

GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS



MINAMBIENTE



GOBIERNO DE COLOMBIA



GOBIERNO DE COLOMBIA

PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA

Juan Manuel Santos Calderón

MINISTRO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

Luis Gilberto Murillo Urrutia

VICEMINISTRA DE ORDENAMIENTO AMBIENTAL

Yaneth Patricia Alegría Copete

VICEMINISTRO DE POLÍTICAS Y NORMALIZACIÓN AMBIENTAL

Willer Edilberto Guevara Hurtado

DIRECTOR DE ASUNTOS AMBIENTALES SECTORIAL Y URBANA

Fabián Hernán Gonzalo Torres Carrillo

COORDINADOR GRUPO DE GESTIÓN AMBIENTAL URBANA

Mauricio Gaitán Varón

AUTORES

MAURICIO GAITÁN VARÓN

PAULA ANDREA CÁRDENAS RUÍZ

CORRECCIÓN DE ESTILO

MARÍA EMILIA BOTERO ARIAS

GRUPO DIVULGACIÓN DE CONOCIMIENTO Y CULTURA AMBIENTAL

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

JOSÉ ROBERTO ARANGO R.

GRUPO DE COMUNICACIONES

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

CATALOGACIÓN EN LA PUBLICACIÓN: Grupo Divulgación de conocimiento y Cultura Ambiental. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas [Recurso electrónico] / Gaitán Varón, Mauricio; Cárdenas Ruiz, Paula Andrea - Dirección de Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana. -- Bogotá, D.C.: Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017.

92 p.

ISBN: 978-958-8901-64-0

1. fuentes de contaminación 2. emisiones atmosféricas 3. calidad del aire
4. contaminación atmosférica 5. guías ambientales 6. inventarios
7. Metodologías I. Tit. II. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

CDD: 628.5 - Tecnología del control de la contaminación

© Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia, 2017

Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y divulgación de material contenido en este documento para fines educativos u otros fines no comerciales sin previa autorización del titular de los derechos de autor; siempre que se cite claramente la fuente. Se prohíbe la reproducción total o parcial de este documento para fines comerciales.

No comercializable. Distribución gratuita



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	7
1. INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS	8
1.1. ¿QUÉ ES UN INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS?	8
1.2. ¿CÚAL ES EL OBJETIVO DE UN INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS?	9
1.3. ¿CUÁLES SON LOS PRINCIPALES USOS DE LA INFORMACIÓN GENERADA EN LOS INVENTARIOS DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS?	10
1.4. ¿A QUIÉNES ESTÁ DIRIGIDA LA GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS?	10
1.5. ENFOQUES PARA LA ELABORACIÓN DE UN INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS	11
2. DESARROLLO DE UN INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS	13
2.1. FORMULACIÓN	13
2.2. PLANIFICACIÓN	17
2.3. EJECUCIÓN	18
2.4. EVALUACIÓN Y ACTUALIZACIÓN	23
3. FUENTES FIJAS	26
3.1. CLASIFICACIÓN FUENTES FIJAS	26
3.2. INFORMACIÓN PARA FUENTES FIJAS	33
3.3. ESTIMACIÓN DE EMISIONES PARA FUENTES FIJAS	35
4. FUENTES MÓVILES	49
4.1. CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES MÓVILES VEHICULARES	49
4.2. INFORMACIÓN PARA FUENTES MÓVILES	59
4.3. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES VEHICULARES	61
5. FUENTES NATURALES	71
5.1. CLASIFICACIÓN DE FUENTES NATURALES	71
5.2. INFORMACIÓN PARA FUENTES NATURALES	79
5.3. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES EN FUENTES NATURALES	79
6. BIBLIOGRAFÍA	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Principales resultados de los últimos inventarios de emisiones atmosféricas por ciudad (reporte a abril de 2017)	12
Figura 2.1	Etapas para el desarrollo de un inventario de emisiones atmosféricas	13
Figura 2.2	Relación de la representatividad-costo determinación de emisiones contaminantes	20
Figura 2.3.	Continuidad y actualización de un inventario de emisiones atmosféricas	24
Figura 3.1.	Principales etapas del proceso de refinación de petróleo	30
Figura 3.2.	Ejemplo de clasificación según las características de fuentes fijas	33
Figura 3.3.	Niveles de complejidad para un inventario de fuentes puntuales	34
Figura 3.4.	Información necesaria para la evaluación de emisiones por balance de masas	40
Figura 3.5.	Análisis de masa del material particulado (MP) en la operación de recubrimiento	41
Figura 4.1.	Niveles de complejidad para un inventario de fuentes móviles	59
Figura 4.2.	Árbol de decisión para estimación de emisiones de fuentes móviles	63
Figura 4.3.	Ejemplo de dinamómetro de chasis	66
Figura 5.1.	Torres de medición de emisiones biogénicas	83
Figura 5.2.	Relación espacio-temporal y herramientas para la estimación de flujos de emisiones	84

NOMENCLATURA QUÍMICA

BFC	Bromofluorocarburos
C ₂ H ₆	Etano
C ₃ H ₈	Propano
Cd	Cadmio
CFC	Clorofluorocarburos
CH ₄	Metano
Cl	Cloro
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
Cu	Cobre
HC	Hidrocarburos
HF	Fluoruro de Hidrógeno
HCl	Cloruro de Hidrógeno
HBFC	Hidrobromofluorocarburos
HCFC	Hidroclofluorocarburos
Hg	Mercurio
H ₂ O	Agua
H ₂ S	Ácido Sulfhídrico
NH ₃	Amoníaco
NO	Monóxido de Nitrógeno
NO ₂	Dióxido de Nitrógeno
N ₂ O	Óxido Nitroso
NO _x	Óxidos de Nitrógeno
O ₃	Ozono
Pb	Plomo
PHA	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
Rh	Rodio
SO _x	Óxidos de Azufre
SO ₂	Dióxido de Azufre
TAME	Ter-Amil-Metil-Éter

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1.	Usos de la Información generada en los inventarios de emisiones atmosféricas	10
Tabla 2.1.	Tipos de inventarios de emisiones atmosféricas según su propósito	14
Tabla 2.2.	Definiciones y ejemplos del alcance de un inventario de emisiones atmosféricas	15
Tabla 2.3.	Clasificación de los contaminantes atmosféricos	16
Tabla 2.4.	Ejemplo de alcance de un inventario de emisiones atmosféricas	17
Tabla 2.5.	Componentes mínimos de un plan de trabajo	17
Tabla 2.6.	Principales casos en los que se realiza la actualización de un inventario de emisiones atmosféricas	24
Tabla 3.1.	Ejemplo de actividades industriales y contaminantes a monitorear de acuerdo con el artículo 6 de la Resolución 909 de 2008.	28
Tabla 3.2.	Métodos a utilizar en la evaluación de emisiones en una industria petrolera	36
Tabla 3.3.	Resultados de diferentes contaminantes generados por una caldera de quema de petróleo, utilizando un sistema de monitoreo continuo de emisiones	38
Tabla 3.4.	Información necesaria para la evaluación de emisiones atmosféricas mediante factor de emisión.	44
Tabla 3.5.	Capítulos de consulta para los factores de emisión ya establecidos según el "AP-42" y el "Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016"	46
Tabla 3.6.	Factores de emisión para NO _x en calderas de >100 MMBtu/h	47
Tabla 4.1.	Categorías de vehículos conforme a los ciclos de prueba de Estados Unidos	51
Tabla 4.2.	Categorías de vehículos conforme a los ciclos de prueba de la Unión Europea	51
Tabla 4.3.	Categorías de vehículos tipo motocicleta de acuerdo con la clasificación de la EPA, Estados Unidos	52
Tabla 4.4.	Categorías de vehículos de dos o tres ruedas y los cuatriciclos de acuerdo con el reglamento de la UE	52
Tabla 4.5.	Sistemas de control de emisiones de acuerdo con la normativa de Estados Unidos y de Europa	54
Tabla 4.6.	Clasificación por clase de vehículo según la legislación colombiana	56
Tabla 4.7.	Categoría vehicular según INVÍAS e INCO	58
Tabla 4.8.	Clasificación de vehículos de acuerdo con las tablas paramétricas del RUNT	58
Tabla 4.9.	Fuentes de consulta de factores de emisión para fuentes móviles de acuerdo con EEA, 2016.	62
Tabla 5.1.	Clasificación de fuentes naturales Guía de inventarios de emisiones contaminantes al aire de la Agencia Ambiental Europea - EEA	72
Tabla 5.2.	Procesos asociados a la generación compuestos orgánicos volátiles biogénicos (COVB) por la vegetación	74
Tabla 5.3.	Unidades de coberturas de la tierra para Colombia para la leyenda nacional, escala 1:100.000	75

