y el Centro de Investigación de Sistemas Sustentables Internacionales

(ISSRC). El financiamiento fue provisto por la Agencia de Protección del Medioambiente de Estados Unidos, (EPA, 2008).

El modelo básicamente utiliza tres variables necesarias para desarrollar un inventario de emisiones de fuentes móviles ajustados a una localidad específica son: 1) factores de emisión, 2) actividad vehicular y 3) distribución de la flota vehicular. El modelo IVE está diseñado para usar información existente y/o datos que pueden ser recolectados fácilmente para cuantificar estos tres componentes. Una vez que esta información sea recolectada, es posible obtener un inventario de emisiones de fuentes móviles confiable, puesto que, existen más de 10 ciudades subdesarrolladas alrededor del mundo, en las cuales, el modelo internacional de emisiones ha proporcionado datos sobre las emisiones vehiculares en cada sitio considerando sus particularidades.

### **1.3. Estado del Arte.**

En Cuenca desde hace varios años se han venido desarrollando estudios de estimación de emisiones contaminantes por distintas fuentes, los mismos demuestran que el tráfico vehicular es la principal fuente de contaminación atmosférica, incluyendo contaminantes criterio, de efecto invernadero y material particulado. En el año 2007 se efectuó el primer estudio, mismo que fue actualizado en 2009 y teniendo como último año base de estimación el 2011 (EMOV EP, 2014). En todos los casos, se emplearon modelos internacionales de estimación de emisiones para fuentes móviles terrestres, los cuales, fueron aplicados para lograr establecer una base de datos, que hasta ahora, ofrecen un panorama claro que permiten distinguir las principales fuentes de emisión por categoría vehicular y la cantidad anual de carga contaminante.

#### **1.3.1. Metodologías utilizadas en varios países de América.**

##### **I. Metodología utilizada en EEUU.**

#### **Descripción de la metodología utilizada.**

La metodología está basada en el modelo “MOBILE6” desarrollado por la EPA para determinar factores de emisión. MOBILE es un programa para calcular factores de emisión promedio, los cuales entonces son multiplicados por una estimación de los

kilómetros viajados por vehículo (KRV) para estimar el inventario total de emisiones de los vehículos en circulación (Clean Air., 2013).

#### **Ventajas de la metodología utilizada.**

- Los factores de emisión dados por el modelo MOBILE6 son calculados con base en un ciclo urbano que considera velocidad, humedad, temperatura, longitud de vía, etc.
- Utilizando un programa de conteo, con asignación de estudiantes, se puede generar un inventario de buena calidad a muy bajo costo.
- Los KVR fueron determinados mediante la observación directa, estos datos fueron proporcionados por la Agencia Federal de Administración de Carreteras (HPMS) ya que incluye todos los caminos públicos en todas las regiones del país.
- El modelo utiliza factores de corrección menor como: uso de aire acondicionado, peso adicional del vehículo, etc.

#### **Desventajas de la metodología utilizada.**

- La complejidad reside en determinar la proporción de aquella base de vehículos que corresponden al área de análisis, ya que el estudio indica que existen errores en los registros de tenencia vehicular estatales.
- La adaptación del modelo en ciudades con tecnológicas vehiculares distintas, genera complejidad en su aplicación, por lo tanto, la obtención de resultados sesgados.

## **II. Metodología usada en México.**

#### **Descripción de la metodología.**

La secretaría del medio ambiente del Gobierno de México elaboró un Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (Gobierno de México, 2007). La mayoría de las metodologías utilizadas por este grupo de trabajo hacen uso de los modelos de emisión desarrollados por el EPA y específicamente para la estimación de emisiones de vehículos, este inventario utiliza el modelo MOBILE6.

#### **Ventajas de la metodología utilizada.**

- La principal ventaja en los modelos utilizados por este inventario radica en que se utilizan manuales del Programa de Inventario de Emisiones para México (Secretaría de Ambiente de México, 2007).
- Las emisiones vehiculares de PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COV y NH<sub>3</sub> se calcularon con base en los datos de actividad y factores de emisión generados por el modelo MOBILE6-México.
- Los datos de actividad para vehículos automotores fueron entregados por la Dirección General de Seguridad Pública y Tránsito de ese país.

#### **Desventaja de la metodología utilizada.**

- La principal desventaja de la metodología utilizada, radica en la utilización de factores de emisión diseñados para realidades topográficas y económicas bastante distintas a las mexicanas, además, en el estudio no se realiza la corrección de dichos resultados, con el objeto, de disminuir el margen de error o el grado de incertidumbre en la estimación de emisiones para la región del Valle de Toluca.

### **III. Metodología usada en Chile.**

#### **Descripción de la metodología.**

El estudio: “Actualización del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana”, correspondiente al año 2010, fue desarrollado por DICTUC S.A. para CONAMA RM., el mismo tuvo como objetivo actualizar el inventario de emisiones atmosféricas de MP<sub>10</sub>, MP<sub>2.5</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> para una base temporal correspondiente al año 2005, y la revisión y adecuación de las metodologías empleadas para la estimación de las emisiones actualmente disponibles, para así desarrollar un inventario 2010 proyectado a partir de los resultados obtenidos en 2005, que considere las medidas actualmente definidas, así como el crecimiento normal de las actividades en la Región Metropolitana de Santiago de Chile (Escobar, 2007).

**Ventajas de la metodología utilizada.**

- Variaciones de las composiciones tecnológicas del parque circulante proyectado al 2010 de toda la flota vehicular.
- Comportamiento del flujo vehicular en la red vial, con datos provenientes de las simulaciones del modelo de transporte ESTRAUS.
- Se consideran nuevos factores de emisión asociados a evoluciones tecnológicas.
- Se corrigieron los factores de emisión con deterioro según el recambio de convertidores catalíticos que se produciría al entrar en vigencia la nueva normativa de emisiones de NOx.
- Se corrigieron los factores de emisión con deterioro según el estudio de 2005, para ponderar los resultados a 2010.

**IV. Metodología utilizada en Colombia.****Descripción de la metodología empleada en Bogotá.**

El Grupo de Investigación Calidad del Aire (GICA), adscrito al Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de La Universidad Nacional de Colombia, desarrolló un inventario de emisiones de CO<sub>2</sub> emitido por la flota vehicular del área urbana de Bogotá, utilizando las guías ofrecidas por el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático, por sus siglas en inglés) (Hernández Gonzáles & Jiménez, 2009).

Una tesis sobre la estimación de emisiones por fuentes vehiculares emplea el modelo americano IVE, de este estudio se destaca asimismo la utilización de información proporcionada por el ente que rige la matriculación vehicular en esa ciudad, es decir el número de vehículos matriculados hasta la fecha de realización de dicho estudio y que son diferenciados en número por cada categoría, de esta forma se logró caracterizar el parque automotor en cifras de una base de datos estática, es importante mencionar que estos valores constituyen variables relevantes si se pretende estimar factores de emisión más ajustados a la realidad (Giraldo, 2005).

La campaña de medición desarrollada en Bogotá en 2005, incluye también actividades que permiten identificar la distribución tecnológica de vehículos de pasajeros, determinar

la distribución relativa en la ciudad de las categorías vehiculares que constituyen el parque automotor y obtener información sobre costumbres de manejo de conductores en sectores específicos de la ciudad (Giraldo, 2005). Otra variable que demanda atención comprende la magnitud de actividad vehicular, esta información en el estudio realizado en Bogotá fue obtenida de manera estadística al procesar datos provenientes de encuestas realizadas en parqueaderos de vehículos en varias zonas de la ciudad.

En otro estudio realizado en el Valle de Aburrá en Antioquia sobre la demanda energética y emisiones vehiculares comprendida entre el año 2000 y 2010, el valor de kilometraje anual recorrido por cada categoría vehicular en esa ciudad, fue estimado mediante hipótesis específicas sobre ventas de vehículos usados. Del mismo modo, el factor de emisión fue ajustado empleando el modelo de emisiones IVE para lo cual se desarrolló además un calendario de introducción de tecnologías vehiculares (sistemas de alimentación y control de emisiones); los factores de emisión fueron corregidos teniendo en consideración condiciones de humedad, altura y contenido de azufre en combustibles propios del Valle de Aburrá (Toro Gómez, 2015).

#### **Ventajas de la metodología utilizada.**

- El análisis está enfocado en la estimación de CO<sub>2</sub> por ser el gas de efecto invernadero más relevante por su larga vida, según el GICA.
- Dedicar toda la tecnología al estudio de un único contaminante, lo que significa concentración de recursos y mejores resultados.
- Contar con un sistema avanzado para el monitoreo de ventas totales de combustible líquido (gasolina corriente, gasolina extra y diésel) y gas natural vehicular (GNV) a través de estaciones de servicio.
- Contar con datos estadísticos sólidos sobre la cantidad de combustible consumido ya que permiten calcular con gran exactitud las emisiones totales de CO<sub>2</sub>.

#### **Desventajas de la metodología utilizada.**

- Utilización de factores de emisión que no correspondían a las categorías vehiculares para las cuales no existía información.

- Incertidumbre en la estimación de la flota vehicular circulante, ya que en el estudio se la caracteriza con base en los registros de tenencia e inspección vehicular.

#### **1.4. Pregunta de Investigación.**

¿Cuál es la metodología más apropiada para obtener la información requerida por el modelo IVE que permitirá desarrollar el inventario de emisiones vehiculares en la ciudad de Cuenca?

#### **1.5. Objetivo General.**

Establecer, a través de una revisión bibliográfica, una propuesta metodológica para la obtención de un inventario de emisiones de fuentes móviles terrestres de la ciudad de Cuenca, usando una metodología indirecta de estimación.

#### **1.6. Objetivos Específicos.**

- Analizar las ventajas y desventajas de las metodologías utilizadas, así como, la literatura referente a la obtención de los inventarios de emisiones de fuentes móviles en la ciudad de Cuenca.
- Definir la metodología para caracterizar la flota vehicular de Cuenca, a través del análisis de las técnicas utilizadas en otras ciudades.
- Determinar la metodología que permita estimar el recorrido promedio anual de los vehículos que circulan en Cuenca, mediante el análisis de metodologías utilizadas en otras ciudades.
- Establecer la metodología para determinar los factores de emisión de fuentes móviles ajustados a la ciudad de Cuenca empleando el modelo IVE.
- Proponer una secuencia metodológica para la obtención del inventario de emisiones de fuentes móviles terrestres en Cuenca.

### **1.7. Alcance.**

El alcance de este proyecto es de carácter descriptivo, iniciará con el análisis de información relacionada con la gestión de la calidad de aire de Cuenca, luego, a través de la revisión de la literatura referente a metodologías utilizadas para obtener inventarios de emisiones de fuentes móviles en ciudades homólogas, plantear un modelo pertinente para la ciudad.

El estudio pretende establecer el procedimiento que se ha de seguir para la elaboración del inventario emisiones de fuentes móviles terrestres en la ciudad de Cuenca, facilitando su actualización año tras año, este procedimiento quedará sentado en forma de un manual metodológico.

## **2. Capítulo II: Análisis de ventajas y desventajas de metodologías empleadas en inventarios de emisiones de Cuenca.**

En este capítulo en primera instancia se definirá que es un inventario de emisiones, se identificarán sus componentes y se destacará su utilidad, también se describirá el trabajo realizado por organismos afines a calidad del aire en EEUU y Europa.

También se estudiará el modelo empleado para estimar la carga contaminante emitida por la flota vehicular de la ciudad de Cuenca y se mostrarán los resultados obtenidos del inventario de emisiones vehiculares, para luego establecer las ventajas y desventajas de la utilización de dicho modelo en el inventario de emisiones atmosféricas realizado en 2014. Finalmente se analizará brevemente la calidad del aire en Cuenca, con base en los datos ofrecidos por los estudios de años anteriores.

### **2.1. Inventarios de emisiones.**

#### **2.1.1. Definición de inventario de emisiones de fuentes móviles.**

Un inventario de emisiones de fuentes móviles terrestres, consiste en aproximar la cantidad de emisiones que se incorporan al aire provocada por la actividad vehicular, en un periodo dado y en un área determinada (Sbarato, 2009). De entre los principales componentes necesarios para estructurar inventarios de emisiones por fuentes móviles se destacan los siguientes:

- Datos específicos del área.
- Modelo de emisiones.
- Nivel de actividad.
- Factor de emisión.
- Método de aseguramiento de la calidad (International Radian., 1997).

Los inventarios de emisiones de fuentes vehiculares son útiles para calcular la cantidad de contaminantes provocados por el uso de combustibles fósiles, esta información puede ser utilizada para impulsar el empleo de energías y tecnologías alternativas en el ámbito del transporte, además de constituir un instrumento para la gestión de la calidad del aire son

insumos para la aplicación de herramientas más complejas como la modelación atmosférica (EMOV EP, 2014).

## **2.2. Antecedentes de procesos y metodologías desarrollados para la elaboración de inventarios de emisiones.**

### **2.2.1. Antecedentes de la EPA.**

El diseño e implementación de métodos para estimar la emisión de contaminantes y elaborar un inventario de emisiones se remonta al año 1940. Para ese entonces la Agencia para la Protección Ambiental de Estados Unidos (*US Environmental Protection Agency - EPA*) realizó estimaciones basadas en metodologías *Top-down* (de arriba hacia abajo) que empleaba estadísticas nacionales relativas a la actividad económica y el flujo de materiales, entre otros (EPA, 2008). Luego de revisar y actualizar estas metodologías, la agencia decidió incorporar inventarios *Bottom-up* (de abajo hacia arriba), tomando como base las emisiones a escala local (planta de producción, estado o condado) que resultaron ser mucho más útiles para obtener datos más específicos. De esta manera, la agencia presenta su primer reporte titulado *National Air Pollutant Emission Trends, 1900-1996* (Tendencia Nacional de Emisiones de Contaminantes del Aire entre 1900-1996) implementando las metodologías diseñadas. Luego, cada año, la EPA produce un Inventario Nacional de Emisiones, mejorando en cada entrega sus métodos.

Desde 1900 hasta 1939, el inventario de la EPA solo estimó las emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y COV (EPA, 2008). Durante el período de 1940 a 1984, las estimaciones se realizaron para todos los contaminantes criterios enlistados anteriormente. Las técnicas utilizadas durante esos años fueron mejoradas y superadas. Respecto a las emisiones de vehículos automotores, las mismas forman parte de una categoría especial entre las principales fuentes de emisión de contaminantes reconocidas por la EPA. Específicamente, la EPA etiqueta esta fuente con el código de categoría número 11, denominada On-Road Vehicles (vehículos de carretera) que incluye aquellos vehículos que operan normalmente en las carreteras y autopistas públicas: vehículos particulares, motocicletas, minivans, vehículos utilitarios deportivos, camiones de carga ligera y pesada, y autobuses.

Para calcular estas emisiones la EPA desarrolló un modelo denominado MOBILE, en sus versiones 5a y 5b. La EPA utilizó su modelo MOBILE5a desde el año 1970 hasta 1994, y

su modelo MOBILE5b desde el año 1995 hasta 1999, para calcular mensualmente factores de emisión de COV, NOx y CO, para cada tipo de vehículo en cada estado de la nación. MOBILE, que ya cuenta con la versión 6.1 y 6.2, es un programa en lenguaje Fortran, aplicado a la estimación de emisiones presentes y futuras, provenientes de automotores (EPA, 2008).

Además del anterior, a partir de 1994, la EPA utilizó el modelo PART5, un programa similar al MOBILE, para calcular factores de emisión PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y SO<sub>2</sub>, los cuáles no varían mensualmente. Las millas recorridas por vehículo (*Vehicle Miles Traveled - VMT*) es otro factor de importancia para la cual la EPA ha desarrollado sus propios métodos, siendo considerado el factor activo para la estimación de las emisiones provenientes de vehículos automotores. Los métodos utilizados preferidos son:

- Observación directa: conteo del tráfico en ruta sobre una muestra de puntos en caminos con una extensión estadística, para así representar el universo vial en un área.
- Modelos de tránsito sobre una red de caminos, la EPA no recomienda utilizar datos de uso de combustibles o lecturas de odómetros.

Para analizar el VMT la EPA se basó hasta 1979, en datos estadísticos de las direcciones de cada estado encargados de monitorear la actividad de los vehículos en carreteras y autopistas. A partir de 1980 y hasta 1995, este factor provino de un avanzado sistema de monitoreo denominado HPMS (*Highway Performance Monitoring System*), un archivo que contiene resúmenes de millas recorridas en viajes diarios por cada tipo de vehículo a escala nacional, rural y urbana. Básicamente es el resultado de multiplicar el promedio anual de tráfico diario (AADT, por sus siglas en inglés) por la longitud de la carretera analizada.

