

FACTORES DE EMISIÓN POR EFECTO DE LA MOVILIDAD VEHICULAR EN
CIUDADES CON SIMILARES CONDICIONES A CARTAGENA DE INDIAS,
COLOMBIA.



LUIS CARLOS ALANDETE BONFANTE
INGENIERO CIVIL

DIANCARLOS ROMERO BENÍTEZ
INGENIERO CIVIL

DEPARTAMENTO DE POSTGRADOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍAS DE VÍAS TERRESTRES
UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

CARTAGENA D.T. Y C.

AGOSTO 2016

FACTORES DE EMISIÓN POR EFECTO DE LA MOVILIDAD VEHICULAR EN
CIUDADES CON SIMILARES CONDICIONES A CARTAGENA DE INDIAS,
COLOMBIA.



LUIS CARLOS ALANDETE BONFANTE
INGENIERO CIVIL

DIANCARLOS ROMERO BENÍTEZ
INGENIERO CIVIL

DIRECTOR

Ing. EDGAR QUIÑONES BOLAÑOS, MSc., PhD

DEPARTAMENTO DE POSTGRADOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍAS DE VÍAS TERRESTRES
UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

CARTAGENA D.T. Y C.

AGOSTO 2016

CONTENIDO

RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	8
1. INTRODUCCIÓN	10
2. OBJETIVOS.....	12
3. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LOS COMPONENTES GEOMORFOLÓGICOS DE LA CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS	13
3.1. Precipitación.....	14
3.2. Temperatura.....	14
3.3. Humedad Relativa	15
3.4. Brillo Solar.....	16
3.5. Velocidad y Dirección del Viento.....	17
3.6. Cartagena: Hacia una movilidad sostenible	17
3.7. Principales fuentes de emisiones de contaminantes gaseosos a la atmósfera... 18	
3.7.1. Fuentes Móviles:	19
3.7.2. Fuentes Fijas:	19
4. FACTORES DE EMISIÓN EN CIUDADES CON SIMILARES CONDICIONES A LA CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA.....	21
4.1. Determinación de Factores de Emisión de contaminantes en ciudades con similares condiciones a Cartagena de Indias	21
4.1.1. La Habana, Cuba:	21
4.1.2. Delhi, India	27
4.1.3. Montería, Colombia.....	31
4.1.4. Envigado, Colombia.....	33
4.2. Determinación de los factores de emisión generados por el tráfico vehicular en la ciudad de Cartagena.....	37
5. CONCLUSIONES.....	41
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Aforos vehiculares en las principales intersecciones de la ciudad de Cartagena	20
Tabla 2. <i>Comparación de factores de emisión de CO para fuentes móviles en Cuba y los reportados por el Panel Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático (IPCC).</i>	26
Tabla 3. Emisión de gases de efecto invernadero por fuentes móviles.....	33
Tabla 4. Emisiones por categoría vehicular para un día laboral	36
Tabla 5. Emisiones utilizadas en el Modelo AERMOD	39
Tabla 6.- <i>Cuadro comparativo de estudios de Factores de Emisión por efecto de movilidad Vehicular en Ciudades con similares condiciones a Cartagena de India, Colombia.</i>	40



LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. <i>Ubicación de la ciudad de Cartagena de Indias.</i>	13
Ilustración 2. Precipitación mensual en la ciudad de Cartagena de Indias.....	14
Ilustración 3. Temperatura mensual en la ciudad de Cartagena de Indias.....	15
Ilustración 4. Humedad Relativa mensual en la ciudad de Cartagena de Indias.	16
Ilustración 5. Brillo solar mensual en la ciudad de Cartagena de Indias.	16
Ilustración 6. Velocidades Máximas del viento mensualmente en la ciudad de Cartagena de Indias.....	17
Ilustración 7. Ubicación de la ciudad de La Habana en Cuba.....	22
Ilustración 8. Ubicación de la ciudad de Delhi en India.....	27
Ilustración 9. Número de Vehículos registrados en Delhi, 2012.....	28
Ilustración 10. Ubicación de Montería, Colombia.	31
Ilustración 11. Ubicación de Envigado, Colombia.....	34
Ilustración 12. Emisiones por categoría vehicular para un día laboral.....	36
Ilustración 13. Concentraciones de CO $\mu\text{g}/\text{m}^3$, emitidas por las distintas categorías	38



RESUMEN

Los gases de efecto invernadero son aquellas emisiones de gases provenientes de las actividades o procesos habituales del ser humano, que, si bien es un fenómeno natural, el aumento de su concentración sobre los valores habituales ha incidido en el Calentamiento Global y el cambio climático. Bajo este lineamiento, la valoración de las emisiones atmosféricas en donde se determinen factores de emisión, constituye un elemento necesario previo al establecimiento de políticas y acciones de control de la calidad del aire. Un factor de emisión es entonces una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y una unidad de actividad. (Ministerio de Energía de Chile, 2016). En general la implementación de una política eficiente debe afectar el proceso de elección del modo de transporte, de tal manera que incentive el uso de transporte público sobre el privado. Una política eficiente también busca promover el uso de energías alternativas como fuente de suministro para los automotores, las cuales pueden ofrecer una salida para superar la alta dependencia hacia los combustibles fósiles (Toro Gonzalez, Fernandez López, Soto, & Maza, 2015).

Con la meta de guiar la ciudad de Cartagena de Indias a una movilidad más sustentable y que responda a los retos existentes en la actualidad, como son el cambio climático, la mala calidad del aire y la contaminación sonora de nuestras ciudades (Caño Fernandez et al, 2012), el objetivo fundamental del presente trabajo investigativo radicó en la realización de un análisis comparativo del factor de emisión de gases contaminantes a consecuencia de la movilidad vehicular, determinado en ciudades con características similares a Cartagena de Indias, para aportar un punto de referencia en la estimación de éstos factores en la ciudad. Los parámetros que se tuvieron en cuenta para determinar ciudades similares a Cartagena de Indias fueron las condiciones climáticas y el flujo vehicular, por lo que según el trabajo investigativo fueron tomada como objeto de estudio los trabajos ya realizados en La Habana (Cuba), Delhi (India), Montería (Colombia) y Envigado (Colombia).

Este análisis arrojó que es recomendable que en Cartagena pueda implementarse el Modelo IVE, aplicado con anterioridad en Montería y Envigado, dado a que es un modelo que ha sido desarrollado para la determinación de factores de emisión en ciudades utilizando principalmente factores de emisión desarrollados a partir del ciclo de conducción y que tiene



FACTORES DE EMISIÓN POR EFECTO DE LA MOVILIDAD VEHICULAR EN CIUDADES CON SIMILARES CONDICIONES A CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA



la capacidad de ajustarse a la realidad de las características observadas de la ciudad para la cual se elabora el estudio.



ABSTRACT

Greenhouse gases are those gaseous emissions from activities or normal processes of the human being, that although is a natural phenomenon, increasing its concentration on common values has influenced global warming and climate change. Under this guideline, the assessment of atmospheric emissions where emission factors are determined, is a prerequisite to the establishment of policies and actions to control air quality necessary element. An emission factor is then a ratio of pollutant emitted into the atmosphere and an activity unit. (Ministry of Energy of Chile, 2016). In general, the implementation of an efficient policy should affect the process of choosing the mode of transport, so that encourages the use of public transport over private. An efficient policy also seeks to promote the use of alternative energy as a source of supply 2 for motor vehicles, which can offer a way out to overcome the high dependence on fossil fuels. (Toro Gonzalez, Fernandez Lopez Soto, & Maza, 2015).

With the goal of guiding the city of Cartagena de Indias to a more sustainable mobility and to respond to existing challenges today, such as climate change, poor air quality and noise pollution in our cities (Caño Fernandez et al, 2012), the fundamental objective of this investigative work lay in conducting a comparative analysis of the emission factor of pollutant gases resulting from vehicular mobility, particularly in cities like Cartagena de Indias characteristics, for provide a reference point in the estimation of these factors in the city. The parameters taken into account in determining similar cities to Cartagena de Indias were the weather conditions and traffic flow, so that according to the research work were taken as an object of study work already done in Havana (Cuba), Delhi (India), Monteria (Colombia) and Envigado (Colombia).

This analysis showed that it is recommended that in Cartagena can be implemented the IVE model, applied previously in Monteria and Envigado, since it is a model that has been developed for determining emission factors in cities mainly



FACTORES DE EMISIÓN POR EFECTO DE LA MOVILIDAD VEHICULAR EN CIUDADES CON SIMILARES CONDICIONES A CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA



using emission factors developed from driving cycle and has the ability to adjust to the reality of the observed characteristics of the city to which the study is made.



1. INTRODUCCIÓN

La importancia de la movilidad urbana sobre el desarrollo sostenible ha sido cada vez más reconocido en los últimos años, en tal magnitud que, desde finales del siglo XX, varios países han adoptado políticas de forma urbana en planificación ambiental (Buijs, 1991). Así, con el aumento exponencial de la producción, comercialización y uso de vehículos automotores a nivel mundial se hace necesaria la implementación de programas o metodologías para disminuir la contaminación generada por la emisión de gases que estos generan producto de los procesos de combustión inherente a su funcionamiento.