LISTA DE ABREVIATURAS

ACCEFYN	Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Física y Naturales.	INCO	Instituto Nacional de Concesiones
ACPM	Aceite Combustible para Motores	INVÍAS	Instituto Nacional de Vías
BHP	Potencia al freno	ISO	Organización Internacional de Estandarización
CIU	Clasificación Industrial Internacional Uniforme de las Actividades Económicas	LAI	Índice de área foliar, sigla en inglés de: <i>leaf area index</i>
CEM	Monitoreo continuo de emisiones - sigla en inglés de: <i>continuous emission monitoring</i>	LMD	Densidad másica foliar, sigla en inglés de: <i>leaf mass density</i>
CEMS	Sistemas de monitoreo continuo de emisiones, sigla en inglés de: <i>continuous emissions monitoring system</i>	MAVDT	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
CEN	Comité Europeo de Normalización	Minambiente	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
CFR	Código Federal de Regulaciones de Estados Unidos	MEGAN	Modelo de emisiones de gases y aerosoles de la naturaleza, sigla en inglés de: <i>model of emissions of gases and aerosols from nature</i>
CMAQ	Modelo de la comunidad de calidad del aire multiescalar, sigla en inglés de <i>community multiscale air quality</i>	MOVES	Simulador de emisiones vehiculares, sigla en inglés de: <i>motor vehicle emission simulator</i>
COP	Compuestos orgánicos persistentes	MP	Material particulado
COV	Compuestos orgánicos volátiles	NCAR	Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas, sigla en inglés de: <i>National Center for Atmospheric Research</i>
COVB	Compuestos orgánicos volátiles biogénicos	NFR	Nomenclatura para el reporte, sigla en inglés de: <i>nomenclature for reporting</i>
COVNM	Compuestos orgánicos volátiles diferentes de Metano	OBD	Sistema de autodiagnóstico a bordo, sigla en inglés de: <i>on board diagnostics</i>
CPF	Sistema catalítico con filtro de partículas, sigla en inglés de: <i>catalyzed particulate filter</i>	OCOV	Otros compuestos orgánicos volátiles
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística	PAH	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
DAP	Diámetro promedio del tronco a la altura del pecho	PAR	Radiación fotosintéticamente activa, sigla en inglés de: <i>photosynthetic active radiation</i>
DNP	Departamento Nacional de Planeación	PCV	Válvula de ventilación positiva del cárter, sigla en inglés de: <i>positive carter ventilation</i>
DOC	Catalizadores de oxidación de diésel, sigla en inglés de: <i>diesel Oxidation Catalysts</i>	PIB	Producto interno bruto
DPF	Filtro de material particulado, sigla en inglés de: <i>diesel particulate filter</i>	RUA	Registro único ambiental
EAM	Encuesta anual manufactura	RUNT	Registro Único Nacional de Tránsito
EEA	European Environment Agency (Agencia Ambiental Europea)	SAO	Sustancias agotadoras de la capa de ozono
EGR	Sistema de recirculación de gases, sigla en inglés de: <i>exhaust gas recirculation</i>	SCC	Código de clasificación de la fuente
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental)	SCR	Reducción catalítica selectiva, sigla en inglés de: <i>selective catalytic reduction</i>
EURO	Emisiones estándar europeas	SHED	Emisiones evaporativas en cabina sellada, sigla en inglés de: <i>sealed housing of evaporative determinations</i>
FTP	Procedimiento de prueba federal sigla en inglés de: <i>federal test procedure</i>	SFTP	Procedimiento de Prueba Federal Suplementario, sigla en inglés de: <i>supplemental federal test procedure</i>
GEI	Gases de efecto invernadero	SINA	Sistema Nacional Ambiental
GLP	Gas licuado de petróleo	SNAP	Nomenclatura seleccionada para el reporte de contaminantes al aire, sigla en inglés de: <i>selected nomenclature for reporting of air pollutants</i>
GNV	Gas natural vehicular	SVCA	Sistemas de vigilancia de calidad del aire
HCT	Hidrocarburos Totales	TBE	Tasas básicas de emisión
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia	TRI	Inventario de emisiones tóxicas, sigla en inglés de: <i>toxic release inventory</i>
IEA	Inventario de emisiones atmosféricas	UPME	Unidad Planeación Minero Energética
IPPC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático, sigla en inglés de: <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>	VGT	Turbocargador de geometría variable, sigla en inglés de: <i>variable geometry turbine</i>
IVE	Modelo internacional de emisiones vehiculares, sigla en inglés de: <i>International Vehicle Emissions model</i>		

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este documento se realizó con base en los productos desarrollados en el marco del contrato de prestación de servicios de consultoría No. 2070389 (Financiado por el Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento - BIRF), suscrito entre el Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo – FONADE y K-2 Ingeniería Limitada, para el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Se agradece a la señorita Alexandra Villamil, quien apoyó con la búsqueda del estado del arte en la materia, como parte del desarrollo de la pasantía realizada en el marco del convenio 069 de 2012 suscrito entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y la Universidad Militar Nueva Granada.

Con estos aportes y los desarrollos de los profesionales del grupo de Gestión Ambiental Urbana de la Dirección de Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se emite la presente guía como documento de referencia para los diferentes actores de interés.

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es un problema creciente para el ambiente y la salud a nivel global. El deterioro de la calidad del aire ha sido un tema de afinidad para investigadores de diferentes ramas, quienes han documentado su evolución durante décadas. A pesar de los grandes esfuerzos realizados para controlar el deterioro de la atmósfera por múltiples emisiones, este tipo de contaminación sigue siendo un serio motivo de preocupación a nivel ambiental en el mundo.

En Colombia existe un interés creciente y una mayor conciencia sobre la problemática ambiental, particularmente sobre el fenómeno de la contaminación atmosférica, ya que es el mayor generador de costos sociales después de la contaminación del agua y de los desastres naturales. De acuerdo con un estudio desarrollado por el Banco Mundial para el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, anualmente la contaminación del aire ocasiona alrededor de 8609 muertes prematuras en el país, generando costos por morbilidad y mortalidad que ascienden a \$15,4 billones de pesos, equivalentes al 1,4% del producto interno bruto (PIB) de 2015 del país (DNP, 2017).

Con el objetivo de impulsar la gestión de la calidad del aire y alcanzar niveles de inmisión adecuados para proteger la salud y el ambiente, el hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – Minambiente, adoptó en el año 2010 la *Política de prevención y control de la contaminación del aire*.

Durante la elaboración de la *Política de prevención y control de la contaminación del aire*, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible identificó como unas de las líneas de acción prioritarias para el país, el desarrollo de herramientas técnicas para la formulación de estrategias de reducción de las emisiones contaminantes al aire incluidos los sistemas de vigilancia de calidad del aire (SVCA) y la elaboración de inventarios de emisiones contaminantes a la atmósfera.

La *Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas*, es un documento de referencia que compila los principales criterios técnicos necesarios para desarrollar un inventario de emisiones.