### **2.2.2. Antecedentes de inventarios de emisiones en Europa.**

El esfuerzo realizado por la Agencia Europea del Medio Ambiente (*European Environment Agency, EEA*), que a través de un software denominado COPERT III (Ntziachristos, 2000), incorpora una metodología diseñada por el comité de trabajo CORINAIR (*CO-ordination d'INformation on emissions into the AIR relevant to acid deposition*) para estimar las emisiones de contaminantes provenientes del transporte de

carretera (EEA, 2007). COPERT III también cubre la estimación de las emisiones de CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COV, además de CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. La más reciente versión de este sistema, el COPERT IV 10.0, ya fue entregada por la EEA en noviembre del 2012.

Los inventarios de emisiones vehiculares europeos, desarrollados siguiendo la metodología CORINAIR, contienen las emisiones anuales de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COVNM (Compuestos Orgánicos Volátiles No Metánicos), CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y NH<sub>3</sub> producidas por actividades humanas y procesos naturales. El modelo utilizado para estimar emisiones de fuentes vehiculares utilizado en países europeos propone analizar las emisiones generadas en las siguientes condiciones:

- Emisiones en caliente.
- Emisiones en frío.
- Emisiones evaporativas.

En cada condición se requiere conocer datos sobre la distribución de la flota vehicular, actividad vehicular, consumo y calidad de combustibles, número de vehículos y factor de emisión, para aplicar el modelo (Ntziachristos Z., 2000).

En la actualidad existen algunas guías nacionales e internacionales para la preparación de inventarios de emisiones: la metodología CORINAIR (Bouscaren, 1992), USEPA (1977, 1979, 1980, 1995), las guías IPCC para los Inventarios Nacionales de Gases con Efecto Invernadero (IPCC, 1995) o el “EMEP/CORINAIR *Emission Inventory Guidebook - 2005*” etc. El “Emission Inventory Improvement Program” (EIIP) representa, por otra parte, un esfuerzo cooperativo que incluye a la EPA, estados y agencias locales, y pretende desarrollar grupos de “metodologías preferidas” para todas las tareas asociadas a los inventarios de emisiones. Estas guías surgen con el ánimo de desarrollar inventarios de emisiones comparables.

### **2.2.3. Antecedentes locales.**

La ciudad de Cuenca cuenta con una red de monitoreo de la calidad del aire desde el año 2008, la cual en un principio formaba parte de la Corporación para el mejoramiento del aire (Cuencaire) y que luego fue transferida a la Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte (EMOV-EP) en el año 2010 (EMOV EP, 2014). Esta empresa tiene bajo su responsabilidad la fiscalización del proceso de Revisión Técnica Vehicular (RTV)

y la elaboración de informes relacionados a la actualización del inventario de emisiones atmosféricas del cantón Cuenca y calidad del aire. Dicho inventario cuenta con dos ediciones. Una del año 2007 promovida por Cuencaire y la Fundación Natura y otra del año 2009 dirigida por la red de monitoreo antes mencionada, la misma que para el año 2014 actualizó los datos tomando como año base el 2011.

### **2.3. Metodología utilizada en el inventario de emisiones de Cuenca 2014.**

A continuación se destaca la estructura técnica del modelo utilizado para estimar la carga anual de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero contenido en el inventario de emisiones desarrollado por EMOV EP, 2014. Se expondrán rápidamente los resultados obtenidos usando dicha metodología, luego se destacaran las ventajas y desventajas del uso de la misma y finalmente se analizarán datos de calidad del aire en Cuenca.

#### **2.3.1. Características técnicas del modelo usado para estimar la cantidad de contaminantes criterio por fuentes vehiculares.**

En el Inventario de Emisiones 2014 de Cuenca no se considera la misma tipología de emisión de contaminantes que la definida por el ICA. En dicho inventario se consideran las emisiones generadas en las condiciones siguientes: emisiones en caliente (temperatura del refrigerante del motor superior a 70 °C), emisiones en frío (temperatura del refrigerante del motor inferior a 70 °C), evaporativas (emisiones de COV que proceden de la evaporación de combustible desde otros dispositivos diferentes del tubo de escape).

La metodología sigue la pauta de COPERT III, sistema que hace hincapié en la distinción entre dos fases en las cuales las emisiones generadas por el vehículo son sustancialmente distintas, señalando que las emisiones en frío (*warming-up period* o período de calentamiento) muchas veces generan contaminantes mucho más concentrados que las emisiones en caliente (*hot operation* u operación a temperatura estable). Sin embargo, al igual que el ICA, COPERT III resalta la necesidad de estimar las emisiones evaporativas, provenientes de la gasolina durante el día, lo que resulta en emisiones de hidrocarburos no metánicos. De esta manera, COPERT III propone calcular el total de emisiones como se puede apreciar en la Ecuación 2.1:

Ecuación 2.1. Cálculo de emisiones totales para fuentes móviles terrestres.

$$\mathcal{E}_{total} = \mathcal{E}_{hot} + \mathcal{E}_{cold} + \mathcal{E}_{evap}$$

- $\mathcal{E}_{total}$ : totalidad de emisiones de cualquier contaminante reconocido
- $\mathcal{E}_{hot}$ : emisión durante la fase estable de operación del motor
- $\mathcal{E}_{cold}$ : emisión durante la fase transitoria de operación del motor
- $\mathcal{E}_{evap}$ : emisión producto de la evaporación de gasolina

La emisión ( $\mathcal{E}$ ) de los contaminantes criterio (CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COV, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>), de acuerdo al ICA, puede calcularse de manera aproximada mediante la siguiente Ecuación 2.2:

Ecuación 2.2. Cálculo de contaminante criterio producido por fuentes móviles terrestres.

$$\mathcal{E} = \sum \mathcal{FV}_i * \mathcal{KRV}_i * \mathcal{FE}_i$$

Dónde:

- $\mathcal{E}$ : emisión del contaminante (Unidad de masa/unidad de tiempo)
- $\mathcal{FV}_i$ : flota vehicular por tipo de vehículo  $i$  (Número de vehículo)
- $\mathcal{KRV}_i$ : distancia recorrida por tipo de vehículo  $i$  en un período determinado (Unidad de distancia/unidad de tiempo)
- $\mathcal{FE}_i$ : factor de emisión para el tipo de vehículo  $i$  (Unidad de masa/unidad de distancia)

Para la estimación de los mismos contaminantes, COPERT III propone dos opciones, relativas al caso en que el motor está en estado estable (*hot emissions*) o al caso en que el motor está en estado transitorio (*cold emissions*), y una ecuación específica para calcular las emisiones de SO<sub>2</sub>, como se puede apreciar en la Ecuación 2.3:

Ecuación 2.3. Cálculo de emisiones en caliente producidas fuentes móviles terrestres.

$$\mathcal{E}_{hot_{i,j,k}} = \mathcal{N}_j * \mathcal{M}_{j,k} * e_{hot_{i,j,k}}$$

Dónde:

- $\mathcal{E}_{\text{hot}_{i,j,k}}$ : emisión del contaminante i del vehículo de clase j en estado estable, en carreteras de tipo k.
- $\mathcal{N}_j$ : número de vehículos de clase j en el año de referencia
- $\mathcal{M}_{j,k}$ : millas o kilómetros por vehículo de tipo j en carreteras de tipo k
- $e_{\text{hot}_{i,j,k}}$ : factor de emisión para el contaminante i para el vehículo de clase j, en carreteras de tipo k
- k: rural, urbana o autopista

Ecuación 2.4. Cálculo de emisiones en frío producidas por fuentes móviles.

$$\mathcal{E}_{\text{cold}_{i,j}} = \mathcal{B}_{i,j} * \mathcal{N}_j * \mathcal{M}_j * e_{\text{hot}_{i,j}} * ((e^{\text{cold}}/e^{\text{hot}})_{i,j} - 1)$$

Dónde:

- $\mathcal{E}_{\text{cold}_{i,j}}$ : emisión del contaminante i del vehículo de clase j en estado transitorio
- $\mathcal{B}_{i,j}$ : fracción de distancia recorrida con el motor frío
- $\left(\frac{e^{\text{cold}}}{e^{\text{hot}}}\right)_{i,j}$ : razón emisión en frío sobre caliente para el contaminante i, referido al vehículo de clase j

Ecuación 2.5. Cálculo de emisiones de SO<sub>2</sub> producidas por fuentes móviles terrestres.

$$\mathcal{E}_{\text{SO}_2}^{\text{calc}} = 2 * \mathcal{K}_{s,m} * \mathcal{FC}_{jm}^{\text{calc}}$$

Dónde:

- $\mathcal{E}_{\text{SO}_2}^{\text{calc}}$ : estimación de SO<sub>2</sub> para el vehículo de categoría j
- $\mathcal{K}_{s,m}$ : peso del sulfuro contenido en el combustible tipo m
- $\mathcal{FC}_{jm}^{\text{calc}}$ : consumo de combustible tipo m calculado para el vehículo de categoría j

Las ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4 son aplicables siempre y cuando esté disponible la información relativa a factores de emisión por tipo de vehículo y para cada uno de los

combustibles a ser evaluados. Además es necesario contar con información y estadísticas sólidas en cuanto a la flota vehicular regional y la actividad vehicular.

La EPA ha transferido las funciones del AP-42, relativas a la actualización de factores de emisión de fuentes móviles, al MOBILE6. Sin embargo, el AP-42 volumen II, titulado *Mobile Sources* (Fuentes Móviles), sigue estando disponible en la página web de la agencia, especialmente su apéndice H para analizar los factores de emisión producidos por MOBILE.

Por su parte, el Inventario de Emisiones de Cuenca hace el mismo cálculo utilizando la siguiente ecuación para los contaminantes criterio CO, NO<sub>x</sub>, COV, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>:

Ecuación 2.6. Cálculo de emisiones anuales en caliente por fuentes móviles terrestres.

$$\mathcal{E}_r^{i\text{caliente}} = (\mathcal{N}_{veh_r} * \mathcal{D}_{rec} * \mathcal{F}\mathcal{E}_r)_{i,e}/1000000$$

Dónde:

- $r$ : categoría de vehículo según el año modelo
- $i$ : contaminante (CO, NO<sub>x</sub>, COV, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>)
- $\mathcal{E}_r^{i\text{caliente}}$ : emisión en caliente del contaminante  $i$  por los vehículos  $r$  ( $t a^{-1}$ ) e/1000000 (por cada millón)
- $\mathcal{N}_{veh_r}$ : número de vehículos de la categoría  $r$  según año modelo
- $\mathcal{D}_{rec}$ : distancia media anual recorrida por los vehículos tipo  $r$  ( $km a^{-1}$ )
- $\mathcal{F}\mathcal{E}_r$ : factor de emisión del contaminante  $i$ , para el vehículo de la categoría  $r$  ( $g km^{-1}$ )

Mientras que, para las emisiones anuales de SO<sub>2</sub>, el Inventario de Cuenca utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 2.7. Cálculo de emisiones anuales de SO<sub>2</sub> por fuentes móviles terrestres.

$$\mathcal{E}_r^{SO_2} = (0.00378 * \frac{\mathcal{N}_{veh_r}}{\mathcal{C}\mathcal{C}_r} * \mathcal{D}_{en} * \mathcal{S})/100000$$

Dónde:

- $\mathcal{E}_r^{SO_2}$ : emisión de  $SO_2$  de los vehículos  $r$  ( $ta^{-1}$ )
- $\mathcal{CC}_r$ : consumo de combustible por distancia recorrida para los vehículo  $r$  (galón  $km^{-1}$ )
- $\mathcal{D}_{en}$ : densidad del combustible ( $kg\ m^{-3}$ )
- $\mathcal{S}$ : contenido de azufre del combustible (%)
- 0.00378: factor de emisión para  $SO_2$

### 2.3.2. Metodología para estimar la cantidad de gases de efecto invernadero usada en Cuenca.

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), ha propuesto los siguientes métodos para la estimación de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) generados por los vehículos automotores (IPCC, 2015), estimación que puede basarse en la tasa de emisión por unidad de consumo de combustible, o en la tasa de emisión por unidad de distancia recorrida. Con las siguientes ecuaciones se puede estimar la emisión de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso:

Ecuación 2.8. Cálculo de emisiones de efecto invernadero.

$$\mathcal{E} = \sum \mathcal{C}_j * \mathcal{FJ}_j$$

Dónde:

- $\mathcal{E}$ : Emisión del contaminante (Unidad de masa/unidad de tiempo)
- $\mathcal{C}_j$ : Consumo total del combustible  $j$  (Unidad de volumen/unidad de tiempo)
- $\mathcal{FJ}_j$ : Factor de intensidad del combustible  $j$  (Unidad de masa/unidad volumétrica)

Ecuación 2.9. Cálculo de emisiones a través del consumo de combustibles por fuentes móviles terrestres.

$$\mathcal{E} = \sum \overline{\mathcal{CV}_i} * \mathcal{KRV}_i * \mathcal{FV}_i * \mathcal{FJ}_i$$

Dónde:

- $\overline{CV}_i$ : Consumo promedio de combustible del tipo de vehículo  $i$  (Unidad de volumen/unidad de distancia)
- $KRV_i$ : Distancia recorrida por el tipo de vehículo  $i$  en un período determinado (Unidad de distancia/unidad de tiempo)
- $FV_i$ : Flota vehicular del tipo de vehículo  $i$  (Número de vehículos)
- $FJ_i$ : Factor de intensidad del vehículo  $i$  (Unidad de masa/unidad volumétrica)

El Inventario de Cuenca utiliza la siguiente ecuación para estimar la emisión de  $CO_2$ ,  $CH_4$  y  $N_2O$ :

Ecuación 2.10. Cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero usado en el inventario de Cuenca.

$$\varepsilon_r^i = \left( 0.00378 * \frac{N_{veh_r}}{CC_r} * D_{en} * PCI * FE \right)_{i,r} / 1000000000$$

Dónde:

- $PCI$ : poder calorífico inferior del combustible ( $JGg^{-1}$ )
- $D_{en}$ : densidad del combustible  $r$  en el tipo de vehículo  $i$  ( $kg\ m^{-3}$ )
- $CC_r$ : consumo de combustible  $i$  por distancia recorrida para los vehículo  $r$  ( $galón\ km^{-1}$ )
- $FE$ : factor de emisión del contaminante  $i$ , para el vehículo de la categoría  $r$  ( $gkm^{-1}$ )

Se puede observar que, el Inventario de Emisiones 2014 utiliza la metodología propuesta por el IPCC. Una vez más, las ventajas y desventajas de utilizar esta metodología radican en la disponibilidad o no, de datos estadísticos reales sobre factores de difícil estimación, como lo es sobre todo el consumo de combustible total, para un período determinado y el factor de emisión.

### 2.3.3. Resultados del inventario de emisiones vehiculares del cantón Cuenca 2014.

El inventario de emisiones 2014 prioriza, además del tráfico vehicular (vehículos a gasolina y diésel), las siguientes fuentes de emisión: vegetación, emisiones de combustión y de procesos industriales, centrales térmicas, uso de disolventes, gasolineras, uso de gas licuado de petróleo, canteras, erosión eólica, tráfico aéreo, rellenos sanitarios y ladrilleras. En la Figura 1 se pueden apreciar los resultados obtenidos en el inventario de emisiones atmosféricas de Cuenca para el tráfico vehicular:

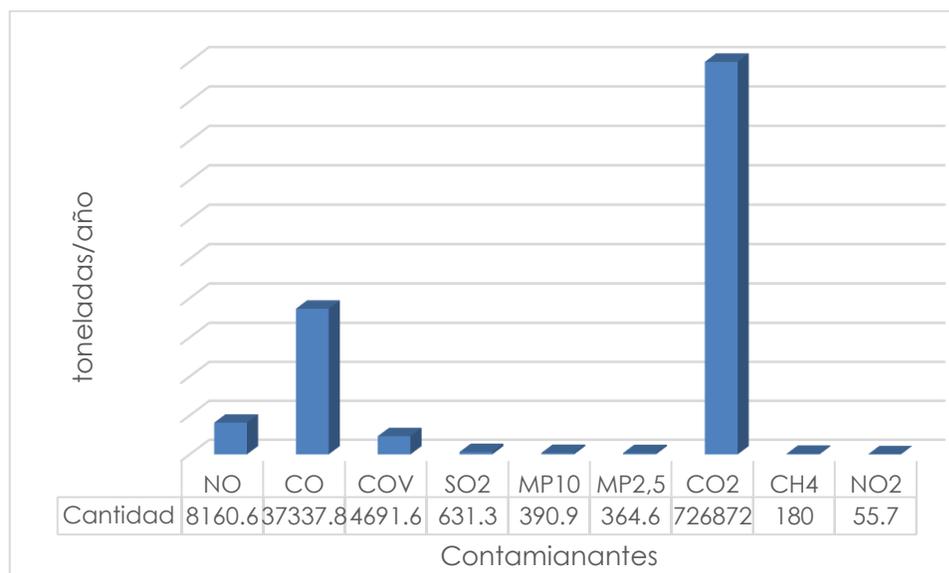


Figura 2-1: Cantidad en toneladas por año (t/a) de contaminantes criterio y de efecto invernadero estimados en el Inventario de Emisiones por Fuentes Vehiculares en Cuenca.