De esta forma, una buena parte de las emisiones de gases de efecto invernadero, son producto de las actividades humanas. El dióxido de carbono (CO₂), gas de efecto invernadero en segundo lugar de importancia, está generado en un 75% por la producción y el uso de Combustibles Fósiles. (Álvarez Narvaez, 2015). Es así, que para obtener la energía que contienen los combustibles fósiles y convertirla en vapor, electricidad y movimiento, es necesario someter los combustibles al proceso de combustión. En este proceso los constituyentes del combustible se oxidan, liberando a la atmósfera principalmente dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Bajo estos lineamientos, la valoración de las emisiones atmosféricas en donde se determinen factores de emisión, constituye un elemento necesario previo al establecimiento de políticas y acciones de control de la calidad del aire. Un factor de emisión es entonces una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y una unidad de actividad. (Ministerio de Energía de Chile, 2016)

Cartagena de Indias, capital del departamento de Bolívar, es una ciudad al norte de Colombia ubicada sobre la orilla del mar Caribe; está caracterizada por ser epicentro de convergencias culturales y portadora de una potencia industrial que va en ascenso, que la posiciona como la primera ciudad industrial del Caribe y la quinta a nivel nacional. En este contexto y sumado el incremento demográfico se ha incidido en el



FACTORES DE EMISIÓN POR EFECTO DE LA MOVILIDAD VEHICULAR EN CIUDADES CON SIMILARES CONDICIONES A CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA



aumento desproporcionado del parque automotor, que entre los años 2011 y 2012 pasó de 60.582 vehículos a más de 73.392 (Molinello, 2012) y está lejos de variar la tendencia que afecta directamente a la contaminación del aire. Lo anterior hace necesario estimar las emisiones generadas y desarrollar planes para la modelación de la calidad del aire, que incluya la estimación de los factores de emisión de fuentes móviles ligada a las características propias de la zona.

Actualmente, se ha venido adelantando en el Grupo de Investigación de Modelación Ambiental GIMA de la universidad de Cartagena estudios previos para determinar los factores de emisión de contaminantes y las metodologías para su estimación, por lo que esta investigación, será un aporte que expondrá un punto de referencia basado en los estudios ya realizados en ciudades que tengan similares condiciones geomorfológicas a la ciudad de Cartagena de Indias.



2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Realizar un análisis comparativo del factor de emisión de gases contaminantes a consecuencia de la movilidad vehicular, determinado en ciudades con características similares a Cartagena de Indias, para aportar un punto de referencia en la estimación de éstos factores en la ciudad.

2.2 Objetivos Especificos

- ✓ Describir desde el punto vista climatológico y vehicular cuales son las ciudades del mundo similares a Cartagena de Indias, que cuenten con estudios de estimación del factor de emisión.
- ✓ Identificar modelos, variables y elementos usados en la estimación del factor de emisión en las ciudades con características similares a la ciudad de Cartagena de Indias.
- ✓ Plantear recomendaciones para posteriores estudios en la ciudad de Cartagena de Indias en materia de determinación del factor de emisión de ésta, para que se logren desarrollar políticas, procesos de modelación de control de la calidad del aire y acciones referente a estas.



3. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LOS COMPONENTES GEOMORFOLÓGICOS DE LA CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS

El Distrito de Cartagena de Indias está localizado al norte de Colombia (Ver *Ilustración 1.*), sobre el Mar Caribe dentro de las coordenadas 10 o 26' de latitud norte y 75 o 33' de longitud oeste. Es la capital del Departamento de Bolívar, se encuentra a una distancia aérea de 600 kilómetros y por carretera de 1.204 Km. De Bogotá, Capital de Colombia; a 89 de Barranquilla, 233 de Santa Marta; y 705 de Medellín. El territorio Distrital está compuesto por una serie de islas, penínsulas y cuerpos interiores de agua, que conforman el área insular y un área continental. Estas condiciones y la presencia de los Decreto No 0977 de 2001 “Por medio del cual se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias” 4 cuerpos de agua, hacen de Cartagena una ciudad con características morfológicas especiales y un hermoso paisaje natural pero al mismo tiempo lo constituyen en un sistema de gran fragilidad ambiental (Alcaldía de Cartagena, 2001).

Ilustración 1. Ubicación de la ciudad de Cartagena de Indias.



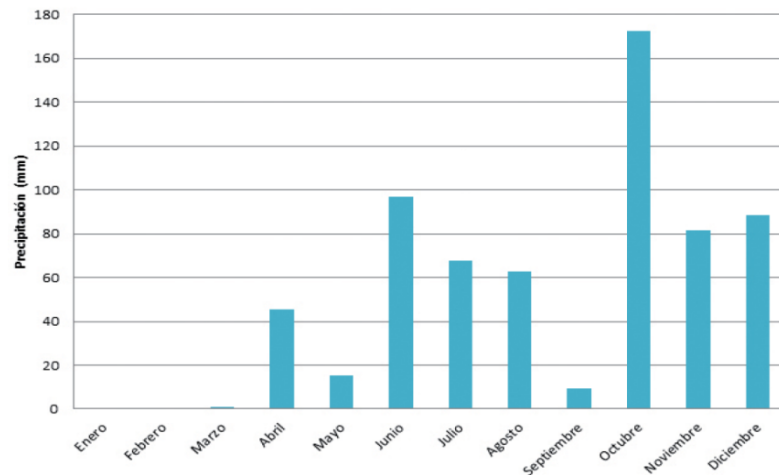
Fuente. Google Earth



3.1. Precipitación (Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cartagena y Secretaria de Planeación Distrital de la Alcaldía de Cartagena, 2010)

El régimen de lluvias que se presenta en la ciudad de Cartagena se debe principalmente a tres factores: su posición, el régimen de vientos Alisios y la influencia del Cinturón de Convergencia Intertropical (CIT). En general pueden ser apreciados tres periodos con diferentes precipitaciones (Ver **Ilustración 2**).

Ilustración 2. Precipitación mensual en la ciudad de Cartagena de Indias.



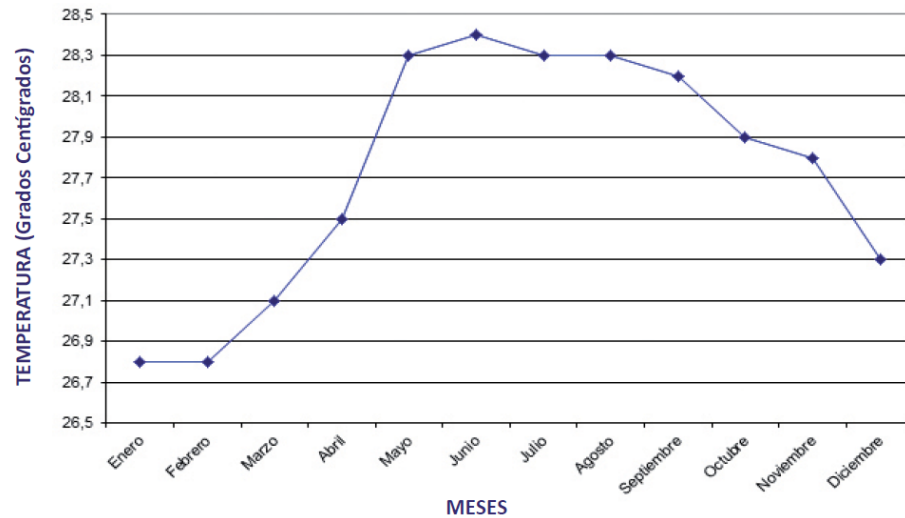
Fuente. (Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cartagena y Secretaria de Planeación Distrital de la Alcaldía de Cartagena, 2010)

3.2. Temperatura (Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cartagena y Secretaria de Planeación Distrital de la Alcaldía de Cartagena, 2010)

La temperatura media multianual en Cartagena es de 27,7°C (3) y varía desde los 27,5°C en los primeros meses del año hasta los 28,9 – 29,1°C entre mayo y septiembre, para descender hacia finales del año. Los mayores valores se registran durante el mes de mayo (época de transición), alcanzando los 33°C. Durante la época húmeda la tendencia de este parámetro es a descender, debido a aumentos sensibles de la nubosidad (Ver **Ilustración 3**).



Ilustración 3. Temperatura mensual en la ciudad de Cartagena de Indias



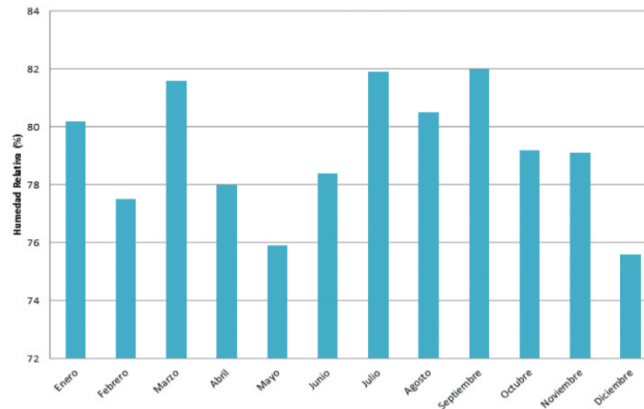
Fuente. (Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cartagena y Secretaria de Planeación Distrital de la Alcaldía de Cartagena, 2010)

3.3. Humedad Relativa (Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cartagena y Secretaria de Planeación Distrital de la Alcaldía de Cartagena, 2010)

Para 2009 el mayor nivel de humedad se registra, según información del CIOH, en el mes de septiembre con 82%, y los de menor humedad son febrero y marzo con 77.5%, así mismo la media anual es de 79,5% (Ver **Ilustración 4**).



Ilustración 4. Humedad Relativa mensual en la ciudad de Cartagena de Indias.