En esta guía, las autoridades ambientales, los municipios, las entidades territoriales, las instituciones académicas, los generadores de emisiones y el público en general, podrán encontrar información sobre los procedimientos y metodologías existentes para la elaboración de inventarios de emisiones que cumplan con criterios de calidad, coherencia, integridad, comparabilidad, representatividad y transparencia.

Para la elaboración de este documento se ha tomado como material de referencia, publicaciones técnicas científicas, publicaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM y otras entidades del Sistema Nacional Ambiental - SINA, así como resultados de consultorías previas contratadas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Con esta primera edición de la *Guía para la Elaboración de Inventarios de Emisiones Atmosféricas* se busca promover en Colombia la formulación y el seguimiento a estrategias de reducción de la contaminación atmosférica con criterios técnicos de calidad.

INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS

I

1.1. ¿QUÉ ES UN INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS?

Un inventario de emisiones atmosféricas, permite conocer la cantidad de fuentes existentes, los contaminantes que emiten y la cantidad de contaminantes emitida.

Un inventario de emisiones atmosféricas es un conjunto de datos que caracterizan y consolidan, mediante sumatoria, las emisiones de contaminantes atmosféricos, de acuerdo con el tipo de fuente y el tipo y cantidad de contaminantes emitidos, en un área geográfica y en un intervalo de tiempo determinados (ecuación 1.1) (EPA, 1999a).

Los inventarios de emisiones son instrumentos indispensables en los procesos de gestión de calidad del aire y toma de decisiones, ya que son el punto de partida para la implementación, evaluación y ajuste de programas y medidas de control, tendientes a mejorar la calidad del aire.

Un inventario de emisiones debe ser completo y preciso, en la medida de las posibilidades técnicas disponibles y de acuerdo con los objetivos planteados. Estas dos características son importantes, ya que la información obtenida se convierte en la base para la determinación de estrategias de control y normas nacionales, entre otros. Cualquier error en ellas podría conllevar a resultados no deseados de las estrategias formuladas. El inventario de emisiones debe mejorar estas características en la medida en que se hace dinámico y se ajusta y complementa de forma periódica.

Un inventario de emisiones atmosféricas se puede expresar como:

$$IEA = \sum_{i=1}^n E_{j,t} \quad (1.1)$$

Donde:

IEA : inventario de emisiones atmosféricas para la sustancia o mezcla de sustancias (j) en el periodo de tiempo (t).

$E_{j,t}$: emisión atmosférica de la sustancia o mezcla de sustancias (j), generada por la actividad (i) en el periodo de tiempo (t).

n : número total de actividades a inventariar.

Teniendo en cuenta que en la mayoría de los casos no es posible contar con información de las emisiones medidas de forma directa durante el periodo de tiempo de evaluación en cada una de las fuentes a inventariar, el enfoque más común para estimar las emisiones en un inventario ($E_{j,t}$), consiste en combinar información de los procesos de cada actividad (factor de actividad), con información de las emisiones asociadas a los procesos de dicha actividad (factor de emisión) (EEA, 2016a) (ecuación 1.2).

En este sentido la ecuación básica para estimar las emisiones atmosféricas es:

$$\mathbf{IEA} = \sum_{i=1}^n (\mathbf{FE}_{j,i} \times \mathbf{FA}_{i,t}) \quad (1.2)$$

Donde:

- $\mathbf{FE}_{j,i}$: factor de emisión de la sustancia o mezcla de sustancias (j) para la actividad (i).
- $\mathbf{FA}_{i,t}$: factor de actividad de la actividad (i) durante el tiempo (t).

Es importante tener en cuenta que la ecuación para la determinación de las emisiones puede variar (como se mostrará más adelante), ya que se pueden llegar a incluir otros parámetros de estimación de las emisiones como la reducción de estas por el efecto del uso de sistemas de control de emisiones que no hayan sido incluidos en los factores de emisión.

1.2. ¿CÚAL ES EL OBJETIVO DE UN INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS?

El objetivo general de un inventario de emisiones atmosféricas es cuantificar las emisiones generadas por un grupo de fuentes o actividades de interés.

En el marco de la *Política de prevención y control de la contaminación del aire* de Colombia, los inventarios de emisiones atmosféricas son una de las principales herramientas promovidas para identificar fuentes de emisión y generar información técnica para (MAVDT, 2010a):

- ▶ Informar y orientar a los actores de interés, en la toma de decisiones relacionadas con la protección del ambiente y promoción de la salud.
- ▶ Formular y evaluar estrategias para la prevención y control de la contaminación del aire (p. ej.: programas de descontaminación).
- ▶ Evaluar el desempeño ambiental en materia de emisiones atmosféricas de una actividad, sector o región, entre otros.
- ▶ Diseñar sistemas de vigilancia de calidad del aire.

Adicionalmente, los inventarios de emisiones atmosféricas son una herramienta para la cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y sustancias agotadoras de la capa de ozono (SAO); la cual es necesaria para la formulación y seguimiento de las estrategias de mitigación, reporte de avances en el cumplimiento de los acuerdos internacionales y comercio de derechos de emisión.

Dentro de las estrategias de divulgación de información de carácter ambiental y transparencia en los procesos, los inventarios de emisiones atmosféricas son la base técnica para el cálculo de las emisiones corporativas que pueden ser sujetas del registro de emisiones y transferencia de contaminantes.

El objetivo de un inventario de emisiones atmosféricas es cuantificar las emisiones generadas por un grupo de fuentes o actividades de interés.

1.3. ¿CUÁLES SON LOS PRINCIPALES USOS DE LA INFORMACIÓN GENERADA EN LOS INVENTARIOS DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS?

Tabla 1.1. Usos de la Información generada en los inventarios de emisiones atmosféricas

Informar y orientar a las autoridades ambientales y demás tomadores de decisiones involucrados en el control y la prevención de la contaminación del aire.	Evaluar posibles efectos de contaminación transfronteriza. Reportar avances en el cumplimiento de los acuerdos internacionales. Generar información para el comercio de derechos de emisión.
Definir objetivos y prioridades en la gestión de la calidad del aire.	Diseñar sistemas de monitoreo y control de emisiones.
Generar información para evaluar los impactos ambientales.	Identificar aportes de contaminantes atmosféricos por tipo de fuente, sector económico o zonas geográficas.
Elaborar estudios epidemiológicos y de riesgos para la salud humana.	Evaluar la relación costo beneficio de regulaciones en la materia.
Desarrollar instrumentos técnicos, económicos y normativos para el control y prevención de la contaminación del aire.	Elaborar estudios sectoriales, regionales y nacionales de gases de efecto invernadero y sustancias agotadoras de la capa de ozono.
Evaluar el cumplimiento de normas asociadas a emisiones de contaminantes.	Generar el reporte de emisiones y transferencia de contaminantes.
Diseñar campañas de monitoreo de calidad del aire.	Informar a la comunidad y al público en general.
Diseñar planes de contingencia por contaminación atmosférica y programas de reducción de la contaminación del aire.	Modelar la calidad del aire.

1.4. ¿A QUIÉNES ESTÁ DIRIGIDA LA GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS?

Los lineamientos para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas establecidos en la presente guía, son un referente técnico para todos los actores que requieran reportar información consolidada sobre emisiones contaminantes al aire a entidades del Sistema Nacional Ambiental o del gobierno, incluidos entre otros: el sector regulado, las autoridades ambientales, la academia, los institutos de investigación y las entidades públicas territoriales.

1.5. ENFOQUES PARA LA ELABORACIÓN DE UN INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS

Dependiendo del propósito y de la disponibilidad de información, un inventario de emisiones se puede desarrollar desde dos enfoques:

Aproximación de “de arriba hacia abajo” (*top down*) en la cual se parte de información general o agregada (macro), por ejemplo, a nivel de país, para llegar a información específica de emisiones requerida.