Fuente: (EMOV, 2014).

El informe concluye que la contribución del tráfico vehicular (TV) en la emisión de cada contaminante es:

- Monóxido de carbono (CO): 91.9%
- Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>): 76.4%
- Compuestos orgánicos volátiles (COV): 34.4%
- Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>): 30.2%
- Material particulado fino (PM<sub>10</sub>): 39.9%
- Material particulado fino (PM<sub>2,5</sub>): 42.7%

Por lo que es fácil prever que, el TV es considerado, por dicho informe, como la principal fuente contaminante; debido a que porcentualmente es superior a la participación de todas las demás fuentes, excepto en el caso del SO<sub>2</sub>, donde el máximo contribuyente es el sector industrial. En la Tabla 1 se puede apreciar el resumen de emisiones para CO<sub>2</sub> que involucra al TV entre el periodo 2007 a 2011:

Tabla 2-1: Emisiones de CO<sub>2</sub> (t a<sup>-1</sup>) de los inventarios de emisiones del Cantón Cuenca de los años 2007 y 2014.

	2007	2009	2011	2014
Tráfico vehicular	570 886.9	637 502.7	726 871.5	801 285.9
Industrias	187 947.2	187 759.8	437 972.5	374 845.9
Térmicas	49 313.2	587 79.11	50 871.3	63 578.7
GLP doméstico	144 607.4	180 662.7	166 885.9	126 578.0
Tráfico aéreo	10 562.0	794 7.917	10 328.6	6145.9
Rellenos sanitarios	10 774.7	858 2.576	10 815.7	12 292.4
Ladrilleras	23 191.7	667 04.62	66 704.6	66 704.6
Total	963 316.7	1 072 652.0	1 392 929.8	1 372 434.4
Población cantón Cuenca (habitantes)	471 072	487 901	535 624	580 706.0
Emisión per cápita (t habitante a <sup>-1</sup> )	2.04	2.20	2.60	2.40

Fuente: (EMOV EP, 2014).

#### 2.4. Análisis de ventajas y desventajas de la metodología usada en Cuenca.

La comparación entre las ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5, con las utilizadas por el Inventario Cuenca 2014 (2.6 y 2.7), junto con la lectura del informe final, muestra algunos detalles que permiten emitir ciertas conclusiones sobre ventajas y desventajas en la metodología utilizada por el Inventario de Emisiones Atmosféricas del Cantón Cuenca 2014 en lo referente al tráfico vehicular.

Ventajas:

- Las ecuaciones que utiliza el Inventario 2014 para la estimación de la emisión de los contaminantes CO, NO<sub>x</sub>, COV, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> manejan las mismas variables que las ecuaciones de los métodos más actualizados propuestos por las agencias de protección del ambiente tanto de Europa como de Estados Unidos. Estas variables son la flota vehicular o número de vehículos por categoría según año y

modelo, distancia media anual recorrida por cada tipo de vehículo, y el factor de emisión de cada contaminante según la categoría del vehículo.

- El Inventario 2014 usa una ecuación específica y separada, para la estimación de la emisión del contaminante  $\text{SO}_2$  debido a que dicha estimación depende, del consumo de combustible.
- Para la estimación de emisiones, el inventario cuenta con las estaciones de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire, que aparte de representar el uso de tecnología de vanguardia, siguen las recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA).
- La mayoría de las estimaciones se calculan a escala rural, lo que representa una gran ventaja metodológica.
- La representatividad de los registros se relaciona directamente con su cobertura temporal. Dicha cobertura temporal mejora continuamente con la introducción de nuevas tecnologías como por ejemplo la suma a la red de una nueva estación automática de calidad del aire.
- Incluye el análisis de emisiones por la categoría que corresponde a los vehículos híbridos.
- Se realiza el análisis de la incertidumbre utilizando datos sobre calidad del aire.

#### Desventajas:

- El Inventario 2014 estima emisiones en caliente, no estima las emisiones en frío. Las emisiones en caliente dependen de una variedad de factores de emisión que a su vez dependen de la distancia que cada vehículo recorre, su velocidad, su edad, el tamaño del motor y el peso. Estos parámetros no parecen ser tomados en cuenta en el Inventario Cuenca 2014 con la suficiente formalidad. Los factores de emisión utilizados en dicho inventario podrían por tanto tener un alto grado de incertidumbre.
- Las ecuaciones utilizadas por el Inventario 2014 no toman en cuenta el tipo de carretera, lo que influye en la velocidad del vehículo y por ende, en el factor de emisión utilizado en dicha estimación.

- Las ecuaciones utilizadas por el Inventario 2014 no toman en cuenta la altura de la región con respecto al nivel del mar, entre otros factores topográficos y climáticos que afectan la pertinencia de los factores de emisión utilizados en las estimaciones del mencionado inventario.
- En la proyección de emisiones se han asumido características tecnológicas de los vehículos que están cambiando continuamente. Dichos cambios pueden influenciar significativamente los factores de emisión utilizados en la metodología de interés.
- El rol de la legislación vigente en el Ecuador en cuanto a la introducción de nuevas tecnologías para reducir las emisiones de contaminantes de vehículos automotores, no se toma en cuenta para las proyecciones y estimaciones hechas por Inventario 2014.
- Las estimaciones hechas por el Inventario 2014 están basadas en proyecciones de tráfico de vehículo automotor enfocadas en grandes ciudades. Esto limita un poco la validez de dichas estimaciones para las zonas rurales.

## **2.5. Situación actual de la calidad del aire en Cuenca.**

### **2.6.1. Gestión local de la calidad del aire.**

La Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte (EMOV-EP) presentó el Informe de Calidad Aire Cuenca 2014, su más reciente estudio sobre la calidad del aire en la región (EMOV EP, 2014). Para ello, hace uso de 20 estaciones manuales y una automática que conforman la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire. Tal informe describe, en primer lugar, los efectos nocivos para la salud de los contaminantes criterios (CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COV, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) y del ozono troposférico (O<sub>3</sub>), para luego pasar a describir los componentes de la Red de Monitoreo. Al respecto señala que dicha red cuenta con una estación automática localizada en la estación MUN que puede ser localizada en la Figura 2, encargada de registrar en tiempo real las concentraciones de CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub>:

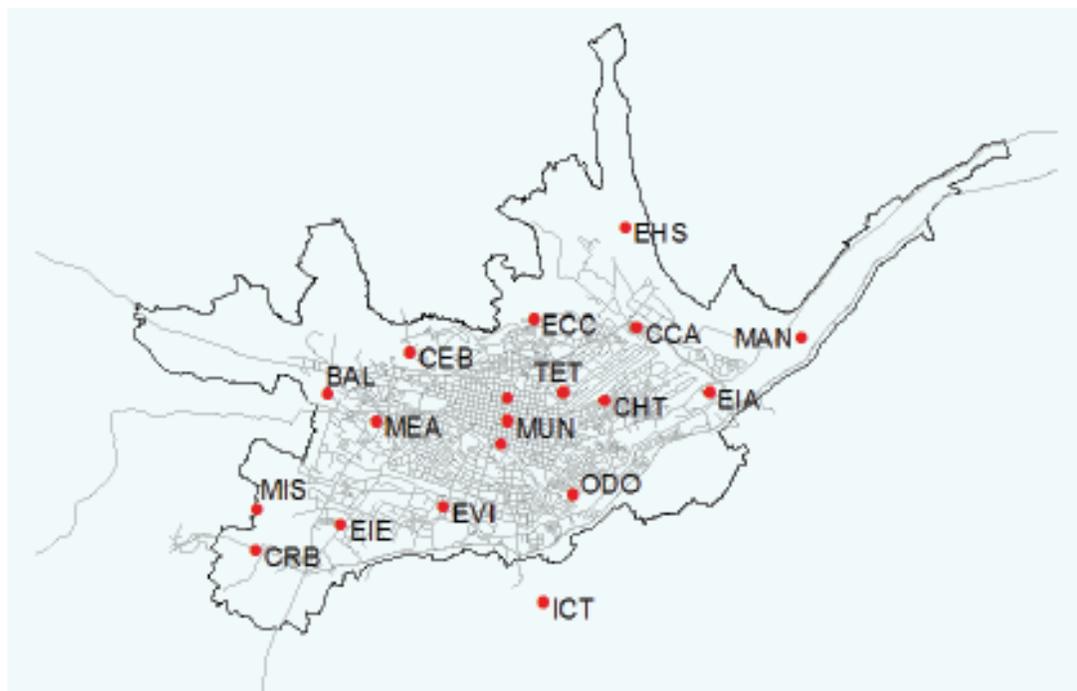


Figura 2-2: Mapa de la Ciudad de Cuenca. Localización de las estaciones de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Cuenca Año 2014.

Fuente: (EMOV, 2014)

También cuenta con una subred pasiva en las 20 estaciones para el muestreo de contaminantes gaseosos que miden la concentración de  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ , mediante la técnica basada en el principio de difusión de los gases originada en un gradiente de concentración. Una subred de depósito de Partículas Sedimentables (PS) con 17 puntos de medición cuyas concentraciones se determinan mediante el análisis gravimétrico. Y una subred activa que cuenta con equipos para la obtención de muestras durante 24 horas consecutivas de material particulado  $\text{PM}_{10}$ .

### 2.6.2. Análisis del Informe de la calidad del aire de Cuenca 2014.

Las Normas de Calidad del Aire y del Ambiente (NCAA) emitidas por el Ministerio del Ambiente del Ecuador, y que son los límites máximos permisibles de emisiones al aire de fuentes de combustión (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2012), son la referencia que utiliza el informe para concluir sobre el estado de contaminación del aire según los resultados del informe final. También se comparan con los límites máximos recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Según los resultados del Inventario de Emisiones Atmosféricas 2011 (EMOV EP, 2014) las principales fuentes de emisión de contaminantes primarios se pueden observar en la Tabla 2:

Tabla 2-2: Principales fuentes de emisión según el inventario de Cuenca 2011.

Contaminante	Tráfico vehicular	Térmicas	Solventes	Industrias	Ladrilleras artesanales
CO	91.9%				
NO <sub>x</sub>	76.4%	11.8%			
COVNM	34.4%		25.3%		
SO <sub>2</sub>	30.2%	21.1%		48.2%	
PM <sub>2.5</sub>	42.7%	9.8%			40.9%
PM <sub>10</sub>	39.9%	8.6%			36%

Fuente: (EMOV EP, 2014).

Se destaca en el informe al tráfico vehicular como la principal fuente de emisión, se indica además el aporte de la zona industrial de Cuenca en cuanto a la carga contaminante de emisiones provocadas por la su actividad.

Con respecto al material particulado PM<sub>10</sub>, el informe concluye que el promedio anual de las tres estaciones que registran el MP<sub>10</sub> (Colegio Carlos Arízaga. CCA; Municipio, MUN y Escuela Ignacio Escandón, EIE) fue de 31.6 µg/m<sup>3</sup>. Este valor es mayor al valor guía que recomienda la OMS (20µg/m<sup>3</sup>), que genera un tono de alarma por su constante crecimiento con respecto a años anteriores y su alcance al límite máximo. Los promedios anuales se pueden observar en la Tabla 3:

Tabla 2-3: Valores de los mayores registros anuales de los contaminantes monitoreados.

Contaminante	Mayor promedio anual registrado	Valor de la NCAA	Valor de la OMS
Material particulado PM <sub>2.5</sub>	6.1 µg/m <sup>3</sup>	15 µg/m <sup>3</sup>	-
Material particulado PM <sub>10</sub>	35.4 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>	-
Monóxido de Carbono	Todos menores	30 µg/m <sup>3</sup>	30 µg/m <sup>3</sup>
Contaminante	Mayor promedio anual registrado	Valor de la NCAA	Valor de la OMS

Contaminante	Mayor promedio anual registrado	Valor de la NCAA	Valor de la OMS
Dióxido de nitrógeno	Todos menores	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Fuente: (EMOV EP, 2014).

A continuación se ilustra en las Figuras 3, 4, 5 y 6 la distribución espacial de las concentraciones de los contaminantes primarios definidos en el Informe de la Calidad del Aire de Cuenca 2014, se puede identificar las zonas de concentración y compararlas con los límites máximos permisibles por las normas.

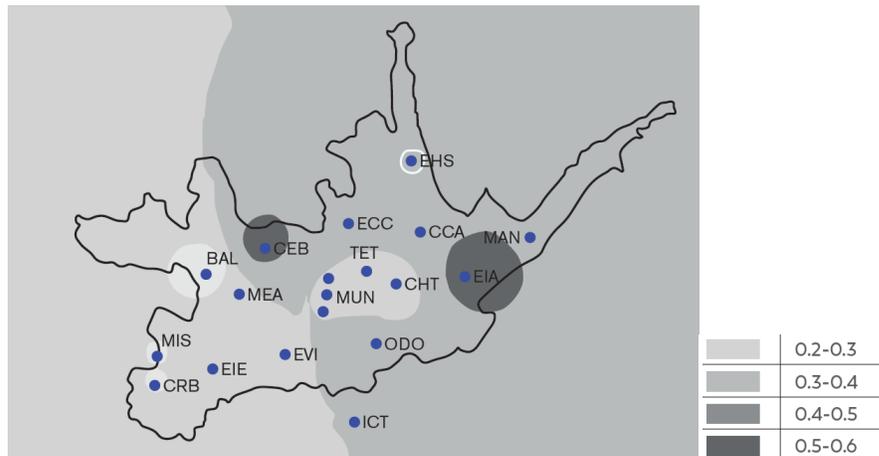


Figura 2-3: Distribución espacial de la concentración media de partículas sedimentables para el año 2014 (mg/cm<sup>2</sup> durante 30 días).