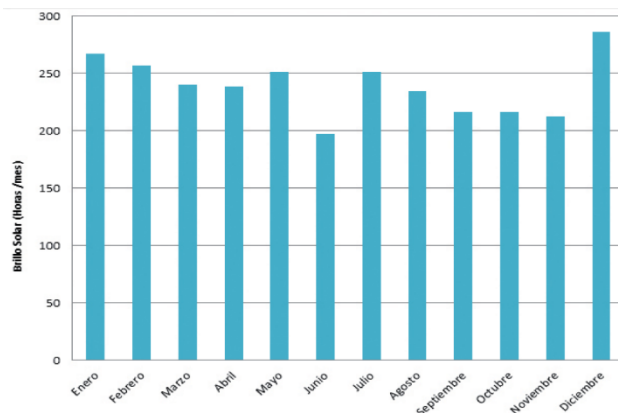


Fuente. (Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cartagena y Secretaria de Planeación Distrital de la Alcaldía de Cartagena, 2010)

3.4. Brillo Solar (Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cartagena y Secretaria de Planeación Distrital de la Alcaldía de Cartagena, 2010)

En Cartagena se presenta una media mensual de 230 horas de sol. La distribución dentro del año de la situación promedia mensual sigue una tendencia inversa a la precipitación, alcanzando los máximos valores en el primer semestre del año y los más bajos a mediados del segundo semestre, en plena época lluviosa. (Ver **Ilustración 5**).

Ilustración 5. Brillo solar mensual en la ciudad de Cartagena de Indias.



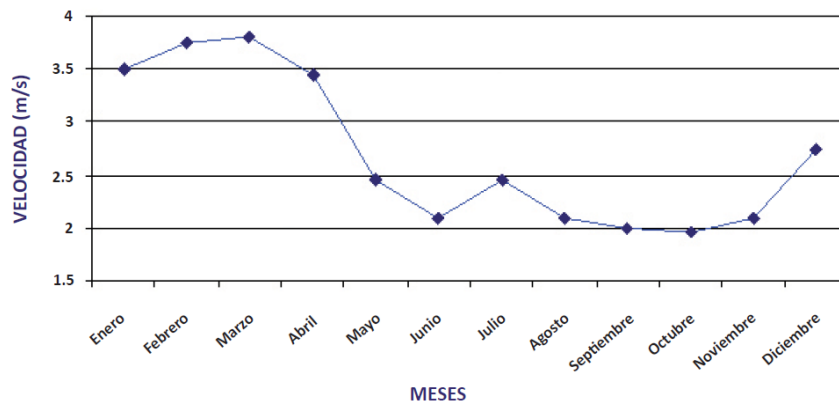
Fuente. (Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cartagena y Secretaria de Planeación Distrital de la Alcaldía de Cartagena, 2010)



3.5. Velocidad y Dirección del Viento (Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cartagena y Secretaria de Planeación Distrital de la Alcaldía de Cartagena, 2010)

El régimen de vientos se caracteriza por el predominio de los vientos alisios del norte y noreste en la época seca y de los vientos del sur suroeste en la época húmeda. Durante la época seca la ZCIT se encuentra en posición sur, los sistemas subtropicales de alta presión se encuentran al sur de su posición normal, como consecuencia de los alisios soplan con una intensidad más uniforme y pronunciada en toda la región. En la **Ilustración 6** pueden verse las velocidades máximas del viento en el año.

Ilustración 6. Velocidades Máximas del viento mensualmente en la ciudad de Cartagena de Indias.



Fuente. (Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cartagena y Secretaria de Planeación Distrital de la Alcaldía de Cartagena, 2010)

3.6. Cartagena: Hacia una movilidad sostenible

De acuerdo con el documento “Declaración de Lima: Libro Blanco de la Movilidad Urbana Sustentable de América Latina” se considera que la movilidad urbana sustentable es aquella que se enfoca en la satisfacción de las necesidades y expectativas de todas las personas, minimiza las externalidades negativas sociales, económicas y ambientales y contribuye a estructurar ciudades más compactas, seguras, limpias, resilientes, amables, activas y saludables; en suma, con mayor



calidad de vida y competitividad. (Asociación Latinoamericana de Sistemas Integrales para la movilidad urbana sustentable., 2014)

Mediante estudios en Cartagena, las redes integradas de transporte público, potenciadas con corredores de transporte masivo de alto rendimiento como lo es el sistema tipo Transmilenio, han demostrado que aportan sustantivamente a los objetivos de la movilidad sustentable. Los estándares de calidad correspondiente a la norma europea se organizan en ocho dimensiones para facilitar su medición y certificación, de la siguiente manera: disponibilidad, accesibilidad, información, tiempo, confiabilidad, atención al cliente, comodidad, seguridad e impacto ambiental. Bajo estos criterios, el sistema debe considerar elementos como: equidad, desarrollo urbano, salud pública, cambio climático, participación social y comunicación democrática, institucionalidad y estructuración empresarial, financiación y competitividad, recursos humanos e innovación y tecnología. (Toro Gonzalez, Fernandez López, Soto, & Maza, 2015).

Referente al cambio climático, se busca, entre otras cosas, incorporar explícitamente en todos los planes, políticas y acciones de movilidad sustentable iniciativas y esfuerzos mensurables de reducción y mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero, así como de desarrollo de capacidades para la prevención y adaptación frente a los desastres derivados del cambio climático (...), mejorar las tecnologías vehiculares y combustibles para reducir emisiones de carbono (SIBRT, 2014).

3.7. Principales fuentes de emisiones de contaminantes gaseosos a la atmósfera

En la ciudad de Cartagena, son pocos los estudios que se han realizado en materia de contaminación atmosférica, por lo tanto, la información que se tiene con respecto a las fuentes de emisiones de contaminantes a la atmósfera es deficiente o nula. Sin embargo, si se tienen en cuenta las actividades que se desarrollan en la ciudad, es claro que la mayoría de contaminantes emitidos a la atmósfera son producto de



fuentes móviles (tráfico vehicular) y de fuentes fijas (chimeneas ubicadas en la zona industrial de Mamonal y el Bosque). A continuación, se caracterizan cada una de ellas (Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cartagena y Secretaria de Planeación Distrital de la Alcaldía de Cartagena, 2010):

3.7.1. Fuentes Móviles: las emisiones atmosféricas generadas por fuentes móviles en Cartagena de Indias están concentradas principalmente en el casco urbano y en algunos corregimientos, donde el parque automotor conformado, hasta el año 2009, por aproximadamente 42.900 vehículos (DATT, 2009), es responsable de emisiones de material particulado producto del levantamiento de partículas a su paso por las vías; y de emisiones NOX, CO, SOx y PM10 producto de la combustión incompleta de combustibles en los motores de los automóviles. En la **Tabla 1** son mostrados los resultados de los aforos vehiculares realizados en el 2010.

En zonas rurales de Cartagena existen algunos casos específicos donde las emisiones de material particulado por fuentes móviles están causando un impacto sobre la fauna y la flora y sobre las comunidades que allí habitan, tal es el caso que se presenta en la Vía Baru, la cual posee un terreno compuesto por un material con características que le imprimen alta volatilidad, y que al paso de los vehículos, dispersa gran cantidad de polvo que se deposita en las hojas y tallos de la flora presente y afecta los sistemas respiratorios de las comunidades, principalmente las infantiles, asentadas en su perímetro (Santa Ana).

3.7.2. Fuentes Fijas: Están concentradas principalmente en la zona industrial de Mamonal y el Bosque, en donde los procesos tecnológicos que se implementan en las pequeñas y medianas empresas, demandan entre sus operaciones: quema de combustibles, expulsión de residuos gaseosos y manejo de materiales con alta volatilidad que al final se traducen en emisiones puntuales o fijas de contaminantes que con la ayuda de las condiciones meteorológicas,



FACTORES DE EMISIÓN POR EFECTO DE LA MOVILIDAD VEHICULAR EN CIUDADES CON SIMILARES CONDICIONES A CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA



principalmente el viento, se dispersan en las áreas de influencia de dichas empresas.

Tabla 1. Aforos vehiculares en las principales intersecciones de la ciudad de Cartagena

INTERSECCIÓN	No MOTOS	No AUTOS	No BUSES	No CAMIONES
Báscula el Bosque	11909	11252	1267	2193
CAI 13 de Junio	5436	3079	730	441
CAI Buenos Aires	827	14809	2056	1855
Entrada a las Gaviotas	13566	16474	3055	595
Hotel Caribe	774	4593	739	93
Iglesia de Crespo	2061	7055	1055	400
Indufrial	4766	5294	402	1164
La Fuente	4884	8646	1791	200
María Auxiliadora	8102	10203	3542	421
Bomba Martínez Martelo	10166	9683	1168	1207
Rotonda Santander	3970	16168	1326	545
Bomba de Ternera	5042	4749	2012	626
CAI Daniel Lemaitre	2773	3582	135	213
CAI Santa Rita	5868	5182	410	173
Casa de Justicia	7521	3819	845	582
Drogas la Rebaja H U de C	5108	3720	651	81
La Roan	4264	3182	1160	165
Bomba Terminal de Transportes	126	2925	2550	557
Pozón	13	137	507	65
Intersección socorro-Jardines	5988	3469	807	352
El Campestre	8707	5253	714	274
Av. del Lago	4330	8171	855	346
Puente De Bazurto	9839	10635	4390	373
Bayunca-Pontezuela	825	425	296	846

Fuente: (Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cartagena y Secretaria de Planeación Distrital de la Alcaldía de Cartagena, 2010)



4. FACTORES DE EMISIÓN EN CIUDADES CON SIMILARES CONDICIONES A LA CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA

Siendo la ciudad de Cartagena de Indias, una ciudad ubicada en el norte de Colombia, bañada en su extensión por las aguas del Mar Caribe, y compuesta territorialmente de 70% en cuerpos de agua, posee un clima cálido, dada a su condición de cercana a la línea ecuatorial. Por tal motivo, las ciudades tomadas como punto de referencia para hacer comparación en sus estimaciones de factores de emisión de contaminantes, deben ser parecidas geomorfológicamente a éstas con incidencia costera.