Un ejemplo del uso de metodologías de arriba hacia abajo es la estimación de emisiones nacionales a partir del uso de información de consumos sectoriales de combustible asociado a un factor de emisión agregado.

De acuerdo con la tercera comunicación nacional de cambio climático, el sector “industria de la energía” generó 24,5 Mton de CO₂ equivalente, por la quema de combustibles en las actividades de extracción y producción de petróleo y gas natural y en las centrales termoeléctricas, refinerías, centros de tratamiento de gas, coquerías, altos hornos y carboneras (categoría I.A.I, de la clasificación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático - IPCC) (IDEAM *et ál.*, 2015)

Aproximación “de abajo hacia arriba” (*bottom up*) en la cual se parte de información específica (micro), o más detallada, la cual al agregarse permite llegar a la información general de emisiones requerida.

Un ejemplo de del uso de la metodología “de abajo hacia arriba” es la estimación de las emisiones generadas por actividades textiles en un municipio de Colombia a partir de los resultados de las mediciones realizadas en cada empresa y reportada a la autoridad ambiental a través del informe de evaluación de emisiones.¹

La selección del enfoque depende, en primer lugar y en gran medida, del nivel y la calidad de información con la que se cuenta; y en segundo lugar, con el alcance deseado del inventario de emisiones.

¿Sabía usted qué?

- En el año 1992 la Agencia de Cooperación Internacional de Japón - JICA realizó en el marco del “Estudio sobre calidad del aire, caso área urbana de Santafé de Bogotá” el primer ejercicio de estimación de los aportes a la contaminación del aire de las fuentes fijas y fuentes móviles de emisión en Colombia.

De acuerdo con los resultados del estudio de JICA, para el año 1992, en Bogotá las fuentes móviles generaban el 16 % de las emisiones de SO₂ y el 82 % de las emisiones de NO_x.

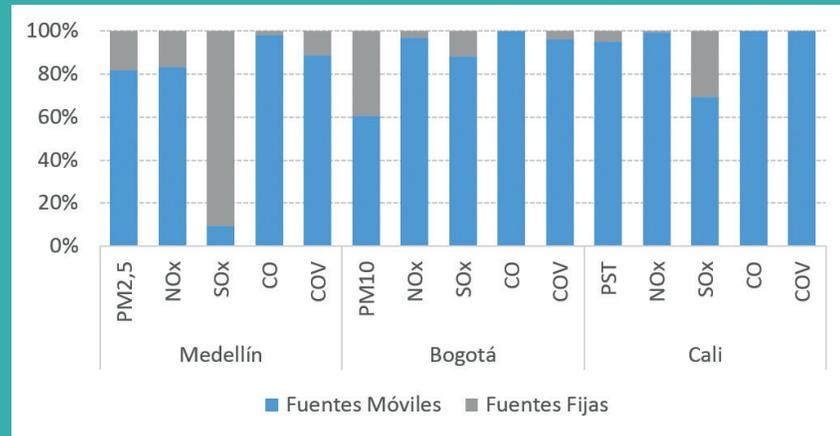
1. Informe de evaluación de emisiones: establecido en el Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas, adoptado a través de la Resolución 760 de 2010 y ajustado a través de la Resolución 2153 de 2010.

- En el año 2001 el Departamento Administrativo de Medio Ambiente - DAMA, hoy Secretaría Distrital de Ambiente –SDA, realizó el primer inventario público de emisiones contaminantes al aire de fuentes fijas de Bogotá.

Durante la elaboración de este inventario se visitaron cerca de 4.500 establecimientos industriales.

- Desde el año 2000 en Colombia se han inventariado las emisiones de algunos contaminantes en las principales ciudades del país, como son: Bogotá, Medellín, Cali, Cartagena, Sogamoso y Barranquilla.

Figura I.1. Principales resultados de los últimos inventarios de emisiones atmosféricas por ciudad (reporte a abril de 2017)



Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá, actualización 2015, AMVA – 2017; Fortalecimiento Tecnológico de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire y evaluación de la contaminación atmosférica de la ciudad de SANTIAGO DE CALI, DAGMA -2012; Actualización del inventario de emisiones para Bogotá a 2012, SDA – 2015.

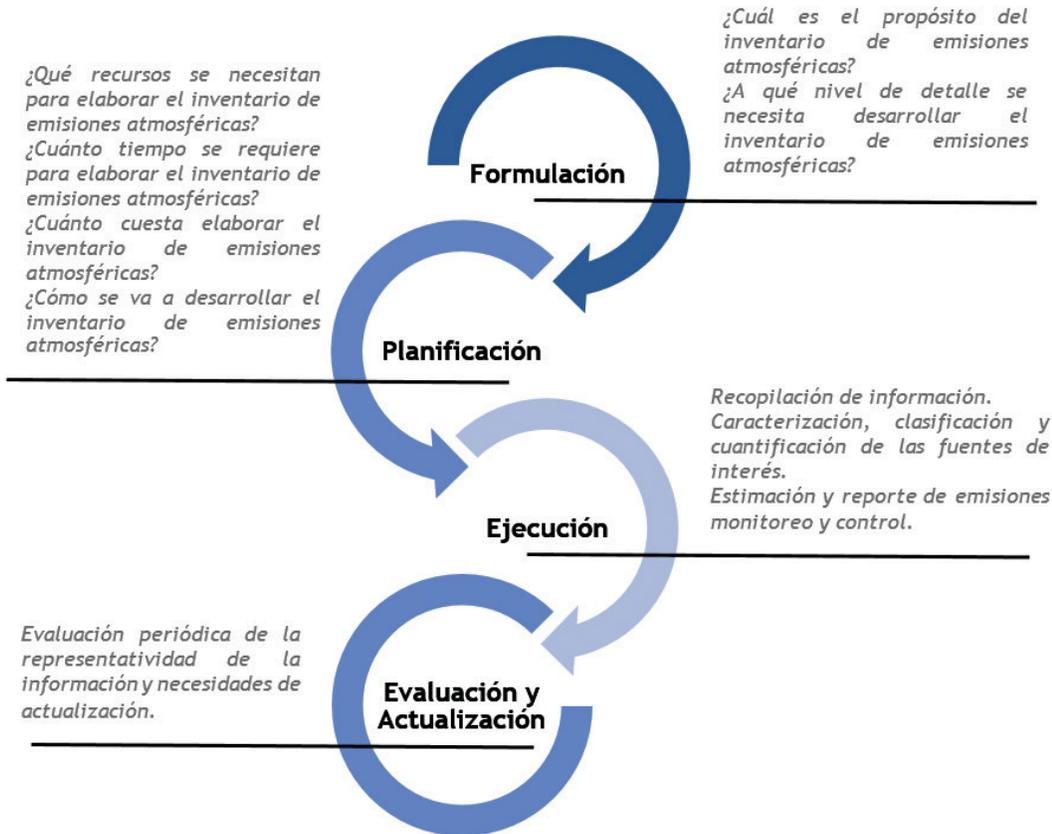
DESARROLLO DE UN INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS

2

Un inventario de emisiones atmosféricas es el resultado de la ejecución ordenada de acciones dirigidas a cumplir con criterios de calidad, coherencia, integridad, comparabilidad, representatividad de la estimación de emisiones generada por una o varias fuentes de interés.

El proceso de elaboración de un inventario de emisiones atmosféricas consta de cuatro etapas: a) formulación, b) planificación, c) ejecución, d) evaluación y actualización, las cuales se desarrollan a continuación.

Figura 2.1 Etapas para el desarrollo de un inventario de emisiones atmosféricas



2.1. FORMULACIÓN

La formulación es la etapa en la cual se establecen las bases para el desarrollo del inventario de emisiones atmosféricas. Si bien en la etapa de formulación no se requiere de avances de detalle, los errores que se cometan durante esta etapa suelen tener grandes repercusiones en la calidad de la información y el uso que se le pueda dar a la misma.