Fuente: EMOV EP, 2014

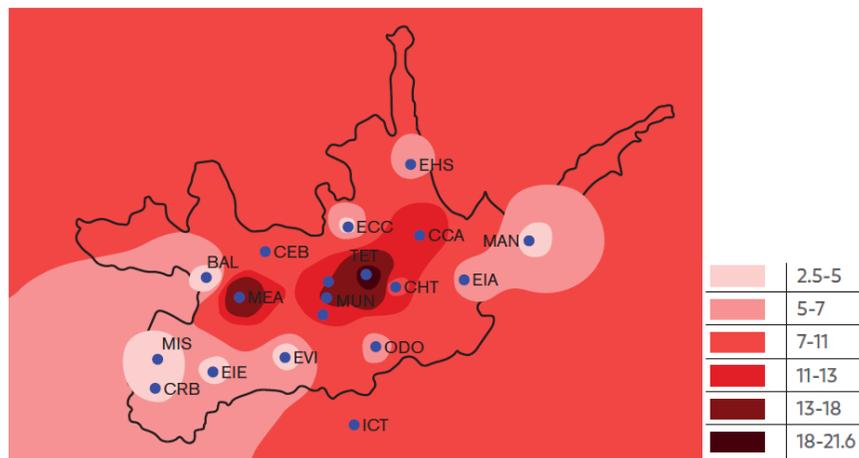


Figura 2-4: Distribución espacial de la concentración media de SO<sub>2</sub> para el año 2014 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Fuente: EMOV EP, 2014

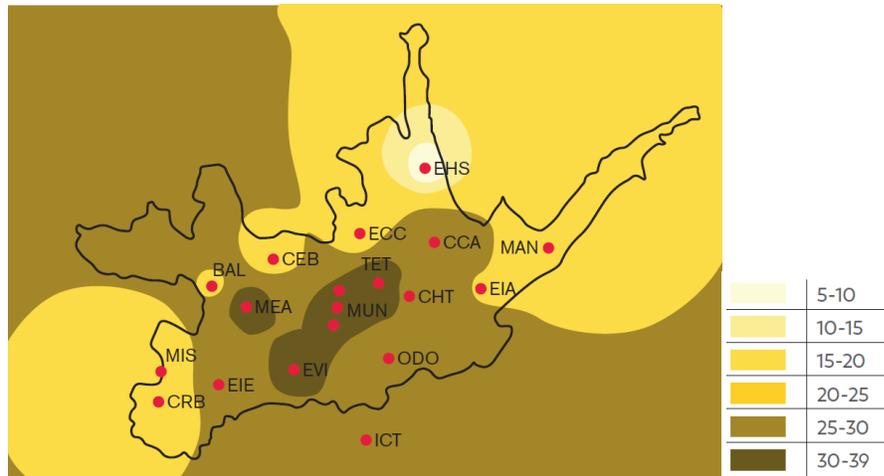


Figura 2-5: Distribución espacial de la concentración media de NO<sub>2</sub> para el año 2014 (µg/m<sup>3</sup>).  
Fuente: EMOV EP, 2014

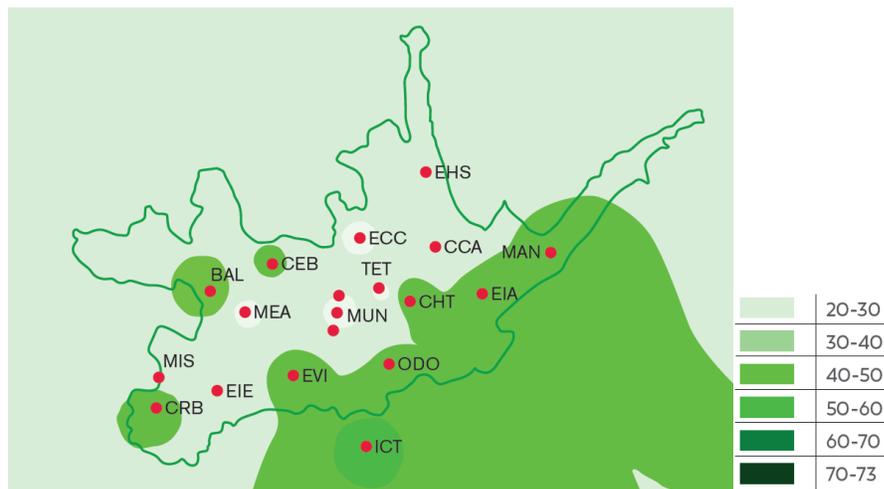


Figura 2-6: Distribución espacial de la concentración media de O<sub>3</sub> para el año 2014 (µg/m<sup>3</sup>).  
Fuente: EMOV EP, 2014

### 3. Capítulo III: Caracterización de la flota vehicular.

En el desarrollo de este capítulo, se establecerán las características de la flota vehicular que definen su composición, luego, se expondrán tres estudios de estimación de emisiones, en cada uno se analizarán las metodologías empleadas para caracterizar la flota vehicular en la ciudad de estudio. Se explicarán las características técnicas usadas para el levantamiento de información, y de esta manera, se propondrá una metodología pertinente para caracterizar una flota vehicular en general.

#### 3.1. Composición de la flota vehicular.

La composición de la flota vehicular proporciona información acerca del tipo de vehículos que circulan en una región; es decir, si son vehículos automotores compactos y subcompactos, SUV, VAN o *PICK UP* (Martinez, 2010). La clasificación del parque vehicular es importante, debido a que cada tipo de vehículo tiene características técnicas particulares como: peso, sistema de control de emisiones, cilindrada, tipo de combustible entre otros, los cuales influyen directamente en la cantidad y el tipo de contaminantes que emiten a la atmósfera.

La guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares (Secretaria de Ambiente de México, 2007) establece las características que definen la composición de la flota vehicular en la ciudad de estudio:

- Tipo de vehículo (auto, microbús, autobús, camión, motocicleta, etc.)
- Combustible utilizado (gasolina, diésel, gas, etc.)
- Peso vehicular (agrupando vehículos de un mismo tipo en subclasificaciones similares como autos compactos, medianos, grandes, SUVs, etc.)
- Desplazamiento del motor (o cilindrada, en  $\text{cm}^3$  o litros)
- Uso vehicular (un taxi, por ejemplo, típicamente recorre más kilómetros por día que un auto particular y por lo tanto las emisiones de los taxis son proporcionalmente mayores)
- Nivel tecnológico (estándares de emisión Tier 0, Tier I, Tier II, EPA98, EURO III, EURO IV, etc.)

- Edad del vehículo (que afecta su nivel tecnológico, recorrido anual y calidad de mantenimiento, entre otros).

### **3.2. Composición de flota según IVE.**

Considerando la insuficiente disponibilidad de datos en algunos países subdesarrollados (ISSRC, 2008) y la falta de experiencia para usar de manera apropiada los modelos de emisiones más complejos, IVE fue diseñado para:

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

Con este enfoque, IVE requiere como principal insumo, una comprensión exacta de la distribución de las tecnologías en la flota vehicular; el modelo contempla por defecto un total de 7 categorías vehiculares, 1372 tecnologías predefinidas y 45 tecnologías adicionales no definidas. Las tecnologías predefinidas están agrupadas conforme a los siguientes parámetros:

- Tamaño del vehículo (7 subcategorías incluyendo camiones)
- Tipo de combustible (5 subcategorías)
- Modelos para elaborar inventarios 65
- Uso del vehículo (3 subcategorías)
- Sistema de alimentación del combustible (3 subcategorías)
- Sistemas de control de emisiones evaporativas (varias subcategorías)
- Sistemas de control de emisiones por escape (varias subcategorías)

Una categoría vehicular es una combinación única de valores; por ejemplo, una categoría vehicular pudiera quedar definida por todos los vehículos ligeros a gasolina con alimentación de combustible vía carburador, sin sistemas de control de emisiones, con menos de 79,000 kilómetros recorridos y tamaño de motor inferior a 1.5litros (ISSRC, 2008). Esta flexibilidad en la definición de las categorías vehiculares le otorga a IVE la posibilidad de estimar las emisiones de diferentes mezclas de tecnologías vehiculares, al

involucrar estándares de emisión Tier 0, Tier I, Tier II, EPA98, EURO I,II, III y EURO IV, etc.

### **3.2.1. Metodologías que existen para determinar la composición vehicular.**

En un estudio de caso, en el cual, es utilizado el modelo IVE se sugiere emplear el método de conteo directo, que consiste en el análisis de grabaciones continuas del flujo de tráfico activo en zonas específicas, y de esta forma, clasificar las clases vehiculares más representativas (ISSRC, 2008). Para conocer la distribución tecnológica de la flota vehicular, el estudio propone aplicar la técnica de aforamiento vehicular, que consiste en la evaluación de encuestas aplicadas en sitios estratégicos de la localidad, con la finalidad de recolectar información respecto a las características de composición de la flota vehicular descritas anteriormente.

Otras formas de clasificación vehicular, se basan en los datos contenidos en registros de tenencia e inspección vehicular, estos pueden ser proporcionados por los organismos que gestionan el tránsito en la ciudad de estudio, el problema surge cuando se tiene incertidumbre en cuanto a la valía y coherencia de los registros.

Existen diferentes técnicas utilizadas según el enfoque que se quiere dar, para determinar la composición de la flota vehicular como:

- Coeficiente de correlación.
- La distancia euclidiana (algoritmo matemático).
- La distancia euclidiana al cuadrado (algoritmo matemático).
- Estrategia de distancia *n-order* de Minkowski (algoritmo matemático).
- El método de agrupamiento estadístico de Ward.

Todas ellas constituyen técnicas estadísticas de clasificación, con procedimientos multivariados que permiten agrupar características homogéneas en grupos que son heterogéneos entre sí; de esta manera se puede obtener una clasificación de los datos que permiten comprender su incidencia y la población de la que proceden.

Para la aplicación de las técnicas estadísticas es necesario realizar un estudio previo, en este se identificará la muestra, las variables que definen la similitud o semejanza y por último elegir la técnica más apropiada para la realización del análisis clúster o de agrupamiento.

Las metodologías de clasificación vehicular empleadas en estudios a nivel mundial se analizarán en la siguiente sección, con el fin de rescatar un procedimiento que sea útil para definir la composición de una flota vehicular en particular. Una vez que se tenga clasificada dicha flota, las categorías más representativas obtenidas, se correlacionan porcentualmente con las tecnologías que contiene el modelo IVE por defecto, esta correlación porcentual permitirá abastecer al software en el cálculo de emisiones, por la correspondencia entre las categorías vehiculares.

La aplicación de cualquier metodología para establecer una clasificación vehicular, debe estar respaldada por un análisis de la incertidumbre de los resultados obtenidos, las técnicas de evaluación de incertidumbre se muestran en secciones posteriores.

### **3.3. Metodologías de clasificación vehicular.**

A continuación se expondrán tres estudios, en cada uno, se examinarán los lineamientos empleados para estimar emisiones por fuentes vehiculares, se describirán las características técnicas de la metodología utilizada para la clasificación de la flota vehicular y se realizará un breve análisis de los resultados obtenidos.

#### **3.3.1. Título del estudio: “Desarrollo y aplicación del modelo internacional de emisiones” (*Development and Application of an International Vehicle Emissions Model*).**

##### **3.3.1.1. Antecedentes del estudio.**

En la aplicación del modelo internacional de emisiones IVE desarrollada por (Davis, 2005) se describe la metodología para recopilar información acerca de la composición de la flota vehicular, su clasificación y distribución tecnológica.

Los autores han desarrollado una metodología de recolección de datos para compilar esta información con los recursos disponibles en una nación sin recursos. El estudio de campo

fue diseñado para recoger datos iniciales en un período de 6 días. Esta información fue útil para proporcionar una estimación de primer orden de las emisiones producidas en la región estudiada.

Fue imperativo la obtención de datos reales, porque el enfoque de la recolección estuvo dirigida a muestras relativamente pequeñas. Se aseguró la variedad representativa de la muestra durante la compilación de información para garantizar la valía del resultado final. Adicionalmente, los días seleccionados para el estudio fueron típicos descartando condiciones meteorológicas adversas, vacaciones o fines de semana. El método deja abierta la posibilidad al análisis de los efectos de estas variables, agregando que podría ser necesario coleccionar más información.

### **3.3.1.2. Características técnicas de la metodología utilizada.**

#### **1) Clasificación vehicular.**

- Se realizó un estudio de campo en el área de interés con una duración de dos semanas.
- El estudio de campo contempló dos tipos de recolección de datos:
  - La grabación en vídeo del tráfico en varias vías para obtener una proporción general de los tipos de vehículos en circulación.
  - Encuestas en parqueaderos, terminales, parada de taxis y de transporte por carretera para determinar la distribución de los vehículos de pasajeros, autobuses, y camiones por la tecnología.
- Se resalta el hecho de que la base de datos sobre registro y la inspección vehicular contiene errores, pueden estar desactualizados o reflejar sólo una parte de la flota.

#### **2) Distribución de las clases vehiculares.**

- En este estudio nueve vías fueron adecuadas para registrar en vídeo continuo de lunes a viernes en el horario de 07:00 a 21:00.
- Las vías fueron seleccionadas con la ayuda de las agencias de tránsito locales con el fin de que sean representativos y puedan incluir vías residenciales, avenidas y carreteras.

- Se definieron tres sectores de la ciudad que sean representativos para niveles socio-económicos alto, medio, bajo y el centro de la ciudad.

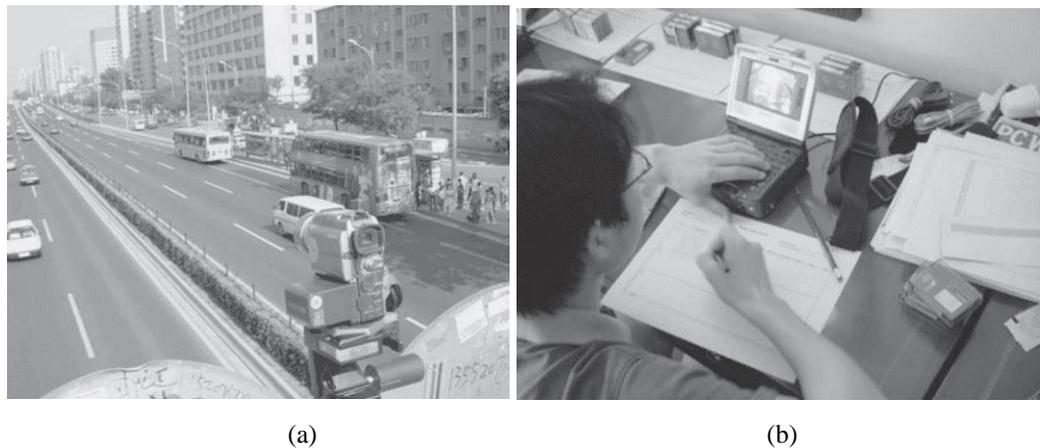


Figura 3-1: Ilustración del proceso de grabación en video: (a) ubicación de cámaras de video, (b) el análisis y clasificación vehicular.

Fuente: (Davis et al., 2005)

- Las cintas de video fueron analizadas para determinar la fracción de las categorías vehiculares circulantes en las vías antes seleccionadas, se logró establecer también volúmenes de tráfico por hora.
- Los requisitos para el proceso de grabación en vídeo y conteo directo incluyeron:
  - Una cámara de vídeo digital de alta velocidad y de alta resolución,
  - Un guardia por motivos de seguridad,
  - Un estudiante capacitado en la operación de la cámara de vídeo.
- Las cintas de video fueron revisados manualmente por estudiantes capacitados para clasificar y contabilizar los diferentes tipos de vehículos.

### 3) Distribución tecnológica.

- Los autores destacan que la información de la clasificación tecnológica no se puede determinar a través del procedimiento de grabación en vídeo, por lo tanto se llevaron a cabo encuestas en parqueaderos localizados en cada sector.
- En función de la ubicación de los sectores representativos de la ciudad, se visitaron sitios con variedad de estacionamientos que contenían una mezcla proporcional de

vehículos, por ejemplo, centros comerciales, tiendas de comestibles, gasolineras, etc.

- En estas encuestas, un mecánico inspeccionó físicamente cada vehículo y registró el año modelo, las tecnologías de control emisión, lectura del odómetro y la presencia de aire acondicionado.
- Para recoger la distribución tecnológica la de la flota de pasajeros, se sondeó en aparcamientos públicos durante todo el día en el periodo de dos semanas.

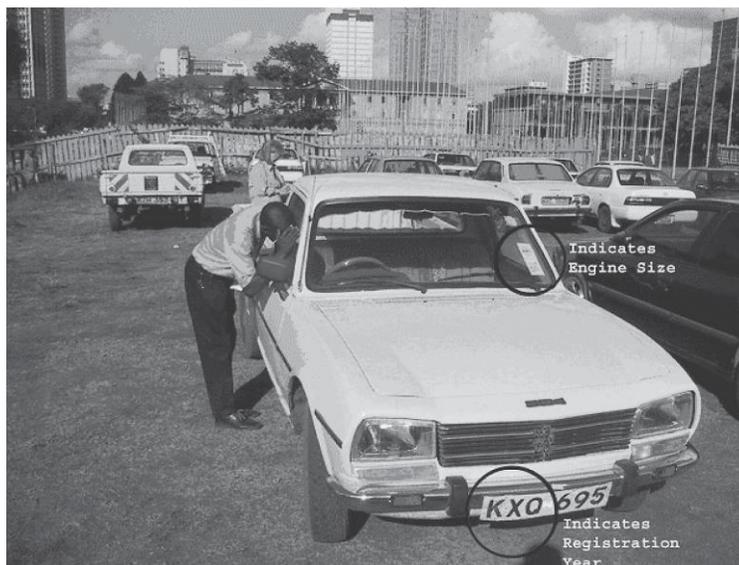


Figura 3-2: Ilustración del proceso para la inspección física, lectura de odómetro y recolección de datos en parqueaderos.

Fuente: (Davis et al., 2005)

### 3.3.1.3. Análisis de la metodología utilizada.

Este método ha sido utilizado efectivamente en muchas ciudades (por ejemplo, Los Ángeles, California; Nairobi, Kenia; Santiago, Chile; Shanghái, China; Pune, India; Beijing, China; São Paulo, Brasil; Lima, Perú; y Almaty, Kazajstán) y proporciona resultados precisos en las áreas de estudio en comparación con los resultados obtenidos por otros métodos (Davis, 2005). Durante el ejercicio de validación, los autores demuestran que la composición de la flota observada en los nueve caminos seleccionados se puede extrapolar a toda la ciudad. Sin embargo, no recomiendan utilizar esta información en otras ciudades, porque existen diferencias significativas entre flotas.

En conclusión, el método de videograbación de tráfico en ruta, permite conocer de manera real los tipos de vehículos que comúnmente circulan en una ciudad en particular, para luego, establecer una clasificación que agrupe las categorías más representativas.