Es así, como en el presente documento se identifican modelos, variables y elementos usados en la estimación del factor de emisión en ciudades como La Habana (Cuba), Delhi (La India), Monteria (Colombia), Envigado, (Colombia).

4.1. Determinación de Factores de Emisión de contaminantes en ciudades con similares condiciones a Cartagena de Indias

En distintas ciudades del mundo se han llevado a cabo estudios referentes a la determinación de los factores de emisión de contaminantes por incidencia del flujo vehicular, por lo cual, en el estudio se han recopilado una serie de resultados investigativos en ciudades con similares condiciones climáticas y/o comportamiento vehicular con la ciudad de Cartagena de Indias. A continuación, se listan.

4.1.1. La Habana, Cuba:

El clima predominante en este país es de tipo cálido tropical, con estación lluviosa en el verano; estacionalmente húmedo, con influencia marítima y rasgos de semi-continentalidad.



Por su posición geográfica (Ver **Ilustración 7.**), Cuba se encuentra situada en una latitud muy próxima al Trópico de Cáncer, lo que condiciona la recepción de altos valores de radiación solar durante todo el año, determinando el carácter cálido de su clima. Además, se halla en la frontera entre las zonas de circulación tropical y extratropical, recibiendo la influencia de ambas con carácter estacional. En la temporada que va aproximadamente de noviembre a abril, las variaciones del tiempo y el clima se hacen más notables, con cambios bruscos en el tiempo diario, asociados al paso de sistemas frontales, a la influencia anticiclónica de origen continental y de centros de bajas presiones extratropicales. De mayo a octubre, por el contrario, se presentan pocas variaciones en el tiempo, con la influencia más o menos marcada del Anticiclón del Atlántico Norte. Los cambios más importantes se vinculan con la presencia de disturbios en la circulación tropical (ondas del este y ciclones tropicales) (INSMET, 2015).

Ilustración 7. Ubicación de la ciudad de La Habana en Cuba.



Fuente. Google Earth

El estudio realizado en Cuba, estuvo enfocado en el transporte automotor, fundamentalmente el movido con motores de gasolina, que es una de las principales fuentes contaminantes de la atmósfera, que se produce por la combustión de la mezcla aire-combustible y las reacciones incompletas y colaterales que transcurren durante el proceso de oxidación a altas temperaturas. El estudio se centró en el Monóxido de Carbono, gas que afecta a la salud humana, al producir diversas afecciones respiratorias agudas y crónicas, irritación de la mucosa ocular,



empeoramiento de las funciones respiratoria y cardiovascular e incremento de la mortalidad por enfermedades cardio-respiratorias, incluyendo cáncer pulmonar, y afectando, además, el clima mundial, indirectamente, como gas de efecto invernadero.

Entonces, en la determinación de la calidad del aire en una zona específica, en el presente artículo se desarrolla una metodología de cálculo para determinar el flujo de gases de escape y determinar los Factores de Emisión (FE) correspondientes a nuestra flota vehicular.

Para la estimación de estas emisiones se tuvo en cuenta varios factores tales como: medio de transporte, características del combustible consumido, condiciones de operación, edad y tecnología de las flotas y características del servicio técnico empleado.

✓ Metodología de cálculo

Para el cálculo de las emisiones en las fuentes móviles se utiliza la siguiente expresión:

$$E = FE * A \dots (1)$$

Donde:

E = Volumen de emisiones (g)

FE = Factores de emisión, cuyo valor está en dependencia del tipo de fuente emisora, combustible y tecnología de control de emisiones.

A = Actividad asociada a la emisión del contaminante, la cual puede estar dada por consumo de combustible o kilómetros de recorrido.

Por tanto, despejando FE de (1) se obtiene:

$$FE = \frac{E}{A} \left(\frac{g}{kg} \text{ ó } \frac{g}{km} \right)$$



Uno de los problemas, hasta hoy presente en Cuba, para la evaluación de la carga contaminante producida por las fuentes móviles, está relacionado con la determinación del volumen de las emisiones, el cual es directamente proporcional al volumen de gases que sale por el tubo de escape del vehículo y a la concentración del contaminante. Respecto a este último término, con los analizadores de gases de los CRTA se puede obtener la concentración expresada en % volumétrico del contaminante. En cuanto al volumen, la ausencia de tecnología en Cuba capaz de registrar esta salida de gases, provoca que no se pueda disponer de información sobre las emisiones que produce la flota vehicular que se explota.

Por tanto, en esta metodología se determina el volumen de gases de escape que se produce al quemar un kilogramo de combustible en una hora y, conociendo el nivel de actividad (consumo de combustible o kilómetros recorridos), se obtienen los factores de emisión.

La cantidad de gases de escape, expulsada por los vehículos, es directamente proporcional a la potencia efectiva del motor, al consumo específico de combustible y al coeficiente de exceso de aire, todos relacionados con la siguiente expresión:

$$Qg = \frac{Ne * ge + (1 + \alpha * lo)}{1000 * \gamma}$$

Donde:

Qg = Gasto horario de gases de escape (m³ / h)

Ne = Potencia efectiva del motor (kW)

ge = Consumo específico del combustible (g / kWh)

lo = Cantidad teórica de aire para quemar un kg de combustible (kg de aire / kg de combustible)

α = Coeficiente de exceso de aire

γ = Densidad del gas (kg / m³)



La potencia efectiva del motor y el consumo específico de combustible son parámetros técnicos del motor, de manera que son valores conocidos y se toman de la característica exterior de velocidad o del cálculo térmico del motor.

El coeficiente de exceso de aire (α) se toma en correspondencia con la máxima potencia del motor. Para motores de gasolina su valor está entre 0,8 y 0,9.

La cantidad de aire teóricamente necesaria para quemar 1 kg de combustible se determinó por la siguiente expresión:

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} C + 8H - O \right)$$

Donde:

0,23 y 0,21 Contenido de oxígeno en el aire.

O; H; C= Representan, respectivamente, la fracción en peso correspondiente al oxígeno, hidrógeno y carbono contenido en el combustible.

Teniendo en cuenta que la combustión es incompleta en los motores de encendido por chispa, se determina la masa de cada uno de los componentes de los productos de escape mediante expresiones del balance de materiales.

Siguiendo la secuencia de cálculo para cada gas y haciendo las transformaciones correspondientes se halla el valor de Q_g . Para obtener la masa de CO contenida en el flujo de gases de escape se procedió a determinar el volumen del contaminante.

$$Q_{co} = Q_g * \%Volumétrico$$

Debido a que en Cuba la estadística del combustible consumido por el transporte automotor es de difícil determinación en algunas entidades estatales, así como se desconoce el combustible utilizado por el sector privado, y atendiendo a que los *FE* pueden establecerse basados en cálculos ingenieriles obtenidos a partir de varios factores de importancia y de algunas suposiciones, se consideró para la determinación de los factores de emisión la relación entre la masa de contaminante con la masa de combustible ($g_{co}/g_{combustible}$).

En cuanto al consumo de combustible se utilizó el consumo horario, que se obtiene de la multiplicación de la potencia efectiva del motor por el consumo específico de combustible. Se tiene:



$$FE = \frac{Q_{CO}}{N_e g_e}$$

Por tanto;

$$FE = \frac{N_e g_e * (1 + \alpha * lo) * \%CO}{1000\gamma}$$

Y realizando un grupo de transformaciones se llega a:

$$FE = \frac{1 + \alpha * lo}{\gamma} * \%CO * PmCO$$

Por lo que el *FE*, que relaciona la masa del contaminante con la actividad asociada al consumo de combustible, depende del % volumétrico del contaminante y de la cantidad de aire presente en el proceso de combustión.

✓ Resultados

Tabla 2. Comparación de factores de emisión de CO para fuentes móviles en Cuba y los reportados por el Panel Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático (IPCC).

Categoría	Factores de emisión							
	Calculados		Modificados		IPCC			
	Cuba		Cuba		Europa		Estados Unidos	
	g/kg	g/km	g/kg	g/km	g/kg	g/km	g/kg	g/km
Vehículos pesados de más de 20 años	775,52	315,25	692	-	346	58,53	246,08-292,08	102,37-121,51
Autos y vehículos ligeros de más de 20 años	839,42	80,17	1 100	-	550	49,97	181,1-244,1	28,89-38,94
Autos y vehículos ligeros entre 5 y 20 años	335,77	27,28	810	-	405	29		
Autos y vehículos ligeros menores de 5 años	223,01	15,09	600	-	300	19	45,9-71,2	4,12-6,40

Fuente: (RIVAS & HERNANDEZ, 2007)

En la Tabla 2 se muestran, a manera de resumen, los factores de emisión relacionados con la masa de combustible y kilómetros de recorrido para el monóxido de carbono, provocado por los vehículos con motores de gasolina y se comparan con los datos que brinda el Panel Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático (IPCC).



Como se observa en la Tabla 2, los *FE* calculados se comparan con los valores que considera el IPCC para vehículos de Europa y Norteamérica y con los valores que se utilizan en el país para las estimaciones de emisiones, obtenidos al modificarse los valores que ofrece el IPCC para los vehículos europeos.