Al finalizar la etapa de formulación, todos los actores involucrados deberán tener claridad sobre cuál es el propósito del inventario de emisiones atmosféricas y sobre a qué nivel de detalle se necesita desarrollar el inventario de emisiones atmosféricas.

A continuación, se desarrollarán los conceptos de propósito y alcance de un inventario de emisiones atmosféricas.

2.1.1. INVENTARIOS DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS SEGÚN SU PROPÓSITO

Como se observó en el numeral 1.2, el objeto de un inventario de emisiones atmosféricas “es cuantificar las emisiones generadas por un grupo de fuentes o actividades de interés”. Sin embargo, la información de las emisiones generada por un inventario de emisiones atmosféricas puede ser utilizada para atender diferentes necesidades por lo cual los inventarios tienen enfoques o propósitos diferentes.

En este sentido, el primer paso en la elaboración de un inventario de emisiones atmosféricas es identificar las necesidades y establecer el propósito del mismo.

Con el fin de orientar a los usuarios de esta guía, se han definido 6 grupos de inventarios de emisiones atmosféricas según su propósito (mas no se limita a ellos) descritos a continuación en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Tipos de inventarios de emisiones atmosféricas según su propósito

TIPO DE INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS	PROPÓSITO
Inventario de emisiones atmosféricas para el reporte de emisiones	Generar información consolidada de emisiones para la construcción de reportes de emisiones nacionales, regionales, locales o institucionales.
Inventario de emisiones atmosféricas para la formulación y evaluación de estrategias	Generar información de emisiones para formular y evaluar estrategias enfocadas a la prevención y control de la contaminación del aire.
Inventario de emisiones atmosféricas para el diseño de SVCA	Generar información de soporte para el diseño del sistema de vigilancia de calidad del aire y campañas de monitoreo de calidad del aire.
Inventario de emisiones atmosféricas para la gestión ambiental corporativa	Generar información de soporte para el diseño, implementación y seguimiento de mecanismos enfocados a la reducción de las emisiones de contaminantes al aire en actividades productivas y de servicio.
Inventario de emisiones atmosféricas para modelación	Generar información de soporte para la modelación de la calidad del aire.

“El éxito de los proyectos radica en dos simples principios: objetivos claros y compromisos fuertes” (Thompson M, 1981).

Inventario de emisiones atmosféricas para investigación

Generar información de soporte para la elaboración de estudios de diferente índole.

En algunas situaciones se requiere que los inventarios de emisiones atmosféricas sean multipropósito, casos en los cuales se deberá garantizar que estos cumplan con las características asociadas a cada uno de los propósitos para los cuales se va a diseñar el inventario de emisiones atmosféricas.

2.1.2. ALCANCE DE UN INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS

Una vez establecido el propósito del inventario de emisiones atmosféricas, se debe establecer el alcance del mismo, es decir el conjunto de límites dentro de los cuales se va a llevar a cabo el inventario. Éste incluye el lugar o espacio geográfico donde se va a desarrollar (alcance espacial) y el periodo de tiempo para el cual se va a realizar (alcance temporal). De manera orientadora, en la tabla 2.2 se describen tanto el tipo de alcance como el nivel de resolución aplicable a un inventario de emisiones atmosféricas.

Tabla 2.2. Definiciones y ejemplos del alcance de un inventario de emisiones atmosféricas

	DEFINICIÓN	EJEMPLOS
Alcance espacial:	Área o dominio geográfico para el cual se van a determinar o estimar las emisiones del inventario	Colombia, área metropolitana, frente de explotación, planta, bodega
Resolución espacial:	Escala o unidad en la cual se va a reportar la información de las emisiones	Km ² , m ² , hectáreas
Alcance temporal:	Periodo de tiempo en el cual se van a determinar o estimar las emisiones del inventario	Día sin carro, del 30 de junio al 31 de diciembre del año 2009, año 2015
Resolución temporal:	Escala temporal en la cual se va a reportar la información de las emisiones	Anual, mensual, diaria, horaria

Otros criterios importantes a definir dentro del alcance de un inventario de emisiones atmosféricas son los contaminantes atmosféricos a inventariar.

A través de los inventarios de emisiones atmosféricas se puede generar información de las emisiones de cualquier sustancia de interés, sin embargo, su desarrollo se ha centrado en las sustancias con efectos negativos sobre el ambiente y la salud conocidos como contaminantes atmosféricos (ver tabla 2.3).

El tiempo y los recursos requeridos para desarrollar un inventario de emisiones atmosféricas pueden variar en función del propósito y alcance del mismo.

Tabla 2.3. Clasificación de los contaminantes atmosféricos

Clasificación de contaminantes atmosféricos		EJEMPLOS
Contaminantes criterio	Contaminantes que por sus concentraciones en la atmósfera y sus efectos en la salud y el ambiente son considerados de referencia	CO, NO ₂ , SO ₂ , material particulado (MP), O ₃
Gases de efecto invernadero (GEI)	Compuestos químicos en estado gaseoso que se acumulan en la atmósfera y son capaces de absorber y reemitir radiación infrarroja aumentando la temperatura de atmósfera baja	CFC, CH ₄ , N ₂ O, CO ₂
Sustancias agotadoras de la capa de ozono (SAO)	Compuestos químicos con potencial para reaccionar con las moléculas de ozono de la atmósfera que producen la destrucción y adelgazamiento	HCFC, HBFC, CFC, BFC
Sustancias tóxicas	Compuestos químicos que generar efectos nocivos en la salud y el ambiente	Dioxinas, furanos, arsénico, metales

Tras el trágico accidente químico de 1984 en Bhopal (India), el Congreso de Estados Unidos de América aprobó la ley para la planificación de emergencias y del derecho a saber de la comunidad, estableciendo un registro llamado el Inventario de Emisiones Tóxicas (TRI, por sus siglas en inglés), que rastrea las liberaciones al aire, agua y suelo de más de 675 sustancias químicas tóxicas que puedan representar una amenaza para la salud y el ambiente (EPA, 2017a).

La iniciativa de EE.UU., fue rápidamente adoptada por otros países del mundo quienes durante el proceso de su reglamentación establecieron sus propias listas de sustancias de interés. Actualmente el país con mayor número de sustancias sujetas a reporte es Estados Unidos de América con 692 sustancias (EPA, 2017b).

Finalmente, el alcance de un inventario de emisiones atmosféricas debe incluir los tipos de fuentes a inventariar, para lo cual se debe contar con conocimientos generales de las fuentes existentes en el área de influencia del inventario de emisiones atmosféricas.

Durante la formulación de un inventario de emisiones atmosféricas es indispensable el desarrollo de una evaluación inicial de las posibles fuentes de emisión existentes en el área de influencia del inventario. Esta evaluación permite entre otros asuntos, identificar la variabilidad de las fuentes, los combustibles empleados y las posibles emisiones de interés, aspectos indispensables para la definición del alcance del inventario.

En los capítulos posteriores se desarrollarán con mayor profundidad los inventarios de emisiones atmosféricas de acuerdo con la fuente de emisión. En la tabla 2.4 se muestra un ejemplo general del alcance de un inventario de emisiones atmosféricas.

Tabla 2.4. Ejemplo de alcance de un inventario de emisiones atmosféricas

EJEMPLO: OBJETIVO, PROPÓSITO Y ALCANCE DE UN INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS	
Objetivo:	Cuantificar las emisiones de contaminantes al aire, generados durante el año 2015 en Bucaramanga.
Propósito:	Formulación y evaluación de estrategias enfocadas a la prevención y control de la contaminación del aire.
Alcance:	Emisiones de material particulado y óxidos de azufre generadas por el sector manufacturero y de transporte en Bucaramanga (zona industrial Chimita, sector de comuna 4 occidental), Girón y Piedecuesta, durante el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre del 2015. Reporte en t/año, por mes y por sector.