**3.3.2. Título del estudio: “Metodología para la estimación de las emisiones atmosféricas del transporte por carretera en las zonas urbanas de Italia” (*A methodology for the estimation of road transport air emissions in urban areas of Italy*).**

**3.3.2.1. Antecedentes del estudio.**

Este documento resalta la importancia de mejorar el enfoque de la metodología *top-down* (Saija, 2002) usada para estimar emisiones a nivel local, para ello, se seleccionó un conjunto de variables relacionadas con la actividad del transporte, sumada a datos estadísticos de carácter socio-económico, con la finalidad de identificar las áreas homogéneas de uso vehicular en el territorio italiano.

La selección de las 17 variables, está justificada por la disponibilidad de datos y la relevancia de los flujos de tráfico que permitieron agrupar las 107 provincias de Italia en áreas homogéneas, las mismas que, fueron establecidas luego del análisis de datos relacionados a actividades laborales y mano de obra; otra variable que tuvo relevancia fueron las longitudes de carretera, datos de ventas de combustible y los antecedentes de la flota vehicular fueron proporcionados por el organismo que rige el transporte en dicho país.

**3.3.2.2. Características técnicas de la metodología utilizada.**

**1) Clasificación vehicular.**

- El territorio italiano fue clasificado a través de la métrica de agrupamiento jerárquico denominada: distancia euclidiana cuadrática.
- La técnica de agrupamiento jerárquico fue aplicada para encontrar similitudes entre las clases vehiculares, y así se empezaron a identificar las categorías más representativas.

- La metodología jerárquica fue divisiva, ya que inició analizando la flota vehicular total y permitió definir grupos de jerarquías.
- Los resultados de dicho agrupamiento jerárquico fueron presentados a través de un dendrograma.
- Para lograr definir los grupos de categorías más representativos, se utilizó el software estadístico SPAD 3.2 (CISIA-CERESTA, 1998), por ser un software comercial de origen europeo que agrupa métodos estadísticos multivariados que permiten procesar datos cuantitativos.

## **2) Distribución tecnológica.**

- Se utilizó la información derivada de los datos obtenidos, para recopilar información respecto a los insumos que requiere el modelo de emisiones europeo COPERT.
- Se utilizaron estadísticas oficiales para distinguir los grupos vehiculares por tipo de combustible utilizado, a través del análisis del consumo de combustible.
- Los patrones de conducción están definidos por COPERT, en este estudio se diferencian tres, los mismos que, en función del tipo del área de circulación fueron definidos como: urbanos, rurales y carreteras.

### **3.3.2.3. Análisis de la metodología.**

La aplicación de técnicas de agrupación jerárquico han demostrado ser útiles para analizar datos a gran escala, sin embargo el principal problema de ésta metodología consiste en definir los criterios de agrupación.

De los cuatro grupos establecidos, la composición de la flota vehicular está definida en el primero por la presencia masiva de vehículos a diésel con tecnologías obsoletas; mientras que en el grupo dos se encuentra el mayor porcentaje de vehículos a gasolina, en tanto que el grupo tres presenta la aglomeración de vehículos con tecnologías Euro 1, y en el grupo cuatro se destaca la presencia mayoritaria de ciclomotores.

El modelo COPERT fue aplicado para estimar los cinco contaminantes criterio, (NO<sub>x</sub>; COVNM, CO, CO<sub>2</sub>, PM) para cada grupo, utilizando valores de kilometraje promedio anual, consumo de combustible y patrones de conducción; toda esta información fue

ponderada con base en los datos oficiales otorgados por los organismos pertinentes. De esta forma, la composición de flota vehicular permitió comprobar que las emisiones estimadas a nivel de grupo, sean consistentes con las emisiones nacionales, según el enfoque del estudio.

Se puede decir que, la metodología de clasificación vehicular desarrollada por técnicas estadísticas de agrupamiento, puede ser aplicable siempre que, se dispone de información oficial que respalde la selección de las variables que permitan agrupar las categorías vehiculares más representativas.

### **3.3.3. Título del estudio: “Análisis de la variabilidad espacial en los patrones de actividad y la distribución de la flota vehicular” (*Analysis of spatial variability in vehicle activity patterns and vehicle fleet distribution*).**

#### **3.3.3.1. Antecedentes del estudio.**

El estudio forma parte del programa SoCAB (Malcolm, 2001), desarrollado en tres ciudades del sur de California y tiene como objetivo la caracterización de la variación espacial y temporal de la actividad vehicular a micro-escala. A través de este estudio se evaluó el impacto de las emisiones provocadas por el uso de nuevas tecnologías vehiculares en esa región, para ello se priorizó satisfacer la necesidad de contar con una comprensión precisa de las características de composición vehicular.

La metodología tiene fundamento en programas de evaluación de emisiones realizados anteriormente, se utilizaron datos de composición de flota a través del programa SELEV (*Study of Extremely Low Emission Vehicles*) que en conjunto con otro denominado CE-CERT (*Center for Environmental Research and Technology*), han desarrollado técnicas de recopilación de información que incluyen el procesamiento de datos obtenidos mediante:

- El análisis de registros de placas vehiculares.
- El análisis de registros vehiculares por código postal.
- El análisis de registros por códigos de identificación vehicular o VIN.

### 3.3.3.2. Características técnicas de la metodología utilizada.

#### 1) Clasificación vehicular.

- El periodo de medición se realizó dos veces por semana durante dos semanas, cada tres días. Se tomaron en cuenta días laborales y fines de semana.
- Los datos se registraron solo en el día, durante veinte minutos de cada hora.
- Fue necesario un equipo de estudiantes para realizar actividades de instalación y análisis.
- Se utilizaron cámaras de video digital para la grabación del flujo vehicular.
- Se consideraron vías residenciales, avenidas y autopistas.
- La cámara de video fue instalada 15ft sobre el nivel de la calzada en las tres vías principales.
- Para la digitalización y procesamiento de las imágenes de la cámara de video, se utilizó el software AUTOSCOPE4 (Malcolm, 2001).
- Los archivos de salida del procesador AUTOSCOPE4 fueron: volumen total de tráfico vehicular y volumen total de tráfico por categoría vehicular.
- En principio se crea una detección, cuando el vehículo cruza por el detector virtual instalado.
- La longitud del vehículo se calcula a partir de la cantidad de tiempo que el vehículo ocupa al atravesar el detector virtual.
- Las clases vehiculares consideradas según SELEV y definidas por longitud fueron:
  - Clase 1: *Light-duty automobile*, menos de 25ft.
  - Clase 2: *Medium-duty truck*, de 25 a 36ft.
  - Clase 3: *Heavy-duty truck*, más de 36ft.

#### 2) Distribución tecnológica.

- Una segunda cámara digital fue instalada en un trípode sobre la calzada de las tres vías representativas.
- La cámara captura en fotografía las placas vehiculares del tráfico que circula en la zona de estudio.
- Se alternó el análisis en varios carriles cada día, en cada vía y en distintas zonas.

- Todas las imágenes se analizaron manualmente e introdujeron en una base de datos separándolas por categoría vehicular.
- Se analizó cada minuto del tráfico vehicular en zonas residenciales.
- Se analizó un minuto cada tres del tráfico que circula en avenidas y autopistas, debido a la densidad de afluencia vehicular.
- Se obtuvo información utilizando las placas vehiculares capturadas y correlacionadas con los registros vehiculares oficiales.
- Un segundo equipo de estudiantes durante el periodo que duro el estudio de campo, recopiló información fotografiando placas de grupos de vehículos en distintos parqueaderos de las zonas de estudio.
- Mediante el análisis se pretendió captar información sobre: modelo, motor, transmisión, tipo de catalizador, códigos postales, etc.

### **3.3.3.3. Análisis de la metodología utilizada.**

De la metodología utilizada se concluye que, existen diferencias significativas en cuanto a la composición de flota vehicular en las tres ciudades, marcadas principalmente por las tecnologías vehiculares. Se determinó que la variación tecnológica tiene un impacto determinante en el cálculo de emisiones al utilizar modelos de estimación de última generación.

Durante el periodo de correlación entre los datos ofrecidos por la metodología, se evidenció errores en los registros oficiales versus las características reales de los vehículos capturados por las cámaras; esto conllevó a dificultades en la estimación de emisiones por el tiempo dedicado a corregir dichos errores.

El estudio también concluye que la aplicación de software AUTOSCOPE4 facilita la categorización de la flota a través del análisis de volúmenes de tráfico, que junto a variables como, los patrones de conducción, grados de congestión y las diferencias en la edad de la flota vehicular, tienen cada uno, relevancia significativa en el cálculo de emisiones.

#### **4. Capítulo IV: Metodología para estimar KVR.**

En este capítulo se definirá el concepto de KVR, se describirá su importancia y utilidades; luego, se explicarán las variables que se utilizan para su estimación a través de diferentes metodologías que serán descritas también. Brevemente se analizarán los métodos de estimación de KVR utilizados en EEUU y Europa. Finalmente se expondrán las metodologías de cálculo de KVR utilizadas en tres distintos estudios, se analizarán sus características técnicas que servirán de referencia, para luego, definir una metodología pertinente que sea aplicable en una región particular.

##### **4.1. Definición de KVR y su importancia.**

La cantidad de kilometraje vehicular recorrido o KVR es un indicador de la actividad vehicular y se refiere a la intensidad de uso del vehículo o flota de vehículos, definido generalmente por la cantidad de kilómetros o millas recorridos en un determinado periodo de tiempo (km/día, km/año, etc.) (Góngora, 2012). La medición de KVR es importante porque representa un indicador con varios usos para la aplicación de ciertas políticas. Su relevancia radica en la necesidad de obtener información que sea comparable a nivel internacional para vigilar las tendencias del tráfico urbano y la estimación de las emisiones producidas por éste último.

El tipo de información obtenida de KVR es interpretado como volúmenes de tráfico y tiene los siguientes usos básicos:

- Formulación de políticas nacionales e internacionales.
- Gestión y planeación de la infraestructura vial.
- Gestión de transporte.
- Temas ambientales.

##### **4.2. Métodos de estimación de KVR.**

El realizar estimaciones aproximadas de emisiones de gases contaminantes vehiculares, implica obtener una medida lo más cercana posible a lo real de la cantidad de KVR. Sin embargo, la recolección de información necesaria para determinar un valor aproximado

es compleja, ya que no existen normativas que obliguen a registrar ese tipo de información, esto sumado a la falta de criterios para recolectar datos para el cálculo, hacen que la medición de KVR sea inexacta y depende estrechamente del uso que se requiera dar.

Los métodos de estimación de KVR dependen estrechamente de la disponibilidad de datos para su cálculo, según (Góngora, 2012) en su análisis incluye los siguientes:

- Métodos basados en modelos de tráfico.
  - Simulación de volumen de tráfico por vía basado en la capacidad vial en zonas comerciales y residenciales utilizando softwares de ingeniería de tránsito (CUBE, EMME III, TRANUS).
- Métodos basados en mediciones de tráfico.
  - Lecturas de odómetros.
  - Medidas de densidad de tráfico.
- Métodos no basados en mediciones de tráfico.
  - Metodología de encuestas.
  - Métodos de medición de ventas de combustible (modelos matemáticos).

#### **4.2.1. Metodologías de estimación de KVR desarrolladas en EEUU.**

Las agencias de transporte en cada estado del país están obligadas a llevar un registro, con estimaciones precisas de la cantidad de viajes realizados en las carreteras bajo su jurisdicción; estas estimaciones son utilizadas para el seguimiento de la normativa ambiental y gestión de la movilidad en la red vial estatal (Góngora, 2012). Los datos suministrados son expresados en millas vehiculares recorridas MVR, (VMT por sus siglas en inglés).

Los datos de MVR son desarrollados por la *Federal Highway Administration* y derivan de información anual proporcionada por el Sistema de Monitoreo de Rendimiento de Autopistas (HPMS por sus siglas en inglés), que incluye conteos de tráfico expresados como promedio anual de tráfico diario (AADT) para cada sección del Sistema Nacional de Carreteras. El VMT diario, es el producto de una sección AADT y la longitud de carretera. El HPMS proporciona también datos de longitud de viajes anuales en estos sistemas.

Tabla 4-1: Metodología de estimación de KVR utilizada en EEUU.



Fuente: (Góngora, 2012).

La metodología utilizada para estimar MVR está definida por la Ecuación 4.1, a continuación también se describen algunas características del método utilizado.

Ecuación 4.1. Expresión general para el cálculo de KVR.

$$\text{MVR} = \text{Longitud de carreteras} \times \text{AADT}$$

Fuente: (Góngora, 2012).

- La estimación considera los conteos realizados en 4000 sitios de tráfico continuo operado en los estados.
- Los conteos son comparados con los del año anterior para obtener una medida del cambio y estimaciones actualizadas.
- Existen diferencias entre los métodos de recopilación y presentación de información entre los estados.
- Existe sesgo en la interpretación de datos de vehículos de pasajeros y otros considerados “pequeños”.
- Los MVR de los grupos vehiculares “pequeños” son sumados a un MVR nacional compuesto con el fin de aproximar el cálculo.
- Se utilizaron las encuestas mostradas en la Tabla 4.1 y el uso de datos de la encuesta denominada TIUS (uso de camiones).
- Esta metodología está basada en las relaciones existentes entre MVR, el promedio anual de millas recorridas por vehículo (AAMPV) y el número de vehículos registrados (N). Estas relaciones funcionales concluyen en la siguiente Ecuación 4.2:

Ecuación 4.2. Expresión que relaciona el registro vehicular y el promedio anual de tráfico diario.

$$MVR = N \times AAMPV$$

Fuente: (Góngora, 2012).

#### 4.2.2. Metodologías de estimación de KVR desarrolladas en Europa.

La *United Economic Commission for Europe* UNECE, realiza censos de volumen de tráfico cada cinco años, existen cuatro métodos básicos utilizados por los países de la Unión Europea.

##### a) Lecturas de Odómetros.

- Método basado en registros de la inspección vehicular obligatoria.
- Se calculan los kilómetros recorridos por cada vehículo en un período determinado de tiempo para convertirlos en kilómetros recorridos por día.
- EL método analiza la edad del vehículo; el resultado de kilómetros recorridos diarios se multiplica por el número de vehículos registrados del mismo tipo, dando como resultado el volumen de tráfico diario, que a su vez se multiplica por el número de días del año, si se requieren indicadores anuales.
- La principal desventaja es que excluye al tráfico no registrado en la base de datos de la inspección vehicular.
- La metodología es utilizada en Países Bajos, Dinamarca, Letonia y Suiza.

##### b) Métodos de conteo de tráfico.

- Esta es la principal metodología utilizada para estimar la cantidad de KVR en Bélgica, Finlandia, Estonia, Hungría, República Checa, Polonia, Eslovaquia, Eslovenia, Reino Unido y Suecia (y también en los EE.UU.).

##### c) Métodos de encuestas.

- Se utiliza el método tradicional de encuestas a conductores ya mencionado con anterioridad, generalmente se utiliza en algunos países de la unión Europea como fuente suplementaria de información.

## d) Métodos basados en consumo de combustible.

- Cálculos basados en el consumo de combustible mediante los montos de ventas de combustible y las estimaciones de kilómetros recorridos por litro. Método mayormente utilizado en Francia, Austria y Portugal.

Ecuación 4.3. Metodología de estimación de KVR basada en consumos de combustible.

$$RV = LCV \div KPL$$

LCV = Litros de combustible vendidos (Combustible usado)

KPL = Kilómetros por litro (intensidad de uso de combustible)

$$\text{Kilómetros} = \frac{\text{Litros}}{\frac{\text{Kilómetros}}{\text{litro}}}$$

Fuente: (Góngora, 2012).

### 4.3. Metodologías de estimación de KVR utilizadas en ciudades del mundo.

En esta sección se expondrán tres estudios, en cada uno se analizarán las técnicas de recolección de información empleadas para estimar la cantidad de kilometraje vehicular recorrido por la flota de vehículos analizada. Se describirán las características técnicas de la metodología utilizada para el cálculo de KVR y se realizará un breve análisis de los resultados obtenidos.

#### 4.3.1. Título del estudio: “Inventario de emisiones de vehículos y análisis de su incertidumbre para Shanghai, China” (*On-road vehicle emission inventory and its uncertain analysis for Shanghai, China*).

##### Antecedentes del estudio.

El estudio indica una metodología *bottom-up* (de abajo hacia arriba) para determinar el inventario de emisiones de Shanghái, se investigó y analizó la resolución espacial y temporal de la flota vehicular, los factores de emisión fueron calculados utilizando el modelo IVE, tomando en consideración la influencia de la cantidad de KVR en el cálculo de emisiones total (Wang, 2008).