Para los *FE* relacionados con los gramos de emisión por kilómetros recorridos, se observa en la Tabla que los valores para los vehículos pesados son mayores en comparación a los *FE* que reportan los equipos europeos y norteamericanos, lo cual está dado por el envejecimiento tecnológico y el desgaste técnico que presenta el modelos de camión.

4.1.2. Delhi, India

Delhi está situado en el norte de la India (Ver **Ilustración 8**), comparte su frontera con los estados de Uttar Pradesh y Haryana. Tiene una superficie de 1.483 km², con su longitud máxima es de 51,90 kilómetros y una anchura de 48,48 kilómetros. El Parque de vehículos actual de Delhi es más de 6,9 millones, que se sitúa aproximadamente a 3,5 millones en 2001 una tasa de crecimiento del 7,40% para los vehículos privados y 9,15% para los vehículos comerciales, lo que causa un tráfico severo y problemas ambientales (Mishra & Goyal, 2014).

Ilustración 8. Ubicación de la ciudad de Delhi en India.

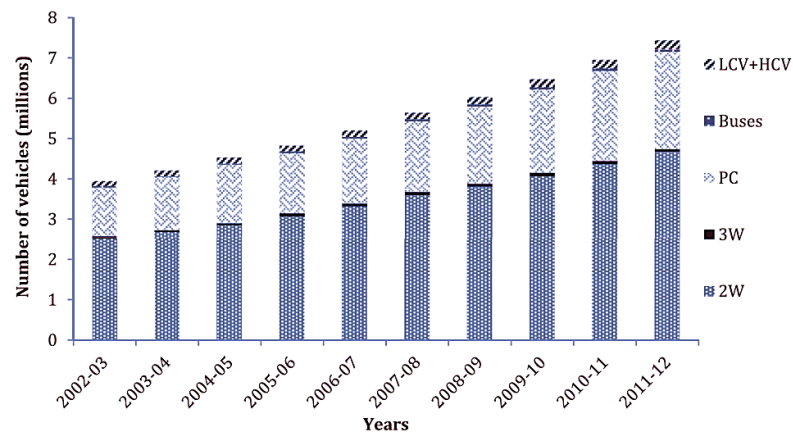


Fuente. Google Earth



El estudio en Delhi, se basa en un modelo de Emisiones de Vehículos Internacional (IVE) que es un criterio que se utiliza para estimar las emisiones de contaminantes mediante la utilización de un conjunto de datos disponibles a partir de observaciones de campo en diferentes intersecciones de tráfico en Delhi. Así, las emisiones de los vehículos, con base en los factores de emisión dinámicas se han estimado para los años 2003 y 2012. Se observa que las emisiones totales de CO, NOx y PM10 se incrementan en un 45,63%, 68,88% y 17,92%, respectivamente, hasta el año 2012 y las emisiones de NOx y PM10 se cultivan de forma continua con una tasa de crecimiento promedio anual de 5.4 % y 1,7%, respectivamente (Ver *Ilustración 9*)

Ilustración 9. Número de Vehículos registrados en Delhi, 2012.



Fuente. (Mishra & Goyal, 2014)

✓ Metodología de cálculo

En esta investigación, se inicia por la estimación de los factores de emisión dinámicos para el desarrollo de un inventario dinámico de emisiones. Este factor de emisión dinámica para cualquier año en particular tiene en cuenta el número total de vehículos, el crecimiento vehicular por año, la antigüedad del vehículo, etc. Por lo tanto, los factores de emisión dinámicas están capturando la transición de la tecnología vehicular, tomando en cuenta como la fracción de vehículos que están siendo añadidos a la flota de vehículo y el porcentaje de vehículos que operan.

La metodología de desarrollo de factores de emisión dinámicas entre los años del 2003 y 2012 se describen en primera instancia los parámetros de entrada, seguido por



el cálculo de los factores de emisión de vehículos dinámicos. En el presente estudio, el año 2003 es elegido como el año base. Los datos requeridos para el año base 2003 se ha recogido de Goyal, 2007. La flota de vehículos se compone en su mayoría de 2 ruedas (2W), automóviles personales (PC), 3 ruedas (3W), vehículos comerciales ligeros (LCV), pesados vehículos comerciales (VHC) y autobuses. Los factores de emisión de contaminantes de agentes como CO, NO_x y PM₁₀ de flotas de vehículos se calculan para cada tipo de vehículos y combustibles de forma independiente. Bajo esta, los factores de emisión básicos de CO, NO_x y PM₁₀ procedentes de la gasolina, diesel y vehículos de GNC bajo Bharat Etapas II, III y IV se revisan con datos monitoreados reales. Para estimar las emisiones de los vehículos, se utiliza el Modelo IVE, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA), que ha sido validado en muchos países en desarrollo.

✓ **Desarrollo de factores de emisión dinámicos**

Toda la información y los datos pertinentes sobre las emisiones fueron recogidas a través de diferentes fuentes para los años 2003 y 2012. En este estudio, los datos de los diferentes tipos de motores y combustibles se han obtenido a partir de muchos estudios anteriores, como Iyer y Badami 2007 para 2W, CPCB 2009 para 3W (GNC), Ravindra et al., 2006 para los autobuses, EPCA, 2007 para los coches (gasolina / diesel / GNC) y LCV / VHC Das y Parikh, 2004. Los datos del número total de vehículos matriculados en Delhi han sido adquiridos por el Departamento de Transporte a través de DSH, 2012. Los datos no refleja el número exacto de vehículos que navegan en las carreteras, ya que los números considerables de los vehículos después de cierta edad han sido eliminados según las normas gubernamentales de vehículos de vejez y los muchos de ellos han sido desguazados.

En este presente estudio, los factores de emisión dinámicas de CO, NO_x y PM₁₀ para las diferentes categorías de vehículos se han calculado mediante la fórmula por Zhanga et al, 2008:



$$EF_{ij} = \sum [|(TVN_{(i-1)j} * EF_{(i-1)j} * RVN_{ij} * REF_{(i-1)j} + IVN_{ij} * IEF_{ij})| / TVN_{ij}]$$

donde i es el número de años en los que se quiere predecir, j es el tipo de vehículo, EF es el factor de emisión, TVN es el número total de vehículos, RVN es el número de serie del vehículo en desuso, REF es un factor de emisión de los vehículos en desuso, IVN es aumento en el número de vehículos, IEF es un factor de emisión de un mayor número de vehículos.

✓ Resultados

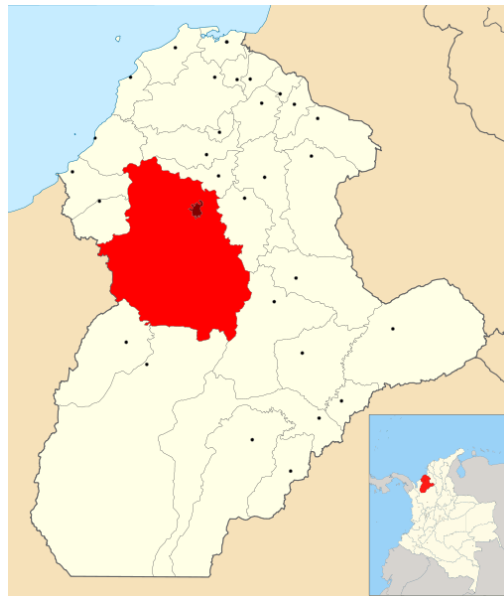
Los factores de emisión dinámicas de contaminantes criterio (CO , NO_x y PM_{10}) para diferentes tipos de fuentes vehiculares con gasolina, diesel y GNC se establecen de acuerdo al deterioro del vehículo, la subasta de vehículos, la edad, etc., para Delhi en los últimos años 2003 y 2012. Sobre la base de los resultados se puede concluir que los factores de emisión dinámicas tienen sus ventajas, tales como tomar en cuenta el deterioro vehículos anuales y los cambios de peso de vehículo a vehículo. El análisis de los resultados muestra que dos ruedas y coches (PC-D, PC-P y PC-GNC) se encuentran para ser los mayores contribuyentes de emisiones de contaminantes. Casi el 65% de la CO emitido en la ciudad se encuentra para ser debido a 2W, 32% de NO_x debido a la PC-GNC y 43% de PM_{10} de HCV. Las emisiones de CO , NO_x y PM_{10} obtenidos a partir del modelo IVE también muestran un acuerdo razonable con las concentraciones ambientales existentes. Se observan que las emisiones estimadas de contaminantes van en aumento año a año y el empeoramiento de la calidad del aire de Delhi. Por lo tanto, para reducir las emisiones de los vehículos, para mejorar la tecnología de control de emisiones del vehículo o hacer ambas cosas la recomendación sobre la base que ofrece el mismo estudio anterior es que la misma metodología también puede ser usada para estimar las emisiones de fuentes vehiculares para otras megaciudades y también el mismo se puede utilizar para proyectar la emisión para el escenario futuro.



4.1.3. Montería, Colombia

La ciudad de Montería (Ver **Ilustración 10.**) está ubicada al noroccidente del país en la región Caribe Colombiana, se encuentra a orillas del río Sinú, por lo que es conocida como la "Perla del Sinú", principal centro de comunicaciones del Caribe de Colombia.

Ilustración 10. Ubicación de Montería, Colombia.