2.2. PLANIFICACIÓN

Después de haberse definido el objetivo, el propósito y el alcance de un inventario de emisiones atmosféricas se debe proceder a la planeación de su desarrollo.

La elaboración de un plan de trabajo es un paso fundamental en el desarrollo del inventario. Del diseño y cumplimiento del mismo depende que todos los actores involucrados se encuentren articulados y se eviten incidentes o inconvenientes que puedan afectar la calidad de los resultados, incrementar los tiempos de ejecución y generar posibles sobre costos.

El plan de trabajo para la elaboración de un inventario de emisiones debe contener como mínimo los siguientes aspectos:

Tabla 2.5. Componentes mínimos de un plan de trabajo

Objeto y alcance del inventario de emisiones atmosféricas	Consolidación del objeto, propósito y alcance del inventario de emisiones atmosféricas establecidos en la etapa de formulación del inventario.
Metodología	Conjunto de métodos que se utilizarán para determinar el inventario de emisiones atmosféricas incluidos los métodos de clasificación y cuantificación de fuentes, métodos de medición o estimación de emisiones y procedimientos de control y aseguramiento de la calidad.
Recursos humanos	Personal requerido para el desarrollo del inventario de emisiones atmosféricas incluidos sus perfiles, funciones y responsabilidades.
Recursos técnicos	Recursos tangibles requeridos para el desarrollo del inventario de emisiones atmosféricas, incluidos entre otros materiales: suplementos, equipos y software (herramienta de gestión de datos).
Presupuesto	Relación de los egresos asociados al desarrollo del inventario de emisiones atmosféricas incluidos los recursos humanos, técnicos, logísticos y de información, entre otros.
Cronograma de actividades y planeación logística	Es la organización temporal y espacial en la cual se desarrollarán cada una de las actividades del inventario de emisiones atmosféricas

2.3. EJECUCIÓN

La ejecución es la etapa en la cual se desarrolla el inventario de emisiones atmosféricas de conformidad con lo estipulado en el plan de trabajo.

A continuación, se describen las principales actividades que se desarrollan durante la ejecución de un inventario de emisiones atmosféricas.

2.3.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Para el desarrollo de un inventario de emisiones atmosféricas se requiere información que permita la caracterización y cuantificación de las fuentes de emisión a inventariar.

La información mínima necesaria para la elaboración de un inventario de emisiones atmosféricas varía en función de los objetivos y el alcance del inventario. Sin embargo, gran parte de la información está relacionada con el tipo de fuente (fija, móvil o natural), el combustible utilizado (tipo y consumo), datos de actividad de la fuente (tiempos de operación, cantidad de materia prima empleada, cantidad de producto), factores de emisión, parámetros ambientales, entre otros.

La determinación de las fuentes de información y los métodos de estimación de las emisiones, están interrelacionados. La información de las fuentes que se requiere recopilar depende del método de estimación de las emisiones que va a ser utilizado, sin embargo, en aquellos casos en los que no se cuente con los recursos, el tiempo o el acceso a la información, el método de estimación a ser utilizado dependerá de la información disponible.

Las fuentes de información a consultar durante el desarrollo de un inventario de emisiones atmosféricas, se pueden dividir en dos:

Información primaria: es la información que se obtiene a través de evidencia directa de las fuentes a inventariar.

Información secundaria: es la información obtenida a través de estudios o documentos en los cuales se interpreta o ajusta la información primaria de las fuentes a inventariar o de fuentes similares.

Es recomendable emplear fuentes de información confiables y robustas, como por ejemplo bases de datos oficiales, información generada por entidades gubernamentales, institutos de investigación, artículos científicos publicados en revistas indexadas, entre otros.

2.3.2. CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE EMISIÓN

La clasificación de las fuentes de emisión en un inventario de emisiones atmosféricas, corresponde al ordenamiento de estas en grupos o categorías de interés o con características similares de emisión, de acuerdo con la información recopilada.

De conformidad con el artículo 2.2.5.1.1.2 del Decreto 1076 de 2015, una fuente de emisión es *“toda actividad, proceso u operación, realizada por los seres humanos o con su intervención, susceptible de emitir contaminantes al aire”*.

Los criterios de clasificación pueden variar, dependiendo del grupo de fuentes a inventariar. Un primer criterio de clasificación corresponde al origen de la fuente. De acuerdo a esta clasificación las fuentes de emisión se pueden agrupar en fuentes antropogénicas (generadas por acción directa

Información primaria: encuestas, entrevistas, censos, fotos, mediciones, etc.

Información secundaria: revisión de bibliografía, estudios anteriores, líneas base, etc.

del ser humano) y fuentes naturales (generadas sin intervención directa del ser humano) ya sean biogénicas o geogénicas.

Otro criterio de clasificación está relacionado con la tipología de la fuente. De acuerdo a esta clasificación las fuentes² se pueden agrupar en:

Fuentes fijas: son fuentes de emisión situadas en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa (p. ej.: establecimientos industriales).

A su vez las fuentes fijas pueden ser:

- **Puntuales:** fuente fija que emite contaminantes al aire por ductos o chimeneas.
- **Dispersas o difusas:** son aquellas en que los focos de emisión de una fuente fija se dispersan en un área, por razón del desplazamiento de la acción causante de la emisión.

Fuentes móviles: son las fuentes que, por razón de su uso o propósito, son susceptibles a desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza (p. ej.: automóviles, camiones, trenes, barcos, aviones, etc.)

Otros criterios para realizar la clasificación de fuentes para el desarrollo de un inventario de emisiones atmosféricas pueden ser: por tipo de combustible, actividad, proceso, clase equipos de combustión, tipología vehicular, tecnología vehicular, entre otros.

2.3.3. CUANTIFICACIÓN DE LAS FUENTES

La cuantificación de las fuentes consiste en determinar el número total de las fuentes existentes en el área de estudio, para cada uno de los grupos o categorías establecidos.

2.3.4. ESTIMACIÓN DE EMISIONES

El método más preciso para la estimación de emisiones de contaminantes atmosféricos es la medición directa. Este método incluye la medición de cada una de las fuentes involucradas en las emisiones, durante un periodo de tiempo determinado. En este método se utilizan sistemas de monitoreo continuo emisiones (CEMS, por sus siglas en inglés) o monitoreo paramétrico.

Otro método consiste en el balance de masas, para lo cual se requiere de información detallada de las entradas y salidas presentes en cada uno de los procesos y en cada una de las fuentes involucradas, durante un periodo determinado.

Como se mencionó, en la mayoría de los casos no es posible contar con mediciones directas durante todo el periodo de evaluación en todas fuentes a inventariar; en estas circunstancias se deben estimar las emisiones a través del uso de factores de emisión y factores de actividad.

En este sentido, los factores de emisión pueden ser calculados igualmente a partir de medición directa, balance de masas o modelos de estimación de una muestra representativa, de acuerdo a la clasificación de la fuente.

Cuando no se dispone de factores de emisión a nivel local o regional, se utilizan factores de emisión de referencia, a partir de compilaciones como el "AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission

2. MINAMBIENTE. Decreto 1076 de 2015, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

El AP-42 es la primera compilación de factores de emisión de contaminantes atmosféricos, de más de 200 tipos de fuentes. Fue realizado por la EPA y es publicado desde 1972.