En Shanghái ya se han aplicado varios modelos de estimación de emisiones como MOBILE, en este caso el modelo IVE se utilizó para evaluar el impacto que tiene la medición de KVR en el cálculo de emisiones, considerando el grado de industrialización de dicha ciudad y el crecimiento poblacional, se plantea una relación entre el número de vehículos y su uso. Las características de VSP (*Vehicle Specific Power*) fueron incluidas en el cálculo de KVR, que constituyen además un indicador clave para determinar las conductas de manejo al estar directamente relacionado con la cantidad de emisiones producidas.

En la metodología se detalla las características y variables del software para calcular las emisiones, y resalta la necesidad de contar con datos significativos dada la magnitud de la flota vehicular y conductas de manejo. Se precisó establecer valores de KVR estadísticamente reales, para lograr ajustar los factores de emisión con aproximación, ya que Shanghái es considerada una mega ciudad, la representatividad de la información recopilada debía garantizar prolijidad en los resultados obtenidos, siendo ésta la razón por la que el modelo de emisiones vehiculares IVE no es usado ampliamente en China (Wang, 2008).

#### **Características técnicas de la metodología utilizada.**

- Para el cálculo de KVR se utilizó información respecto a la distancia anual recorrida por los vehículos y el número de registros vehiculares por categoría.
- La expresión utilizada para estimar la cantidad de KVR en Shanghái se describe en la Ecuación 4.4:

Ecuación 4.4. Metodología de estimación de KVR.

$$\text{KVR}(\text{km/día}) = \frac{N_p \times T_p}{f_p}$$

$$T_p = O_{P,a+0,5} - O_{P,a-0,5}$$

$N_p$  = Número de vehículos de pasajeros, PC.

$T_p$  = Uso promedio de PC, km/día/vehículo.

$f_p$  = Fracción de PC, en %.

$O_p$  = Millaje promedio acumulado de PC, km.

$a$  = Edad promedio de PC, en años.

Fuente: (Wang et al., 2008).

- $f_p$  fue calculado en base al conteo directo del tráfico grabado en video.
- Se utilizó también el método de encuestas en carretera para relacionarlo con la longitud de vías en Shanghái.
- $a$  fue estimado en base a encuestas realizadas en parqueaderos, se tomaron datos de edad de vehículos y se realizaron lecturas de odómetros.
- Las encuestas fueron aplicadas en estacionamientos a una población de 1200 vehículos de pasajeros.
- Se empleó la información referente a los KVR durante los primeros 11 años de los vehículos encuestados, para aplicarlos a la Ecuación 4.4.
- Se determinó el KVR diario por categoría de vehículos en 49km/día.

#### **Análisis de la metodología utilizada.**

En éste estudio el cálculo de KVR diario se estableció para varias categorías vehiculares, fue necesario determinar esta información con anterioridad, ya que suministra datos estadísticos de vehículos registrados en Shanghái que reflejan características que fueron utilizadas para clasificar los grupos de análisis. Se utilizaron datos de *Shanghái Bureau of Statistics*, y encuestas de transporte de *Shanghai Public Security Bureau* para complementar la información necesaria para el cálculo.

Se puede notar que, para la aplicación del enfoque utilizado en la estimación de KVR en Shanghái, es necesaria una disponibilidad anticipada de datos referentes a registros vehiculares. El estudio realiza también un análisis de la incertidumbre al aplicar la metodología descrita, al comparar los datos obtenidos luego de aplicar las ecuaciones expuestas anteriormente, con los valores de KVR totales obtenidos por otras metodologías, concluyendo que la diferencia existente es menor al 10%.

**4.3.2. Título del estudio: “Nuevo método de estimación de AADT y VMT locales a través de modelos de circuitos de red y simulación” (*Novel Estimation Method of Community AADT and VMT via Circuit Network Models and Simulation*).**

**Antecedentes del estudio.**

El documento científico desarrollado por (Sheng-Guo Wang, 2011), propone un enfoque novedoso para estimar AADT y MVR en una localidad, basados en el desarrollo de un modelo de circuito eléctrico que emula la red vial del área, diseñado para que a través de simulación poder estimar volúmenes de tráfico en cada vía y así resolver el problemas de congestión vehicular e infraestructura en la red vial de una región.

Los autores son los primeros en proponer un enfoque distinto al utilizado en las metodologías propuestas por varios estudiosos dedicados al desarrollo de métodos para calcular MVR; se hace hincapié en que los modelos de estimación más recientes ya no realizan mediciones de tráfico, en su lugar utilizan estadísticas de carácter socio-económico (ventas de vehículos, combustible utilizado, población, etc.) para estimar MVR. Se resalta el hecho de que es la primera vez que se utilizan un circuito eléctrico y la Ley de Kirchhoff para estimar MVR.

La metodología está compuesta por el circuito eléctrico que está diseñado en base a las características de distribución de la red vial del área de estudio, se utiliza la metodología *Least Squares Method* (LSM por sus siglas en inglés) para el análisis enfocado en el área de interés y tres sub-modelos adicionales, que cada uno representa las características de las entradas de tráfico del área en un sentido estadístico. La simulación dio como resultado datos consistentes y comparables con resultados obtenidos mediante estudios empíricos de medición, la metodología fue aplicada virtualmente en el condado de Mecklenburg, Carolina del Norte.

**Características técnicas de la metodología utilizada.**

- Se diseñó el circuito eléctrico de manera que tuviera semejanza con la topología de la red vial, los ramales del circuito eléctrico representan caminos de la red vial.
- La cantidad de corriente en cada ramal representa y es proporcional a la cantidad de tráfico en la vía correspondiente.

- En base al principio empírico de cálculo de KVR ( $kvr=AADT \times \text{long. carretera}$ ), se establece que, si se introduce un valor de resistencia en el ramal igual a la longitud de carretera, entonces el valor del voltaje que atraviesa dicho ramal es el valor exacto de KVR, según la Ley de Ohm.
- El valor total de KVR en una red vial es igual a la suma de los valores absolutos de voltaje medidos en cada ramal.
- Se aplicó el principio de la continuidad (Ley de Kirchhoff) debido a que las características del flujo de tráfico vehicular obedecen a dicho principio.
- Se asumió en base a datos de estudios de tráfico, que el mayor flujo vehicular se registró en las entradas de la red vial analizada.
- Se consideró ambas direcciones de sentido de tráfico en las entradas de la red vial, y se analizó también la combinación de ambos sentidos, para modelar el flujo de tráfico.
- Se determinó al flujo de tráfico en la entrada de la red vial como una fuente de corriente.
- En base a la ley de Kirchhoff, se estableció que la cantidad de corriente absorbida por circuito eléctrico es igual a la cantidad de fuentes de corriente (flujos de tránsito) que ingresan por las entradas de la red vial.
- Cada ramal posee una fuente de energía que representa el volumen de tráfico en dicha entrada.
- Para la simulación, se ilustró una comunidad real, con dos entradas localizadas y sus respectivas fuentes de corriente.
- En cada ramal de la red vial de la comunidad fue instalada una resistencia igual a la mitad de la longitud del ramal (vía).
- Se modeló una fuente de corriente absorbida en el punto medio de cada ramal, que representa el flujo de tráfico y su valor es determinado por las Ecuaciones 4.5, 4.6 y 4.7.

Ecuación 4.5. Modelo de distribución equitativa.

$$I_{Bi} = \frac{I_{OU} \times H_{Bi}}{H_O}, \quad i = 1, 2, 3 \dots, n$$

Ecuación 4.6. Modelo de distribución local:

$$I_{Bi} = \frac{I_{ej} \times H_{Bi}}{H_{Oj}}, \quad i = 1, 2, 3 \dots, n_j, \quad j = 1, \dots, m$$

Ecuación 4.7. Modelo de distribución separada:

$$I_{Bij} = \frac{I_{ej} \times H_{Bi}}{H_o}, \quad i = 1, 2, 3 \dots, n, \quad j = 1, \dots, m$$

Donde:

$I_{Bij}$  = flujo de tráfico en la entrada.

$H_{Bi}$  = número de hogares en el ramal  $i$ .

$H_o$  = número total de hogares en la comunidad.

$I_o$  = valor total de la corriente de entrada.

$n$  = número total de ramales o vías.

- Las Ecuaciones 4.6 y 4.7 son variantes mejoradas de la Ecuación 4.5.
- Se aplicó la Ecuación 4.5 junto con el método LSM con el fin de desarrollar la metodología para estimar con precisión MVR y AADT, minimizando los errores entre los MVR calculados y los MVR observadas en el conteo de tráfico en las vías.
- Los datos obtenidos pueden ser extrapolados con seguridad a la población general de una ciudad completa.
- Actividades de recopilación de datos para la comprobación y simulación de la metodología:
  - Se dividió el mapa del condado en 400 (20x20) áreas pequeñas para ser muestreadas al azar.
  - Se seleccionaron áreas residenciales de entre las 400, para medir el flujo de tráfico en las entradas de la red vial y carreteras.
- Se utilizó el flujo de corriente para representar el flujo de tráfico en la red vial del área de estudio.
- Según la guía de la FHWA, se muestrearon cada dos días seguidos.
- Los datos obtenidos son corregidos por factores de ajuste contenidos en la guía de la FHWA.

- Se utilizó la herramienta GIS (*Geographic Information System*) para obtener el número de hogares en la localidad.

#### **Análisis de la metodología utilizada.**

El método presentado en el estudio propone un inusual enfoque para el cálculo de KVR, se destaca la importancia de la relación entre el número de hogares y la cantidad de tráfico en una arteria vial, el método propuesto ofrece facilidad y precisión en la estimación de KVR, esto es demostrable por la comparación realizada entre los resultados de la simulación y los datos obtenidos de las mediciones de tráfico en carretera. Este método sería una alternativa aplicable para calcular KRV sin realizar conteos de actividad vehicular, reduciendo considerablemente la necesidad de recursos, pudiendo ser aplicado en cualquier región. Por otra parte, el método se encuentra en desarrollo y no se ha registrado hasta ahora una aplicación real en el ámbito de estimación de emisiones.

#### **4.3.3. Título del estudio: “Informe del análisis de emisiones para el Plan de Transporte en la zona rural del condado de Davidson” (*Emissions Analysis Report for the Transportation Plan for the Rural Portion of Davidson County*).**

##### **Antecedentes del estudio.**

El departamento de medioambiente de Carolina del Norte (NCDOT) con el fin de estimar emisiones de áreas pequeñas fuera de los límites del MPO (*Metropolitan Planning Organization*) establecido, empleó un método de cálculo basado en la medición de MVR diarios en la red vial del área mencionada. Esta metodología fue utilizada para desarrollar una línea de referencia de la cantidad de MVR en las vías locales, con o sin el empleo de un modelo de proyección de demanda de tráfico (TDF por sus siglas en inglés).

Este enfoque involucró el desarrollo de un inventario detallado de la composición vial del área analizada. Los datos de promedio de tráfico diario (AADT) fueron estimados en base al método de medición de tráfico en carretera, siendo luego analizados junto con la longitud de carreteras. Los autores dejan abierta la posibilidad de utilizar, o no, un modelo de proyección de demanda de tráfico (TDF por sus siglas en inglés), asimismo para localidades sin ningún tipo de información, se podría utilizar información de AADT de

otras regiones para ser aplicadas a través de este modelo y estimar MRV de dicha localidad.

**Características técnicas de la metodología utilizada.**

- Se desarrolló un inventario detallado de las dimensiones y ubicaciones de la red vial analizada.
- Se llevaron a cabo conteos de tráfico con el fin de establecer estimaciones del promedio de tráfico diario (AADT) en varias vías de la localidad de interés.
- La cantidad de MVR se calculó multiplicando la información de AADT obtenida el muestreo en carretera por la longitud de la misma.
- El 74% de la longitud total de las vías analizadas fueron analizadas por conteos de tráfico.
- Se asumió el valor de 400 AADT para los enlaces viales sin conteos de tráfico.
- Los procesos de recopilación de información fueron basados en la guía propuesta por la HPMS.

**Análisis de la metodología utilizada.**

- La metodología requiere disponibilidad de datos exactos de la longitud de carreteras.
- El uso de conteos de tráfico provee un mejor indicador de los niveles de tráfico en áreas pequeñas, en oposición a utilizar datos a nivel de condado.
- El nivel de recolección de datos dependió de la variación del volumen de tráfico en carretera.
- La metodología requiere de información adicional en relación a los datos ofrecidos por agencias estatales.
- El asumir datos de los valores de AADT de otras regiones, no siempre pueden ser aplicados en todas las áreas.

Esta metodología es de aplicación virtual para áreas urbanas y rurales, su aplicación es más apropiada cuando la región examinada tiene diferentes características en cuanto al volumen de tráfico y dimensiones de carreteras. La aplicabilidad depende en efecto, de la disponibilidad de datos y métodos de recolección, para que su utilización sea simple y así sus resultados ofrezcan una solidez técnica.

## **5. Capítulo V: Metodología sugerida para calcular factores de emisión ajustados a una localidad utilizando IVE.**

En esta sección se expondrá la relevancia de las variables que influyen en el modelo de estimación de emisiones; se describirá también, la importancia de considerar el valor de poder específico vehicular (VSP por sus siglas en inglés) y su relación con los BIN. En base a lo expuesto en apartados anteriores, se describirá el procedimiento a seguir para desarrollar un inventario de emisiones por fuentes vehiculares, utilizando el modelo IVE para el ajuste de factores de emisión a las condiciones específicas de una localidad. Se plantean también, los procedimientos que se podrían aplicar en la ciudad de Cuenca con el objeto de estimar emisiones por fuentes móviles y levantar un inventario actualizado.

### **5.1. Variables que intervienen en el cálculo de factores de emisión a través del modelo IVE.**

Los factores de emisión vehiculares son relaciones funcionales entre la cantidad de contaminante emitido por la distancia conducida, energía o combustible consumidos (Franco, 2013). La estimación de dichos factores depende de las características descritas en el apartado 3.1. Asimismo, los patrones de conducción tienen un impacto significativo para la corrección de factores de emisión, ya que ofrecen la posibilidad de aproximar el cálculo gracias a datos sobre velocidad, usos del vehículo, arranques en frío y caliente, etc.

El concepto de poder específico vehicular (VSP) es un término utilizado en procesos de evaluación de emisiones vehiculares, es una relación entre la suma de las cargas resultantes del arrastre aerodinámico, aceleración, resistencia a la rodadura y pendiente dividido para la masa vehicular; usualmente es expresado en kilowatts por tonelada y representa la demanda de potencia instantánea del vehículo dividida por su masa (Franco, 2013). El VSP constituye un dato de relevancia para el cálculo de emisiones a través del modelo IVE.

La calidad de la aplicación de cualquier modelo de emisiones vehiculares, depende de la representatividad de los factores de emisión que éstos contengan (Franco, 2013), esto se

refiere, a la precisión con la cual los factores de emisión describen el nivel real de emisión, de un tipo de vehículo en particular a través de una condición de conducción.

### **5.2. Modelo IVE, descripción de datos de entrada.**

La metodología de estimación indirecta de contaminantes incluye varios tipos de softwares de cálculo, el modelo internacional de emisiones vehiculares IVE, es un modelo informático que permite predecir las emisiones de contaminantes y gases de efecto invernadero provenientes de vehículos automotores, puede considerar las emisiones del escape, así como las evaporativas.

Desarrollado con el enfoque de ser programado para calcular emisiones en cualquier región, constituye un instrumento versátil para estimar la cantidad de contaminantes producida por la flota vehicular circulante. Requiere esencialmente de insumos con información sobre actividad y composición vehicular que pueden ser obtenidas con base en la teoría expuesta en las secciones 3 y 4, aprovechando el dato de VSP que permite evaluar detalladamente el comportamiento de un vehículo en circulación.

El proceso de predicción de emisiones en el modelo IVE comienza con la base de factores de emisión predeterminados y un conjunto de factores de corrección que se aplican para ajustar el cálculo de las emisiones contaminantes en la ciudad de estudio (ISSRC, 2008). De manera general el proceso de estimación de emisiones en el modelo consiste en multiplicar la base de factores de emisión por cada uno de los factores de corrección y por la distancia-vehículo para cada tecnología.

### **5.3. Procedimiento para la elaboración del inventario de emisiones por fuentes vehiculares.**

En esta sección se planteará la metodología que permitirá desarrollar el inventario de emisiones, se establecerán los lineamientos que se deben seguir para la recolección de información referente a las tres variables que requiere el modelo IVE.