Fuente: Google Earth

El clima de la ciudad es cálido tropical con una estación de sequía y una de lluvias a lo largo del año. La temperatura promedio anual de la ciudad es de 28 °C con picos superiores a 40 °C en temporada canicular. La humedad relativa promedio es de 78%. Esta ciudad consta de más de 400,000 habitantes, es sede de muchas universidades, centros comerciales, importantes almacenes y restaurantes de cadena. Montería presenta un gran avance en su desarrollo arquitectónico, comercial y vial.

En el informe investigativo de la ciudad, representa un inventario de emisiones de gases de efecto invernadero para el año de 2005 en el municipio de Montería (Córdoba, Colombia). Este inventario incluye las emisiones provenientes de los vehículos automotores, los rellenos sanitarios y las fuentes biogénicas.



✓ Metodología

Los cálculos para estimar las emisiones de los contaminantes seleccionados en este trabajo se realizaron con base en la metodología de estimación del Programa de Inventario de Emisiones para México. Se utilizó el *Modelo IVE 1.1 (International Vehicle Emission Model)* para el cálculo de las emisiones de COV's, NO_x, CO, SO₂ y PM₁₀ de algunas categorías de fuentes móviles. Este modelo fue desarrollado en Estados Unidos por la Universidad de California (Center for Environmental Research and Technology), Global Sustainable Systems Research y the International Sustainable Systems Research Center. El financiamiento para el desarrollo del modelo fue proporcionado por the U. S. Environmental Protection Agency. Fue desarrollado especialmente para ser utilizado en países en vías de desarrollo, en los que existen condiciones de tráfico y tecnología vehicular diferentes a los de los países en desarrollo.

Para poder ser utilizado en países en desarrollo, cuenta con una base de datos muy amplia y flexible de tecnologías vehiculares, que cubre más de 300 categorías de vehículos, distribuidas por edad, tamaño del motor, tecnología de control de emisiones y de alimentación de combustible. Además, cuenta con valores por defecto para factores de emisión básicos provenientes de países que suministren esta información (Estados Unidos, la Unión Europea y Japón), que pueden ser modificados cuando se cuente con esta información en el nivel local.

El modelo permite realizar estimativos de emisiones en proyectos, y a escalas regional y nacional, incluyendo para este último fin un módulo para gases causantes del efecto invernadero. Los contaminantes que permite estimar son los siguientes: CO, VOC's, NO_x, PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂, N₂O, CH₄, NH₃, benceno, plomo, aldehídos y 1,3 butadieno.



✓ **Resultados**

La emisión estimada de gases de efecto invernadero a través del modelo IVE (International Vehicle Emission Model) para fuentes móviles se presenta en la Tabla 3. Las fuentes móviles aportan alrededor de 43,134 toneladas al año, de las cuales el 99.63% es CO₂.

Tabla 3. Emisión de gases de efecto invernadero por fuentes móviles.

Vehículo	CO ₂		N ₂ O		CH ₄		Total	
	(Ton/año)	%	(Ton/año)	%	(Ton/año)	%	(Ton/año)	%
Buses y busetas	5492.00	12.8	0.04	25.8	0.05	0.0	5492.09	12.7
Camperos y camionetas	6559.85	15.3	0.04	24.2	19.20	12.1	6579.09	15.3
Taxis	5836.52	13.6	0.02	10.7	56.21	35.5	5892.74	13.7
Motos	19995.08	46.5	0.04	20.9	69.28	43.8	20064.40	46.5
Vehículo particular	2779.01	6.5	0.01	4.2	11.72	7.4	2790.73	6.5
Camiones	2313.07	5.4	0.02	14.3	1.85	1.2	2314.95	5.4
Total	42975.52	100.0	0.17	100.0	158.30	100.0	43134.00	100.0

Fuente: (Londoño Echeverry, 2006)

En la Tabla 3 se puede observar que los tipos de vehículos que más contaminantes generan son las motos (46.5%), seguida de los camperos y las camionetas (15.3%). Las emisiones de óxido nitroso (0.17 Ton/año) y metano (158.3 Ton/año) equivalen a un potencial de calentamiento global de 53.98 y 3324.28 toneladas de CO₂ al año y representan el 0.11 y 7.17%, respectivamente. El análisis por categorías de fuentes emisoras señala que el 50.4% de la emisión total tuvo su origen en el uso de combustibles fósiles en el sector transporte, el 43.2 % en la ganadería, el 3.6% en la disposición de residuos sólidos y el 2.8 en las actividades agrícolas. El municipio de Montería representa el 0.16% de la emisión de gases de efecto invernadero de Colombia (Londoño Echeverry, 2006).

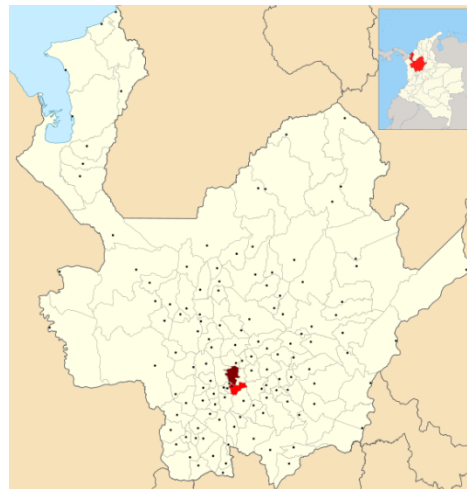
4.1.4. Envigado, Colombia

Envigado está ubicado al sur del Valle de Aburrá (Ver **Ilustración 11**) en el departamento de Antioquia, el cual se encuentra en la cordillera central de



los Andes colombianos. Su temperatura promedio varía desde 21°C en la cabecera municipal hasta los 16 °C en la parte alta y una humedad relativa del 70%. Posee un comportamiento pluvial intra-anual con dos épocas húmedas y dos épocas secas. Es una región con variaciones climáticas de húmeda a muy húmeda, con precipitación promedio de 2.000 milímetros, la cual varía desde 1.200 milímetros en la parte noroccidental hasta 2.300 milímetros en la parte del altiplano oriental.

Ilustración 11. Ubicación de Envigado, Colombia.



Fuente: Google Earth

Este trabajo de investigación presenta los resultados de la estimación de contaminantes atmosféricos (CO, NO_x, SO₂, PM₁₀ y COV) provenientes de fuentes móviles en la zona urbana del municipio de Envigado para el año 2010. Se utilizó información de vehículos matriculados en el municipio, aforos, distribución y actividad vehiculares. Las emisiones fueron estimadas mediante los factores establecidos en el método IVE que mejor se ajustaron a los patrones de movilidad, características del parque automotor y tipo de combustibles presentes en la zona de estudio.

✓ Metodología

Fue utilizado el modelo IVE, que cuenta con la opción de ingresar los factores de emisión propios de cada ciudad, sin embargo, en caso de no contar con esta



información, el modelo utiliza principalmente factores de emisión desarrollados a partir del ciclo de conducción del método de prueba federal o FTP (Federal Test Procedure) de los Estados Unidos de América (IVE, 2009), para luego ser ajustados a la realidad de las características observadas de la ciudad para la cual se elabora el estudio.

Para el cálculo de las emisiones vehiculares en Envigado se confeccionaron una serie de hojas de cálculo para el procesamiento de la información y las emisiones vehiculares en Envigado se confeccionar el procesamiento de la información y cómputo de las emisiones totales por contaminante y por categoría vehicular de acuerdo con la ecuación:

$$Emi_K = \sum_j^n N_j * M_j * FEjk$$

Donde:

Emi_K es la cantidad total diaria de emisión del total diaria de emisión del contaminante k para un contaminante k para un área urbana (g/día).

N_j es el número de vehículos de la categoría j (N).

M_j es la actividad vehicular diaria expresada como la cantidad de kilómetros recorridos por día y por la categoría j (km/día).

$FEjk$ es el factor de emisión asociado a la categoría vehicular j y al contaminante k. Se expresado como la masa de contaminante generada por kilómetro recorrido por un tipo de vehículo ($g\ km^{-1}$).

✓ Resultados

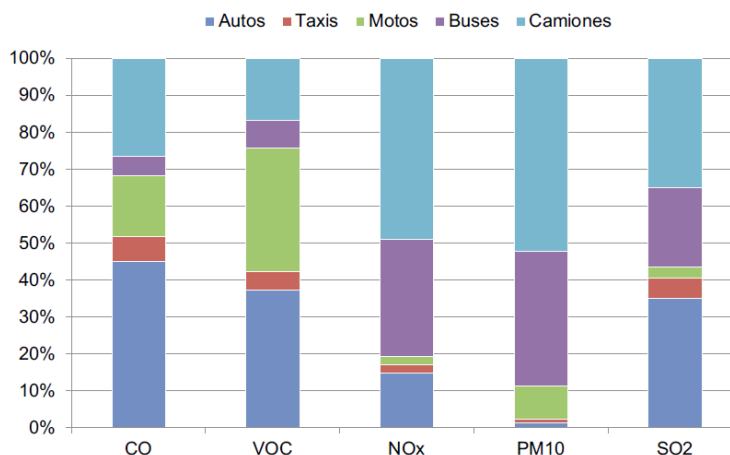
Los resultados de las emisiones de las fuentes móviles usando los factores de propuestos en el modelo IVE se muestran en la **Fuente:**

Tabla 4 y en la **Ilustración 12**. El monóxido de carbono es el contaminante más emitido con $18,41\ t\ d^{-1}$ (71,3 %), seguido por los óxidos de nitrógeno con $4,5\ t\ d^{-1}$ (17,4 %) y los compuestos orgánicos volátiles con $2,7\ t\ d^{-1}$ (10,3 %). Los camiones y buses se muestran como las categorías vehiculares que más emisiones de PM10



presentan: 0,105 t d⁻¹ y 0,073 t d⁻¹ respectivamente. Los autos presentan una emisión diaria de 8,25 t d⁻¹ de CO y esa categoría representa el 32,74 % de las emisiones de este contaminante (Ver **Ilustración 12**).