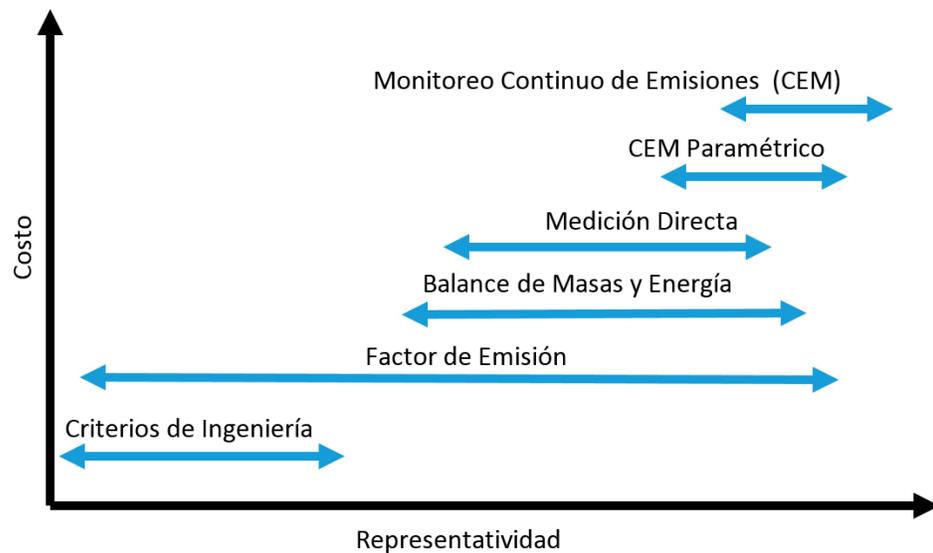
Factors” de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency, US-EPA), el “EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook”, de la Agencia Ambiental Europea (European Environment Agency, EEA), o la base de datos del IPCC para el caso de emisiones de gases efecto invernadero.

Otro método para la estimación de emisiones es a través de modelos de emisión, los cuales de basan principalmente en ecuaciones empíricas desarrolladas para ciertos procesos y tipos de fuentes.

La selección de la metodología para realizar la estimación de emisiones contaminantes es muy importante, teniendo en cuenta que la representatividad y el costo de un inventario de emisiones atmosféricas pueden variar significativamente.

En la figura 2.2, se muestra la relación representatividad-costo de los principales métodos de estimación de emisiones atmosféricas, que posteriormente se describen.

Figura 2.2 Relación de la representatividad-costo determinación de emisiones contaminantes
Adaptado de (EPA, 1995)



2.3.4.1. MEDICIÓN DIRECTA Y BALANCE DE MASAS

De acuerdo con el *Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas* (MAVDT, 2010b), se define:

Medición directa: es la captura de una muestra hecha directamente desde la chimenea o ducto de la fuente, utilizando equipos muestreadores (equipos que capturan una muestra que posteriormente debe ser analizada en un laboratorio) o analizadores instrumentales (equipos que miden directamente la concentración de los contaminantes y reportan los valores de las emisiones de manera inmediata).

Balace de masas: es la cuantificación de emisiones por balance de materia y energía, en donde se representan las entradas y salidas de un sistema con el fin de estimar de manera indirecta la emisión de sustancias contaminantes a la atmósfera.

La determinación de emisiones por medición directa, a su vez, requiere del uso de sistemas o métodos estandarizados, tales como sistemas de monitoreo continuo o monitoreo paramétrico

Medición directa es la captura de una muestra hecha directamente desde la chimenea o ducto de la fuente.

que requieren de información o medición durante todo el periodo a evaluar, en cada una de las fuentes involucradas en el proceso.

Los sistemas de monitoreo continuo de emisiones (CEMS, por sus siglas en inglés) son sistemas integrados que determinan la concentración o tasa de emisión de un gas o de material particulado, con una resolución temporal muy baja (p. ej.: cada 5 minutos). Estos sistemas de monitoreo continuo pueden ser instalados de forma permanente en las fuentes de emisión, lo cual permite tener información directa durante todo el periodo de evaluación establecido para el desarrollo del inventario de emisiones atmosféricas.

Por otra parte, el monitoreo paramétrico consiste en la medición indirecta de las emisiones a través del control de parámetros claves medibles correlacionados con el estado de funcionamiento del equipo de control de emisiones o el proceso involucrado (p. ej.: la presión). Estos parámetros de operación son monitoreados con termopares, medidores de presión diferencial u otro instrumento. Así mismo, el uso del monitoreo paramétrico puede proporcionar opciones más flexibles y menos costosas que los sistemas de monitoreo continuo, en el momento de demostrar el cumplimiento de las fuentes reguladoras.

2.3.4.2. FACTOR DE EMISIÓN

El factor de emisión es un valor que relaciona la cantidad de un compuesto que es emitido a la atmósfera, y una unidad de actividad o del proceso. Normalmente se expresan como: masa emitida del contaminante/parámetro dimensional del proceso involucrado (p. ej.: masa procesada, volumen del combustible consumido, consumo de energía, distancia recorrida o el tiempo de operación de la actividad, unidades de producción) (MAVDT, 2010b; Velasco E, Bernabé R, 2004).

En las diferentes actividades industriales es común que el factor de emisión se reporte como: masa de la sustancia emitida/unidad de masa del combustible o volumen de combustible utilizado. Así mismo, para fuentes móviles, el factor de emisión puede ser reportado como: masa de la sustancia emitida/unidad de distancia recorrida según el vehículo o categoría vehicular.

El factor de emisión a su vez, se puede obtener ya sea por medición directa o a través de compilaciones u otros inventarios ya desarrollados.

Medición directa: para esto se requiere la definición de una muestra representativa según la clasificación de la fuente y el uso de métodos o procesos estandarizados, tales como sistemas de monitoreo continuo, monitoreos paramétricos, muestreos puntuales y demás, definidos en el *Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas* (MAVDT, 2010b) y en las normas técnicas colombianas, entre otros.

Compilaciones u otros inventarios: según el nivel de representatividad requerido para el inventario de emisiones atmosféricas, el factor de emisión se puede obtener a partir de fuentes o compilaciones externas como las mencionadas anteriormente.

El nivel de incertidumbre de los resultados de las emisiones obtenidas mediante el uso de factores de emisión ya determinados, depende del nivel de similitud entre las fuentes a inventariar y las fuentes para las cuales se estableció el factor de emisión, incluyendo el diseño, tecnología, marca, combustible, operación y desgaste, entre otros.

Adicionalmente, otro método para determinar los factores de emisión es el uso de modelos de emisión, los cuales generalmente utilizan información de las concentraciones ambientales de una sustancia para estimar la emisión de una fuente o grupo de fuentes. Este método es ampliamente utilizado para determinar la emisión de fuentes de emisión difusas y de área.

AP-42 (EPA, 1995) y el EMEP/EEA (EEA, 2016a), son documentos que copilan factores de emisión para las distintas actividades o procesos involucrados en la emisión de contaminantes al aire.

Factor de actividad

De acuerdo con los factores de emisión definidos para cada fuente o categoría de fuentes, se debe determinar el factor de actividad, el cual permite relacionar la magnitud de una variable de interés de una actividad en un tiempo determinado. Por ejemplo, en fuentes móviles vehiculares, el factor de actividad puede corresponder a las toneladas de combustible utilizado o los kilómetros recorridos, durante un año. En procesos industriales, puede corresponder a la tasa de producción.

En algunas circunstancias durante el desarrollo de un inventario de emisiones atmosféricas, no es posible contar con la información de cada una de las fuentes requeridas para estimar el factor de actividad, en esos casos se debe recurrir al uso de métodos de estimación por análisis estadístico, modelos o proyecciones desde información disponible.

2.3.4.3. MODELOS DE EMISIÓN

Los modelos de emisión están basados en ecuaciones empíricas desarrolladas para ciertos procesos y tipos de fuentes. Estas ecuaciones en su mayoría, son desarrolladas por computadores de tal manera que un gran número de ecuaciones e interacciones puedan ser ejecutadas con facilidad. Los datos requeridos para los modelos de emisión varían de acuerdo a la fuente, pero en la mayoría de los casos se necesita como mínimo un parámetro físico de la fuente de interés.

“Los modelos de emisión están diseñados para generar estimaciones más exactas que las obtenidas con factor de emisión, sin embargo, esta exactitud depende en gran parte de la calidad de los datos de entrada y los supuestos en que se base” (SEMARNAT, 2005)³, por esta razón es importante antes de decidir qué modelo de emisión utilizar, comparar las necesidades del modelo con los datos disponibles.