### 5.3.1. Planteamiento de la metodología.

El principal problema para la elaboración de inventarios de emisiones se centra en la disponibilidad de datos relacionados a actividad y flota vehicular. Para procurar precisión en el cálculo se requiere conocer de forma detallada la información referente a las variables requeridas por el modelo IVE, luego a través de la combinación con los factores de corrección, se pueden estimar con aproximación las tasas de emisión de las categorías que integran la flota vehicular de la ciudad. En la Figura 5-1 se ilustra la metodología general para la elaboración de un inventario de emisiones por fuentes vehiculares utilizando el modelo IVE.

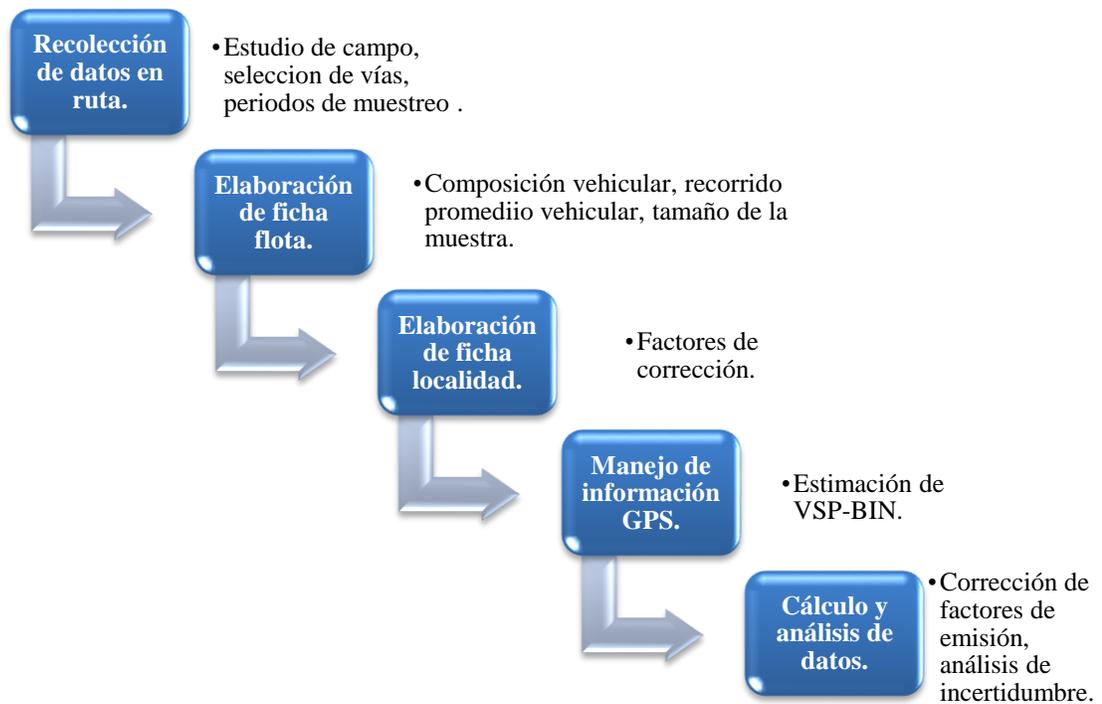


Figura 5-1: Esquema de la metodología propuesta para elaborar un inventario de emisiones utilizando el modelo de emisiones IVE.

Fuente: Sebastián Urgiles.

### 5.3.2. Recolección de datos en ruta.

Limitar el área y duración del estudio de campo, las variables de composición vehicular y recorrido promedio se recolectarán en un periodo establecido y programado con actividades que serán ejecutados por un equipo de trabajo capacitado. El conteo de tráfico

directo, se desarrollará utilizando cámaras de video digital; asimismo, para realizar la medición de parámetros relacionados a los patrones de conducción, se deberá disponer de equipos de posicionamiento global o GPS y monitores de arranque VOCE. Para la realización del estudio de campo se deberá considerar la metodología descrita en la sección 3.3.1.2.

**a. Procedimiento para estructurar el estudio de campo:**

- Investigar y analizar información respecto a estudios sobre la planeación de la movilidad en el área de interés.
- Dividir el área en tres zonas convenientes para la distribución de las tareas de captación de información.
- Analizar y seleccionar las principales vías de circulación vehicular, distribuidas en tres sectores de la ciudad: norte, centro y sur.
- Considerar la representatividad de vías por flujo vehicular y actividad comercial.
  - Utilizar el plan de movilidad de la ciudad de estudio.
  - Si no existe, solicitar asistencia a autoridades del transporte.
- Determinar el periodo de medición de datos.
  - Recolectar información por dos semanas.
  - Considerar días laborales, feriados y fines de semana.
- Establecer horarios e intervalos de medición para cada ruta.
  - Atendiendo a la afluencia vehicular en cada zona, establecer fracciones de muestreo por cada hora, sólo en el día, durante horas pico y tráfico fluido.

**b. Metodología sugerida para conformar el estudio de campo en Cuenca.**

- Establecer la duración del estudio de campo por 20 días consecutivos, en el horario de 08:00 a 18:00.
- Utilizar el Plan de Movilidad de Cuenca 2015 (PMC), en este estudio contiene información relevante respecto a: estructura vial, volúmenes de tráfico y ocupación de vías.
- El PMC divide a Cuenca en zona norte, centro y sur. Cada zona analiza el grado de saturación vial, según lo cual se pueden definir las vías para el estudio.

### **5.3.3. Elaboración de ficha flota.**

#### **5.3.3.1. Procedimiento para la obtención de datos de composición vehicular.**

La metodología para determinar la composición vehicular incluye dos actividades: la primera consiste en el conteo directo del tráfico en vía y la segunda comprende la obtención de datos a través de una encuesta aplicada a los conductores en las zonas de estudio. A continuación se describen los procedimientos para:

##### **a. Desarrollo del conteo directo del tráfico en vía.**

- Aplicar la metodología para el conteo directo de tráfico en ruta descrita en la sección 3.3.1.1 y 3.3.1.2 numeral 1.
- Utilizar el procedimiento descrito en el apartado 3.3.3.2 numeral 2, con el fin de contrastar y aportar con la información obtenida en el primer inciso.
- Se deberán obtener datos de volumen de tráfico por categoría y volúmenes de tráfico por hora.
- Los resultados de la medición deben expresar una clasificación por categoría vehicular.

##### **b. Procedimiento sugerido para ser aplicado en Cuenca.**

- Utilizar la información del PMC. El PMC indica que la intensidad de tráfico es considerada la característica más relevante de la circulación vehicular, para la recolección de información en video, se pueden utilizar datos de Intensidad Media Diaria de tráfico (IMD) distribuidos en tres periodos pico de tráfico, datos medidos mediante aforos automáticos y manuales representados en el PMC.

##### **c. Procedimiento para la recolección de información por encuestas.**

- Definir el formato de encuesta que será usado para la recolección de información, se deberán diseñar dos encuestas, una para vehículos a gasolina y otra para vehículos a diésel.
- Aplicar la metodología descrita en la sección 3.3.1.2 numeral 3.
- Aplicar las encuestas al número de vehículos calculados en la muestra.

- Las categorías vehiculares definidas y su distribución tecnológica serán analizadas y correlacionadas porcentualmente con sus correspondientes contenidas en el modelo IVE.

**d. Metodología sugerida para el levantamiento de información por encuestas en Cuenca.**

- El PMC establece la distribución de vehículos por zona (norte, centro y sur) atendiendo los viajes por motivo, así como la demanda de estacionamientos debido a situaciones laborales, comerciales y residenciales. Se podría utilizar este análisis para definir las zonas de aplicación de encuestas.
- En el ANEXO A se proponen unos modelos de encuestas que han sido aplicadas en estudios, con los ítems que permiten registrar la información requerida.

**5.3.3.2. Procedimiento para el cálculo de KVR y parámetros de conducción.**

Utilizar los datos obtenidos de la aplicación de la metodología descrita en la sección 5.3.3.1 literal *b*, para relacionarlos junto con la información que será resultante luego de aplicar los siguientes procesos:

**a. Procedimiento para el cálculo de KVR de las categorías vehiculares.**

- Utilizar los datos de KVR anuales obtenidos por las encuestas aplicadas a la muestra vehicular y emplear la Ecuación 4.4 del método descrito en el apartado 4.3.1.
- Las longitudes de carreteras pueden ser proporcionadas por organismos del transporte, obras públicas, cartografías digitales etc.
- Relacionar los valores de KRV obtenidos con la información obtenida del proceso 5.3.3.1 literal *a*.

**b. Proceso para obtener patrones de conducción.**

- Utilizar un grupo de vehículos representativos de la muestra vehicular calculada.
- Cada categoría vehicular será representada con tres vehículos.
- Equipar la muestra vehicular con unidades GPS y monitores de arranque VOCE.

- El recorrido será efectuado en las rutas seleccionadas a lo largo de los sectores establecidos: norte, centro y sur.
- La selección de rutas depende de la afluencia vehicular, topografía, número de viajes, motivos de viaje etc. y serán establecidas según la información contenida en los estudios de movilidad; si no existen tales, se recomienda muestrear en las nueve vías utilizadas para el conteo directo de tráfico.
- El periodo de muestreo debe coincidir con la duración del estudio de campo, se desarrollará en horarios de flujo vehicular regular y horas pico.
- Los conductores deberán ajustarse a las condiciones normales de circulación de cada vía y en cada horario, con la finalidad de captar información aproximada a la realidad.

**c. Metodología sugerida para recopilar información de actividad vehicular en Cuenca.**

- Aplicar el procedimiento descrito en el apartado 5.3.3.2 literal *b*, para obtener información de parámetros de conducción, referirse al PMC con el objeto de identificar rutas que sirvan para el desarrollo de las rutas de conducción que recorrerán los tres vehículos de cada categoría.
- Las rutas de conducción deben ser representativas al incluir vías saturadas y subutilizadas. Esta información esta ilustrada en el PMC.
- Aplicar el procedimiento descrito en el apartado 5.3.3.2 literal *a*, para determinar KRV en Cuenca.

**5.3.3.3. Procedimiento para la obtención de la muestra vehicular.**

Se sugiere utilizar la metodología propuesta por (Cárdenas, J. Kaslin, 2006) para la Caracterización Tecnológica del Parque Vehicular del DMQ (Distrito Metropolitano de Quito). Este análisis estadístico estuvo compuesto por medidas de tendencia central (Media, Mediana, Moda, Varianza, Desviación Estándar) y por histogramas. Por tanto, se compone de las siguientes etapas:

- Estimación del tamaño de la muestra de vehículos de ciclo Otto del DMQ;
- Diseño del formato de la plantilla para la recolección de los datos;
- Recolección e interpretación de los datos.
- Los datos de la cantidad total de vehículos pueden provenir de las siguientes fuentes:
  - Direcciones públicas encargadas de recoger el impuesto sobre tenencia vehicular.
  - Bases de datos de las estaciones RTV instaladas.
  - Estudios desarrollados por las autoridades de transporte.
  - Bases de datos desarrolladas a partir de encuestas realizadas con respecto al uso del transporte.
- Se emplea la ecuación definida por los autores, para conocer el tamaño de muestra  $n$ :

Ecuación 5.1. Metodología para el cálculo del tamaño de la muestra.

$$n = \frac{Z^2 pqN}{N\epsilon^2 + Z^2 pq}$$

Donde:

$N$ : población vehicular conocida

$n$ : tamaño de la muestra

$Z$ : nivel de confianza

$p$ : variabilidad positiva

$q$ : variabilidad negativa

$E$ : precisión o error

- El método consiste básicamente en la determinación del tamaño total de la población, luego lograr definir una muestra vehicular de tamaño  $n$  de dicha población, a continuación el tamaño de la población permite realizar una subdivisión de acuerdo a los criterios y definiciones contenidos en la categorización producto del conteo directo de tráfico en ruta, dicha subdivisión será empleada por el modelo IVE para el ajuste de los factores de emisión en la localidad de interés.

- La subdivisión dará como resultado una cantidad de grupos, la cual se denominará  $Ng$  (número de grupos que conforman la muestra). Una vez definido el tamaño de la muestra, dicho número se dividirá entre la cantidad de grupos que surgen de la clasificación vehicular, para obtener un nuevo número correspondiente a la cantidad de elementos  $NE$  que conforman cada grupo, es decir:

Ecuación 5.2. Cantidad de Vehículos seleccionados para cada categoría.

$$NE = n/Ng$$

$NE$ : cantidad de vehículos por categoría

$n$ : tamaño de la muestra

$Ng$ : Número de grupos en la población

- $NE$  es la cantidad de vehículos que de forma aleatoria serán seleccionados para cada grupo/categoría. Sumados todos los miembros de cada grupo forman la muestra. De esta manera se garantiza que la muestra será significativa y todos los tipos de vehículos de la población total tengan la misma probabilidad de ser seleccionados.

**a. Metodología sugerida para obtener la muestra vehicular en Cuenca.**

- Para Cuenca, como fuente de información preliminar se sugiere utilizar datos del número de vehículos matriculados, registrados en procesos de inspección técnica vehicular (RTV). Esta información puede ser contrastada con los datos de aforamiento vehicular registrados por la Central Semafórica de Cuenca, y que son representados en estadísticas dentro del PMC. Como fuentes de información adicional se puede también referir a los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), encuestas de transportes, que reflejan estadísticas en números por categoría vehicular en el casco urbano de Cuenca.
- Aplicar el procedimiento descrito en la sección 5.3.3.3, para determinar la cantidad de vehículos que componen la muestra vehicular y la distribución en número de vehículos por categoría.

#### **5.3.4. Elaboración de ficha localidad.**

- a. El modelo de emisiones IVE durante el cálculo de factores de emisión, ajusta los valores de factor de emisión a través de la multiplicación de los mismos por valores de corrección que representan las condiciones ambientales específicas y de entorno en el cual circula la flota vehicular a analizar.

Las variables descritas tienen incidencia directa e intervienen en el cálculo de emisiones por el modelo IVE (ISSRC, 2008), éstas están descritas en el Manual de Usuario del Modelo IVE.

- b. Los parámetros de ubicación geográfica de Cuenca pueden ser obtenidos convenientemente del organismo municipal denominado como la Comisión de Gestión Ambiental de Cuenca (CGA).

#### **5.3.5. Manejo de información GPS.**

Toda la información captada durante el estudio de campo por las unidades GPS y VOCE deberá ser analizada y adecuada para ser introducidas al modelo IVE. Esta información permitirá calcular los valores de VSP-BIN necesarios para la corrección de factores de emisión. Para esto se ofrecen dos tipos de metodologías para el manejo y clasificación de información, las cuales son:

- I. Obtener y ordenar los valores captados a través de herramientas computacionales, como MATLAB, que permitirá obtener datos promedio de los captados en ruta por GPS.
- II. Emplear el software diseñado exclusivamente para calcular directamente los 60 valores de VSP-BIN, fue desarrollado por la ISSCR y denominado “*Speed Emission Evaluation*”, es de aplicación única para el modelo IVE.

Ambos parámetros pueden obtenerse conociendo el tipo de vehículo y una tasa de velocidad y altitud segundo a segundo.

### **5.3.6. Cálculo y análisis de la incertidumbre.**

Una vez recopilada y procesada la información necesaria para el cálculo de factores de emisión ajustados, se deberá preparar el modelo IVE para el ingreso de datos. En el Manual de Usuario del IVE se detallan los criterios y características de cada ficha que aparecen en la interfaz del software, y en las que se ingresarán datos específicos y la información recopilada para la corrección de factores de emisión.

Los resultados obtenidos deberán reflejar una aproximación real de la tasa de cantidad contaminante emitido por unidad de distancia recorrida, para cada categoría vehicular de la muestra seleccionada. Estos resultados se pueden extrapolar al total de la flota vehicular en la ciudad de estudio, y así obtener el inventario de emisiones por fuentes vehiculares.

Los valores de contaminantes emitidos pueden ser interpretados y utilizados por autoridades ambientales para establecer acciones de control para las fuentes que contribuyen mayormente a la carga contaminante emitida. Por ello, es importante evaluar la validez de la información proporcionada por el modelo de estimación de emisiones IVE, para lo cual se analizarán y compararan con los resultados de estimaciones precedentes.

#### **5.3.6.1. Análisis de la incertidumbre.**

La información de valores de la carga contaminante por la flota vehicular debe ser evaluada para asegurar la valía de la metodología empleada (Quiñones, 2012). Esto permitirá identificar puntos críticos que se deberán considerar para alcanzar mejoras de estimación a futuro.

La incertidumbre de los inventarios de emisiones de fuentes móviles según (Quiñones, 2012), está dada por:

- Uso de factores de emisión predeterminados en los modelos de cálculo y que pueden ser inapropiados para el entorno local o regional.
- Errores en la estimación de factores de emisión locales, donde se requiere información de tipos de vehículos y categorización, tecnología de control de la contaminación, estado de los vehículos, hábitos de conducción, entre otros.
- Incertidumbres al estimar los factores de actividad (velocidad promedio, distancia recorrida), por cada categoría de vehículos.