Ilustración 12. Emisiones por categoría vehicular para un día laboral



Fuente: (Londoño, Palacio, & Correo, 2011)

Tabla 4. Emisiones por categoría vehicular para un día laboral

Categoría vehicular	CO	VOC	NO _x	PM ₁₀	SO ₂	Total categoría	% categoría
	Emisión (kg/día)						
Autos	8257,29	992,00	659,62	2,76	12,13	9923,80	38,5
Taxis	1257,12	133,55	106,05	1,79	1,94	1500,45	5,8
Motos	3047,36	890,63	107,13	18,20	1,02	4064,33	15,7
Buses	964,53	195,89	1422,53	72,75	7,49	2663,19	10,3
Camiones	4882,10	451,37	2204,36	105,21	12,17	7655,21	29,7
Total contaminante	18408,40	2663,45	4499,69	200,70	34,75	25806,99	100,0
% contaminante	71,3	10,3	17,4	0,8	0,1	100,0	-

Fuente: (Londoño, Palacio, & Correo, 2011)

La principal conclusión de esta investigación en Envigado se centra en el hecho de que el conjunto de métodos y modelos empleados en este estudio resulta ser aceptablemente adecuado para la evaluación de las emisiones procedentes del tráfico vehicular y de su dispersión. De esta forma podría aplicarse en muchos otros casos de una manera sencilla y podría ser una herramienta de planificación y evaluación de los efectos del tráfico, así como para medir la sensibilidad frente a cambios estructurales del transporte.



4.2. Determinación de los factores de emisión generados por el tráfico vehicular en la ciudad de Cartagena

Para la ciudad de Cartagena existe un proyecto de tesis de Maestría titulado estimación de los factores de emisión para CO y $PM_{2.5}$ generados por el tráfico vehicular en la ciudad de Cartagena.

Tiene como objeto estimar los factores de emisión de contaminantes criterios (CO y $PM_{2.5}$) provenientes de fuente móviles para la ciudad de Cartagena; identificando las variables de mayor relevancia en los niveles de emisión estableciendo lineamientos que le sirvan a las autoridades ambientales, de tránsito y de planeación urbana para la construcción de mecanismos de prevención y control de las emisiones.

El proyecto lo dividieron en tres fases: selección de los puntos de monitoreo, campaña de monitoreo atmosféricos y estimación de los factores de emisión para CO y $PM_{2.5}$ utilizando el modelo AERMOD.

La primera fase consistió en proponer una metodología para la selección de sitios de monitoreo atmosférico en zonas urbanas afectadas por las emisiones de fuentes móviles. En la segunda fase se evaluó la calidad de aire mediante la medición de las concentraciones de CO y $PM_{2.5}$. y en la tercera fase se estimaron los factores de emisión identificando los contaminantes que más aporte realizan a la contaminación ambiental en la ciudad de Cartagena de Indias

✓ Metodología

La metodología se basa en el método de jerarquización analítica o ponderación de factores descritos en (Saaty, 1980)

- a) Se identificaron las metas: el número y localizar los sectores y sitios que para un monitoreo de monóxido de carbono y las alternativas: del parque automotor en Cartagena de Indias y los Factores en la toma de decisión:



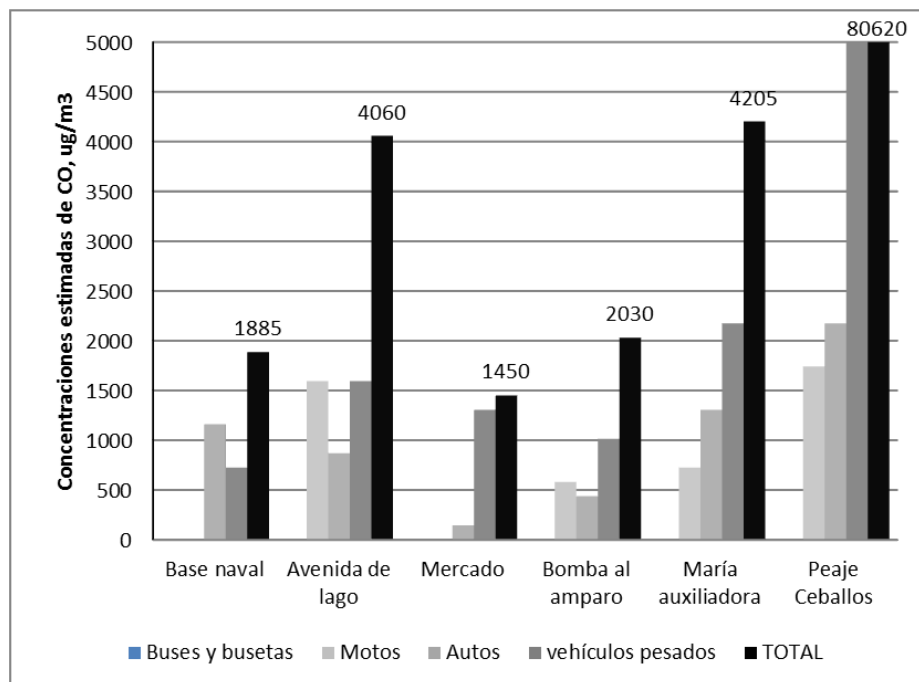
- b) A cada factor: se le dio un peso de 0 a 1 de acuerdo al porcentaje de participación en el presupuesto o inversión económica total planificada para adecuar un sitio de monitoreo y se calculo puntaje para cada una de las alternativas: Ordenandolas 1 acorde a sus puntajes totales obtenidos mediante la expresión matemática:

$$S_j = \sum_i w_i r_{ij} \text{ (Ec. 6)}$$

Donde S es el puntaje total para la alternativa (sitio preseleccionado) j, w es el peso para cada factor i y r es el puntaje asignado a la alternativa j en función del factor i. En coherencia con las metas establecidas en el ítem a, las tres alternativas con los puntajes totales más bajos son los sitios de monitores (alternativas) seleccionados

Las máximas concentraciones anuales permitidas para CO corresponden a 10000 ug/m³, las cuales no son excedidas de acuerdo las concentraciones estimadas en cada sitio de monitoreo (Ver **Ilustración 13**).

Ilustración 13. Concentraciones de CO ug/m³, emitidas por las distintas categorías



Fuente: (Álvarez Narvaez, 2015)



Luego se estimaron las emisiones para poder utilizar el modelo:

De acuerdo con la información disponible para esta investigación, se seleccionó el modelo AERMOD View, ya que pueden representar el transporte de $PM_{2.5}$, de CO y las concentraciones de éstas que se pueden presentar en los sitios de estudio a partir de las emisiones de las fuentes móviles para las diferentes zonas de estudio (Véase **Tabla 5**).

Tabla 5. Emisiones utilizadas en el Modelo AERMOD

Sectores	Bomba de El Amparo	María Auxiliadora	Peaje de Ceballo
Emisión inicial	2.68E-05	1.12E-05	1.13E-04
10%	2.95E-05	1.24E-05	1.43E-04
30%	3.48E-05	1.46E-05	1.69E-04
50%	4.02E-05	1.69E-05	1.95E-04
70%	4.55E-05	1.92E-05	2.21E-04
100%	5.36E-05	2.25E-05	2.60E-04

Fuente: (Álvarez Narvaez, 2015)



FACTORES DE EMISIÓN POR EFECTO DE LA MOVILIDAD VEHICULAR EN CIUDADES CON SIMILARES CONDICIONES A CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA



Tabla 6.- Cuadro comparativo de estudios de Factores de Emisión por efecto de movilidad Vehicular en Ciudades con similares condiciones a Cartagena de India, Colombia.