- Errores en la estimación de la flota activa del dominio elegido para realizar el inventario.

### **5.3.6.2. Metodologías de evaluación de la incertidumbre.**

Existen dos metodologías de evaluación de inventarios, internas (bottom-up) y externas (top-down). Una evaluación interna requiere una revisión de los protocolos de recopilación de datos, estudio de las incertidumbres de los datos de entrada al modelo, evaluación del modelo de estimación seleccionado, análisis de sensibilidad y típicamente demanda mucho tiempo y dinero, siendo aplicable por lo general durante la construcción de un inventario.

Una evaluación externa emplea información independiente, pero relacionada al inventario, por ejemplo puede emplear tendencias de concentraciones de una red de monitoreo de calidad del aire. Este tipo de evaluación implica menor tiempo, menor esfuerzo y menos recursos, por lo cual es ampliamente usado (Quiñones, 2012). Los datos de muestreos de contaminantes ambientales son utilizados en la evaluación de inventarios de emisiones, ya que la calidad del aire urbano refleja las emisiones generadas por diversas fuentes y que los resultados obtenidos son totalmente independientes.

### **5.3.6.3. Metodología propuesta para evaluar la incertidumbre de los FE obtenidos por el modelo IVE.**

#### **Evaluación de inventarios de emisiones a través de datos de la red de monitoreo.**

La base de datos que proporciona una red de monitoreo son una fuente importante de información que permite observar la dispersión de contaminantes durante los años y su concentración en los lugares de muestreo. Se deberán analizar la concentración de los contaminantes primarios producidos por la actividad vehicular. Las relaciones de concentraciones de contaminantes de los datos de la red de monitoreo pueden ser comparadas con las emisiones obtenidas en el inventario de emisiones a través del modelo IVE para evaluar su consistencia.

Esta metodología en oposición a otras como la medición directa de emisiones o estudios de túneles, permite evaluar los datos obtenidos por IVE en los sectores representativos de la ciudad que cuentan con datos de muestreos confiables y continuos. En función de lo dicho se propone la metodología planteada por (Quiñones, 2012) para la evaluación de la incertidumbre de los resultados obtenidos en el inventario de emisiones.

Para la ciudad de Cuenca se recomienda evaluar la incertidumbre de los resultados obtenidos a través de la metodología planteada en este estudio, utilizando el procedimiento de evaluación externa a través del análisis de los registros de la calidad del aire de Cuenca contenidos en archivos publicados por la empresa municipal EMOV EP.

## 6. Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones.

### 6.1 Conclusiones:

#### 6.1.1. Sobre las metodologías para definir la composición vehicular.

- La figura 6.1 presenta el flujograma que expone los procedimientos analizados en esta investigación para la recolección de información para la elaboración del inventario de emisiones por fuentes vehiculares usando el IVE.
- Las metodologías expuestas en los distintos estudios tienen la capacidad de analizar y clasificar la flota vehicular urbana de una ciudad en función del detalle de la información que se pretende captar.
- La correlación porcentual entre las categorías vehiculares identificadas y las establecidas por defecto en el modelo, permite agrupar convenientemente los grupos vehiculares más representativos, siendo el punto de partida de la población a la que se aplicarán las encuestas.
- El empleo de estadísticas de bases de datos manejadas por instituciones del transporte marcan el punto de partida para discernir las características de los grupos vehiculares más numerosos que circulan en la ciudad de estudio.
- El procesamiento de la información recolectada debe ser manejado tomando en cuenta el propósito de la clasificación vehicular; las características tecnológicas son un aspecto relevante de consideración así como el año modelo del vehículo consultado en encuesta.
- El contraste de la información captada y procesada físicamente con la base de datos estática de procesos de inspección y matriculación vehicular, constituye un paso hacia el análisis de la incertidumbre de la metodología empleada para la clasificación vehicular.

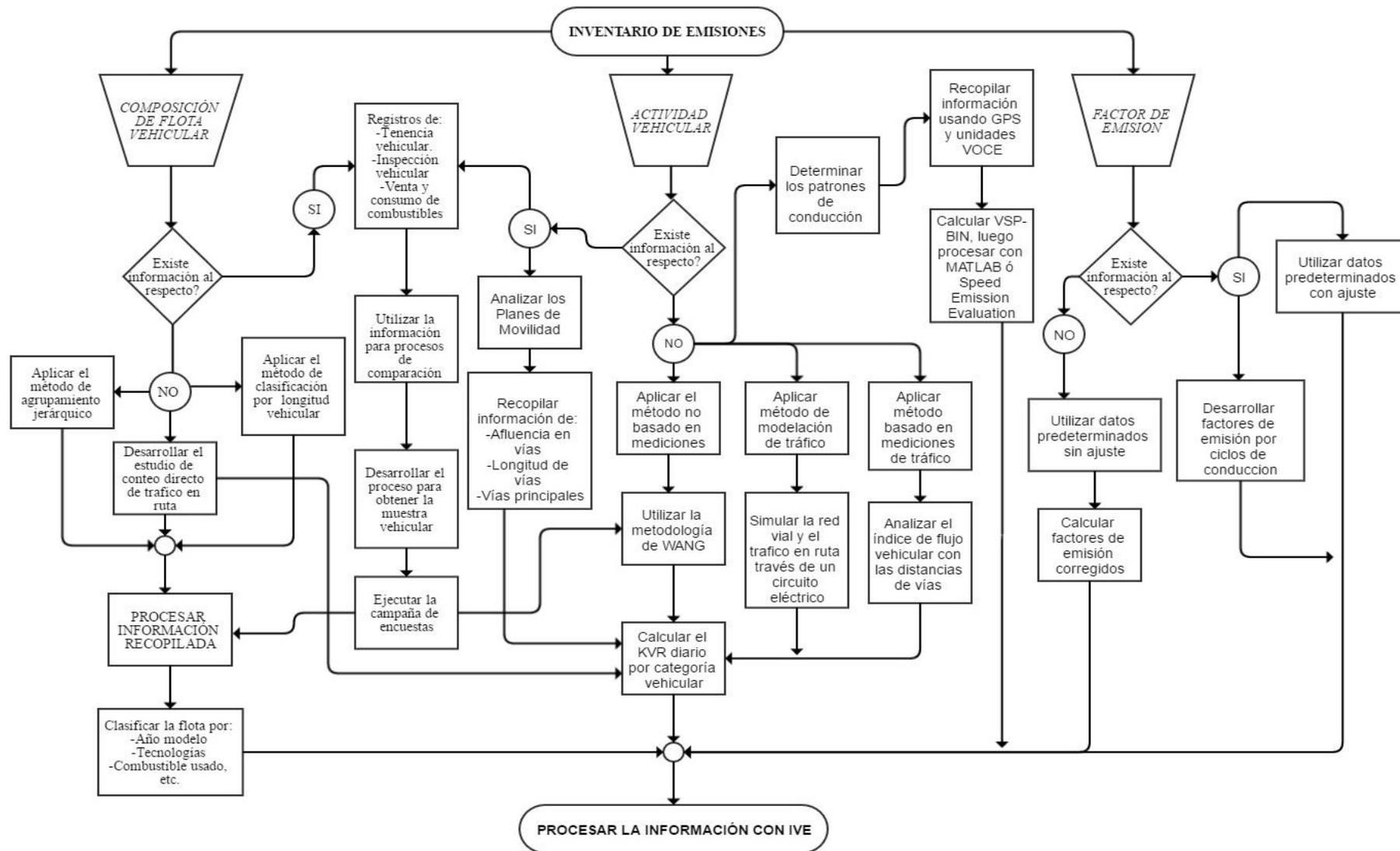


Figura 6-1: Esquema de la metodología propuesta para obtener información que será procesada por el modelo de emisiones IVE.  
Fuente: Sebastián Urgiles.

### **6.1.2. Sobre las metodologías de estimación de KRV.**

- En la presente investigación se exponen las formas de medición del indicador de vehículo-kilómetro recorrido, asimismo se indica la complejidad inherente de su estimación en cada técnica utilizada.
- Los métodos experimentados en otras ciudades expresan las variaciones particulares de medición de acuerdo con la información de cada ciudad, esto deviene en ventajas y desventajas según el enfoque que tiene el método para la captación de información.
- Es importante decir que mientras más verídicos sean los resultados obtenidos a través de un método, mejor será la estimación de emisiones; al respecto, la metodología de lectura de odómetro sería la más adecuada.
- Los puntos de muestro en cada zona deben ser cubiertos y explorados en función de la actividad vehicular localizada para garantizar representatividad de los resultados.

### **6.1.3. Sobre la elaboración de inventarios de emisiones.**

- Existe una relación inversa entre la incertidumbre de los resultados obtenidos en un inventario de emisiones y la metodología, costos e infraestructura utilizada para su desarrollo.
- Las metodologías utilizadas como herramientas para la estimación de emisiones vehiculares serán siempre elegidas en base al propósito final del inventario.
- En los estudios presentados en ésta investigación, los resultados fueron obtenidos con niveles de incertidumbre aceptables, todo en función de la etapa de recolección de datos.
- La metodología de elaboración de inventarios sugiere utilizar un modelo de estimación indirecta, alimentado con información local obtenida y procesada a través de los métodos experimentados en otras ciudades, para que los resultados obtenidos reflejen las condiciones de emisión locales.

- Con el empleo de la metodología propuesta y la herramienta informática que constituye el modelo IVE, adaptado a las condiciones vehiculares de la ciudad se podrán extrapolar los resultados de la muestra a nivel macro.
- La metodología propuesta es escalable y susceptible a mejoras en cuanto a la metodología de análisis en video para clasificación vehicular y la estimación del indicador de kilometraje vehicular recorrido.
- Las técnicas referentes al análisis de la incertidumbre pueden combinarse con el fin de procurar un aseguramiento de la calidad de la información resultante del cálculo de emisiones.
- El análisis de la incertidumbre de manera cualitativa conlleva a resultados concisos respecto a la estimación realizada, por el contrario un análisis cuantitativo involucra un proceso estadístico complejo.

## **6.2 Recomendaciones:**

### **6.2.1. Para la metodología propuesta.**

- Los organismos afines al transporte en conjunto deberían desarrollar e implementar planes de recopilación de información referente a actividad vehicular y composición de flota de manera continua sistemática.
- Se recomienda explotar la infraestructura actual de monitoreo de tráfico por cámara, para la grabación en video del flujo vehicular en las vías principales.
- La información contenida en estudios previos de tráfico o planes de movilidad, son un aporte esencial para identificar las características que rigen la circulación vehicular en la ciudad de estudio.
- Utilizar softwares de análisis por modelación para el procesamiento de información relativa a flujos de tráfico, de esta forma se lograría precisar la obtención de información medida por los distintos métodos.

### 6.3 Bibliografía:

- Anderson, E. L. (1990). *Control de la contaminación en EE. UU.*
- Cárdenas, J. Kaslin, J. (2006). *Caracterización Tecnológica del Parque Automotor del Distrito Metropolitano de Quito y Propuesta para la Reforma de la Normativa Ecuatoriana de emisiones de fuentes móviles terrestres.*
- Carrie Malcolm, Theodore Younglove, Matthew Barth, and N. D. (2001). *Analysis of Spatial Variability in Vehicle Activity Patterns and Vehicle Fleet Distributions.*
- Clean Air, I. (2013). *Metodologías para la estimación de emisiones de transporte urbano de carga y guías para la recopilación y organización de datos.*
- Davis, N., Lents, J., Osses, M., Nikkila, N., & Barth, M. (2005). *Development and Application of an International Vehicle Emissions Model.*
- EMOV EP, Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Cuenca (2014). *Informe de la calidad del aire de Cuenca, año 2014 Cuenca-Ecuador.*
- EMOV EP, Red de Monitoreo de la calidad del Aire de Cuenca. (2014). *Resumen del inventario de emisiones atmosféricas del cantón Cuenca, año 2011. Cuenca-Ecuador.*
- Giraldo, L. (2005). *Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá.* Retrieved from [http://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis\\_2006\\_primer\\_semestre/00006639.pdf](http://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis_2006_primer_semestre/00006639.pdf).
- Góngora, J. (2012). *Indicador Kilómetros- Vehículo Recorridos ( KVR ).*
- International Radian. (1997). *Manuales del programa de inventarios de emisiones de*

*Mexico. Vol IV - Desarrollo de inventarios de emisiones de vehículos automotores, 1–126. [http://doi.org/DCN 97-670-017-05](http://doi.org/DCN%2097-670-017-05)*

ISSRC. (2008). *Manual del Usuario del Modelo IVE Versión 2.0.*

Jaya, J. L., & Vásquez, J. L. (2012). *Análisis comparativo de la contaminación atmosférica producida por la combustión en ladrilleras artesanales utilizando tres tipos de combustibles.*

Martinez, H. (2010). *Estudio de emisiones y características vehiculares en ciudades mexicanas.*

Ministerio del Ambiente de Ecuador (2011). *Norma de calidad del aire ambiente o nivel de inmision.* Retrieved from <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/Acuerdo-50-NCA.pdf>

Ntziachristos, L., Samaras, Z. (2000). *Sampling Conditions Effects on Real-Time Particulate Measurements from a Light Duty Vehicle.*

Ntziachristos Z. et. al. (2000). *Sampling Conditions Effects on Real-Time Particulate Measurements from a Light Duty Vehicle, SAE Transactions 2000-01-2049.*

Quiñones, L. (2012). *Evaluación de los inventarios de emisiones de fuentes móviles de Bogotá mediante datos de la red de calidad de aire.*

Saija, S. (2002). *A methodology for the estimation of road transport air emissions in urban areas of Italy.*

Sbarato, D. et. al. (2009). *Emisiones de Contaminantes en el Aeropuerto internacional Córdoba. Argentina.*

Secretaria de Ambiente de Mexico. (2007). *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca*.

Sheng-Guo Wang, Senior Member, IEEE, Libin Bai, Xun Bao, Y. L. and G. C. (2011). *Novel Estimation Method of Community AADT and VMT via Circuit Network Models and Simulation*.

Toro-Gómez, María Victoria; Quiceno-Rendón, D. M. (2015). *Energy demand and vehicle emissions estimate in Aburra Valley from 2000 to 2010 using LEAP model*. *Dyna*, 82(189), 45–51.  
<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n189.41991>

Torres L. Urvina H. (2008). *Determinación de los factores reales de emisión de los motores ciclo OTTO en la ciudad de Quito*. Universidad Politécnica Nacional.

Vicente Franco, Marina Kousoulidou, Marilena Muntean, L. N., & Stefan Hausberger, P. D. (2013). *Road vehicle emission factors development: A review*.

Wang, H., Chen, C., Huang, C., & Fu, L. (2008). *On-road vehicle emission inventory and its uncertainty analysis for Shanghai, China*. *Science of the Total Environment*, 398(1–3), 60–67. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.01.038>

**ANEXO 1**

Formato sugerido para la recolección de datos básicos por encuestas.

**OTTO**

PLACA  NÚMERO DE CILINDROS

**TRANSMISIÓN**

MANUAL  AUTOMÁTICA  SECUENCIAL

**SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE**

CARBURADOR  INYECCION MECANICA  INYECCION ELECTRONICA

} MPFI   
} TBI

**SISTEMA DE ENCENDIDO**

CONVENCIONAL  ELECTRONICO CON DISTRIBUIDOR  DESCARGA CAPACITIVA   
BOBINA INDEPENDIENTE  DIS

**SISTEMA DE CONTROL DE EMISIONES**

PCV  CANISTER  CATALIZADOR  SONDA LAMBDA   
#  #

**NEUMÁTICOS** #

---

**DIESEL**

PLACA  NÚMERO DE CILINDROS

**TRANSMISIÓN**

MANUAL  AUTOMÁTICA  SECUENCIAL

**SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE**

BOMBA DE LEMENTOS EN LINEA BOMBA ROTATIVA

Mecánica <input type="checkbox"/>	Mecánica <input type="checkbox"/>
Asistida electrónicamente <input type="checkbox"/>	Asistida electrónicamente <input type="checkbox"/>
Electrónica <input type="checkbox"/> Tipo _____	Electrónica <input type="checkbox"/> Tipo _____

**SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AIRE**

ATMOSFERICOS  CON TURBO

} Sin Intercooler   
} Con Intercooler

**SISTEMA DE CONTROL DE EMISIONES**

EGR  CATALIZADOR  FILTRO DE PARTICULAS

**NEUMÁTICOS** #

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

---