FACTORES DE EMISIÓN POR EFECTO DE LA MOVILIDAD VEHICULAR EN CIUDADES CON SIMILARES CONDICIONES A CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA				
CIUDAD / PAÍS	PROYECTO	OBJETO	METODOLOGÍA - RESULTADO	CONCLUSIÓN
La Habana / Cuba	Determinación de factores de emisión para el monóxido de carbono producido por el transporte automotor en Cuba	Determinación de la calidad del aire en una zona específica, a través de una metodología de cálculo para determinar el flujo de gases de escape y determinar los Factores de Emisión (FE) correspondientes a nuestra flota vehicular.	Los FE calculados a partir de esta metodología se compararon con los valores que considera el IPCC para vehículos de Europa y Norteamérica y con los valores que se utilizan en Cuba para las estimaciones de emisiones, obtenidos al modificarse los valores que ofrece el IPCC para los vehículos europeos.	Los FE calculados en Cuba a partir de esta metodología son mayores que los calculados por el IPCC en norteamérica y Europa, lo cual está dado por el envejecimiento tecnológico y el desgaste técnico que puede tener el parque automotor de la ciudad.
Delhi / India	Estimation of vehicular emissions using dynamic emission factors: A case study of Delhi	Basado en un IVE, se busca hallar un factor de emisión dinámico para cualquier año en particular, teniendo en cuenta el número total de vehículos, el crecimiento vehicular por año, la antigüedad del vehículo entre otras.	Los factores de emisión dinámicos de contaminantes con criterio (CO, NOx y PM10) fueron calculados para diferentes tipos de fuentes vehiculares a gasolina, diesel y GNC que se establecen de acuerdo al deterioro del vehículo, la subasta de vehículos, la edad, etc., para Delhi en los últimos años desde 2003 hasta 2012.	Los factores de emisión dinámicos capturaron la transición de la tecnología vehicular, tomando en cuenta como la fracción de vehículos que están siendo añadidos a la flota de vehículo y el porcentaje de vehículos que operan.
Montería / Colombia	Estimación de la emisión de gases de efecto invernadero en el municipio de Montería (Córdoba, Colombia)	Se realizó un inventario de emisiones de gases de efecto invernadero para el año de 2005 en el municipio de Montería (Córdoba, Colombia). Este inventario incluye las emisiones provenientes de los vehículos automotores, los rellenos sanitarios y las fuentes biogénicas.	Se usó la metodología de estimación del Programa de Inventario de Emisiones para México: el Modelo IVE 1.1, permitiendo realizar estimativos con los contaminantes tales como: CO, VOC's, NOx, PM2.5, PM10, CO2, N2O, CH4, NH3, benceno, plomo, aldehídos y 1,3 butadieno.	El modelo permite realizar estimativos de emisiones en proyectos, y a escalas regional y nacional, incluyendo para este último fin un módulo para gases causantes del efecto invernadero.
Envigado / Colombia	Estimación de las Emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia	Estimación de contaminantes atmosféricos (CO, NOx, SO2, PM10 y COV) provenientes de fuentes móviles en la zona urbana del municipio de Envigado para el año 2010.	Fue utilizado el modelo IVE complementado con el modelo de prueba federal o FTP (Federal Test Procedure) de los Estados Unidos de América (IVE, 2009).	El conjunto de métodos y modelos empleados en este estudio resulta ser aceptablemente adecuado para la evaluación de las emisiones procedentes del tráfico vehicular y de su dispersión.
Cartagena/ Colombia	Estimación de los factores de emisión para CO y PM 2.5 generados por el tráfico vehicular en la ciudad de Cartagena	Estimar los factores de emisión de contaminantes criterios (CO y PM2.5) provenientes de fuente móviles para la ciudad de Cartagena; identificando las variables de mayor relevancia en los niveles de emisión estableciendo lineamientos que le sirvan a las autoridades ambientales, de tránsito y de planeación urbana para la construcción de mecanismos de prevención y control de las emisiones.	La metodología se basa en el método de jerarquización analítica o ponderación de factores descritos en (Saaty, 1980) a) Se identificaron las metas: el número y localizar los sectores y sitios que para un monitoreo de monóxido de carbono y las alternativas: del parque automotor en Cartagena de Indias y los Factores en la toma de decisión.	Se estableció una metodología detallada para realizar la estimación de los factores de emisión y así establecer de una manera más certera las emisiones producidas por el tráfico vehicular teniendo en cuenta las condiciones físicas y meteorológicas.

Fuente. Alandete, L. & Romero, D. |



5. CONCLUSIONES

De la información recopilada con anterioridad en donde se detallaron las metodologías, parámetros y relaciones para determinar los factores de emisión en diferentes ciudades de mundo, incluida dos ciudades de Colombia, en las que se pudo concluir que:

- ✓ A pesar que en Delhi y La Habana tienen condiciones climatológicas y geográficas similares a Cartagena de Indias, se evidenció que el estudio realizado en estas dos ciudades se llegó a ecuaciones que dependían de la tipología y flujo de vehículos en la ciudad, que en el caso de Delhi estaban influenciados por el gran flujo vehicular característico de la ciudad, que sobrepasa a Cartagena al tránsito de Cartagena en un 35% adicional; y por otro lado en el caso de la Habana de un parque automotor desgastado, poco utilizado en Cartagena.
- ✓ Fueron reconocidos tres modelos en la determinación de los factores de emisión de contaminantes atmosféricos en las ciudades observadas. Es así, que fueron identificadas dos ecuaciones desarrolladas para la ciudad de Delhi a través de la fórmula de Zhanga y la Habana, con estudios realizados a partir del Panel Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático (IPCC) mientras que para las ciudades Colombianas, fue utilizado el modelo IVE (International Vehicle Emission Model), avalado en muchos países en vía de desarrollo.
- ✓ Según el presente trabajo investigativo realizado, es recomendable que en Cartagena pueda implementarse el Modelo IVE, aplicado con anterioridad en Montería y Envigado, que está diseñado especialmente para ser utilizado en países en vías de desarrollo dado a que es un modelo que cuenta con una base de datos muy amplia y flexible de tecnologías vehiculares, que cubre más de



300 categorías de vehículos, distribuidas por edad, tamaño del motor, tecnología de control de emisiones y de alimentación de combustible y que tiene la capacidad de ajustarse a la realidad de las características observadas de la ciudad para la cual se elabora el estudio.

- ✓ Por medio de la tesis de maestría (Álvarez Narvaez, 2015) “Estimación de los factores de emisión para CO y PM 2.5 generados por el tráfico vehicular en la ciudad de Cartagena” se recomienda la aplicación de esta metodología como una alternativa para realizar la estimación de los factores de emisión y así establecer de una manera más certera las emisiones producidas por el tráfico vehicular teniendo en cuenta las condiciones físicas y meteorológicas en la ciudad de Cartagena.



6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez, Vanessa(2015).- Estimación de los factores de emisión para CO y PM 2.5 generados por el tráfico vehicular en la Ciudad de Cartagena

Alcaldía de Cartagena. (2001). *Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias, Sintesis del Diagnóstico*. Cartagena de Indias: Bolivar.

(2014). *Asociación Latinoamericana de Sistemas Integrales para la movilidad urbana sustentable*.

Buijs, S. (1991). Summary of the Fourth Report Extra on Physical planning. *Ministry of Housing, Physical Planning and Environment, the Hague, the Netherlands*.

Caño Fernandez et al. (2012). *Gasto federal para a movilidad urbana Reporte del fondo Metropolitano*. México: ITDP.

INSMET. (23 de 04 de 2015). *INSTITUTO DE METEOROLOGÍA DE LA REPUBLICA DE CUBA*.
Obtenido de
<http://www.met.inf.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=CLIMAC&TB2=/clima/ClimaCuba.htm>

Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cartagena y Secretaria de Planeación Distrital de la Alcaldía de Cartagena. (2010). *Valoración de los Niveles de Riesgos Ambientales en el Distrito de Cartagena*. Cartagena de Indias: Grupo de Investigación de Modelación Ambiental.

Londoño Echeverry, C. A. (2006). Estimación de la emisión de gases de efecto invernadero en el municipio de Montería (Córdoba, Colombia). *Revis ta Ingenierías Universidad de Medellín*.

Londoño, J., Palacio, C., & Correo, M. (2011). ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES DE CONTAMINANTES TMOSEFÉRICOS PROVENIENTES DE FUENTES MÓVILES EN EL ÁREA URBANA DE ENVIGADO, COLOMBIA. *Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia)*, Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 16, p. 149-162.

Manzi, V., CLAPPIER, A., Manzi, Belalcazar, L., Giraldo, E., ZA, E., & ZARATE, E. (s.f.). ESTIMACIÓN DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE LAS FUENTES MÓVILES DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ.



FACTORES DE EMISIÓN POR EFECTO DE LA MOVILIDAD VEHICULAR EN CIUDADES CON SIMILARES CONDICIONES A CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA



- Ministerio de Energía de Chile. (02 de 08 de 2016). *GISMA*. Obtenido de <http://huelladecarbono.minenergia.cl/>
- Mishra, D., & Goyal, P. (2014). Estimation of vehicular emissions using dynamic emission factors: A CASE STUDY DELPHY INDIA. *Atmospheric Environment*.
- Molinello. (2012). *CRISIS DE LA MOVILIDAD EN CARTAGENA*. Cartagena: CEDETRABAJO.
- Ning, Z., & Chan, T. (2007). On-road remote sensing of liquefied petroleum gas (LPG) vehicle emissions measurement and emission factors estimation. *Science Direct*.
- RIVAS, P., & HERNANDEZ, B. (2007). Determinación de factores de emisión para el Monóxido de Carbono producido por el transporte automotor en Cuba.
- Sanchez, J., Urrego, J., Zakzu, J., Bornacelly, A., Castro, A., & Caraballo, L. (2013). Niveles de contaminación en el aire de Cartagena, Colombia. *Revista de la Universidad Industrial de Santander UIS*, Vol 45 N°3.
- Sánchez, J., Urrego, J., Zakzuk, J., Bornacelli, A., Castro, I., & Caraballo, L. (2013). Niveles de Contaminantes en el aire de Cartagena, Colombia. *Revista de la Universidad Industrial de Santander.*, Vol.45 No.3.
- Seo, Y. g., & Seong-MinKim. (2013). Estimation of greenhouse gas emissions from road traffic: A case study in Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Tang, U., & Wang, Z. (2007). Influences of urban forms on traffic-induced noise and air pollution: Results from a modelling system. *Science Direct*.
- Toro Gonzalez, D., Fernandez López, L., Soto, J. J., & Maza, F. (2015). *Foro Movilidad Sostenible en Cartagena*. Cartagena: UTB, UDC, Cámara de comercio de Cartagena, Cartagena como vamos.
- UNIDAS, C. M. (2012). *CONVENCION MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS*. Estocolmo: Naciones Unidas.
- Zhanga, Q., Xua, J., Wanga, G., & Tia, W. (2008). Vehicle emission inventories projection based on dynamic emission factors: A case study of Hangzhou, China. *Atmospheric Environment*.