2.3.5. REPORTE DE LAS EMISIONES

El reporte de las emisiones atmosféricas, es la forma ordenada de presentar la información de las emisiones generadas por cada grupo o categoría de fuente establecida, de conformidad con el alcance y el objetivo del inventario de emisiones atmosféricas. La forma de presentar este reporte y el nivel de detalle del mismo, pueden variar dependiendo del público objetivo para el cual se realiza el inventario.

2.3.6. ALMACENAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Durante el proceso de recopilación de información o de forma posterior, se debe realizar el almacenamiento ordenado de los datos (bases de datos) con el fin de facilitar su posterior procesamiento.

Dentro de los principales sistemas computacionales para la gestión de bases de datos se encuentran los programas Excel®, Access® y SQL® de Microsoft, numbers® de Apple o filemaker®, entre otros.

2.3.7. REPORTE TÉCNICO DE LA INFORMACIÓN

El reporte técnico de la información del inventario de emisiones atmosféricas, es la colección ordenada de todos los estudios, informes, metodologías, suposiciones, bibliografía y en general de todos los documentos utilizados para la elaboración del inventario de emisiones atmosféricas.

3. Pag 143

Esta información es de gran importancia ya que permitirá estimar el nivel de incertidumbre del inventario de emisiones atmosféricas.

En este reporte se deben incluir el origen y autores de la información base utilizada en el desarrollo del inventario de emisiones atmosféricas, de tal forma que se visualicen en cada una de las etapas realizadas y permitan su revisión o exploración posterior.

2.3.8. ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD

Una buena práctica en el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas es la implementación de procedimientos de aseguramiento y control de calidad, realizados con el fin de garantizar la fiabilidad, comparabilidad, integridad, precisión, coherencia y seguridad del inventario. En este sentido se tiene (EEA, 2016b):

Control de calidad: es un sistema de actividades técnicas rutinarias realizadas por el equipo que desarrolla el inventario, con el fin de identificar errores u omisiones en los datos, procedimientos, metodologías, fuentes de información, etc., empleados durante el desarrollo del inventario, así como evaluar y mantener la calidad del inventario que está siendo realizado.

Aseguramiento de la calidad: es un sistema de planificación de procedimientos de revisión, llevado a cabo por personal que no esté involucrado en el proceso de elaboración del inventario, ya que debe ser una revisión objetiva e independiente, que se realiza para evaluar la efectividad de los objetivos y el alcance planteados para la realización del inventario de emisiones atmosféricas, así como la calidad, precisión y representatividad del inventario y demás características que se tengan durante la elaboración del inventario.

El orden de las actividades requeridas en el desarrollo de un inventario de emisiones atmosféricas presentadas en esta guía, no necesariamente debe ser el estipulado, ya que la ejecución de cada una depende en gran parte de la información, fuentes, recursos, responsabilidad y objetivo.

2.4. EVALUACIÓN Y ACTUALIZACIÓN

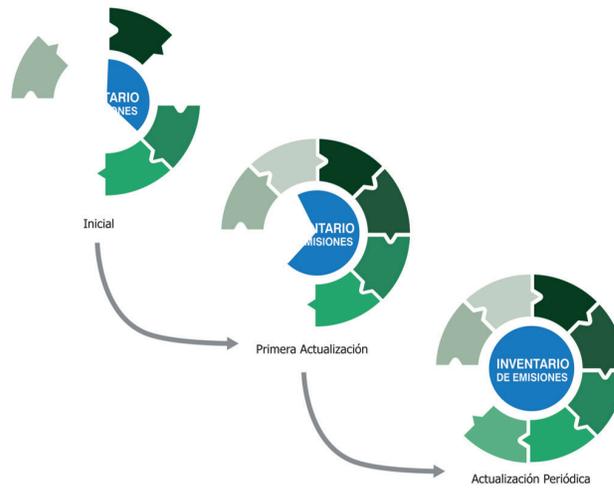
La información del inventario de emisiones atmosféricas es representativa para el alcance temporal y espacial para el cual fue diseñado, por lo cual, cuando se requiera información de un inventario de emisiones atmosféricas en periodos de tiempo, áreas geográficas, sustancias o tipos de fuente diferentes a las establecidas en el alcance de un inventario de emisiones atmosféricas existente, se deberá realizar una actualización del mismo.

La actualización de un inventario de emisiones atmosféricas se rige por las mismas etapas de formulación, planificación y ejecución descritas anteriormente, sin embargo, las actividades a desarrollar dependerán de las variaciones del nuevo alcance del inventario de emisiones atmosféricas con relación al inventario de emisiones atmosféricas disponible. En este sentido, para la actualización de un inventario de emisiones atmosféricas se debe desarrollar de forma adicional y posterior a la etapa de formulación, una etapa de evaluación de los inventarios de emisiones atmosféricas existentes.

Las actualizaciones de los inventarios de emisiones atmosféricas normalmente buscan generar información más precisa de los inventarios de emisiones existentes, pero con las condiciones actuales del área de estudio y probablemente con un mayor nivel de detalle de la información disponible. Generalmente se cuenta con un alcance temporal diferente, pero se mantienen constantes los tipos de fuentes, el alcance espacial, la resolución temporal, la resolución espacial y las sustancias a inventariar (p. ej.: un municipio cuenta con un inventario de emisiones con información del año 2012 y requiere actualizarlo al año 2016).

Figura 2.3. Continuidad y actualización de un inventario de emisiones atmosféricas

Adaptado de SEMARNAT, 2005



En el caso anterior y como parte de la evaluación, se deben identificar la variación en el número de fuentes, los cambios en las características de las mismas (deterioro o cambio tecnológico) y en la calidad de los combustibles utilizados para cada uno de los tipos de fuente inventariados.

En aquellos casos en los que las variaciones de las características de las fuentes de emisión y la calidad de los combustibles utilizados para cada tipo de fuente no varíen significativamente con relación al inventario anterior, se podrán utilizar los factores de emisión del inventario de emisiones atmosféricas anterior para el cálculos de las emisiones, lo cual reduce el enfoque de la actualización del inventario de emisiones atmosféricas a la determinación del factor actual de actividad para cada tipo de fuente.

En muchas ocasiones la actualización de un inventario de emisiones atmosféricas se encuentra motivada por la necesidad de complementar los inventarios de emisiones atmosféricas existentes y de esta forma contar con información actual y más detallada de las emisiones, así como un alcance más amplio del inventario de emisiones atmosféricas, como se observa en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Principales casos en los que se realiza la actualización de un inventario de emisiones atmosféricas

CASOS DE ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS		EJEMPLOS
Actualización temporal de un inventario de emisiones atmosféricas	Los tipos de fuentes, el alcance espacial, la resolución temporal, la resolución espacial y las sustancias a inventariar no varían.	Se cuenta con un inventario de emisiones atmosféricas con información del año 2012 y se requiere actualizar el inventario con información del año 2016.
Actualización de un inventario de emisiones atmosféricas con variación en el alcance Espacial	Los tipos de fuentes, la resolución temporal, la resolución espacial y las sustancias a inventariar no varían.	Se cuenta con un inventario de emisiones atmosféricas para la zona industrial de una ciudad y se requiere actualizar y ampliar el inventario de emisiones con información de toda la ciudad.

CASOS DE ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS		EJEMPLOS
Actualización de un inventario de emisiones atmosféricas con variación en las sustancias a inventariar	Los tipos de fuentes, el alcance temporal, el alcance espacial, la resolución temporal y la resolución espacial no varían.	Se cuenta con un inventario de emisiones atmosféricas de contaminantes criterio y se requiere actualizar el inventario de emisiones atmosféricas e incluir las emisiones de gases de efecto invernadero.
Actualización de un inventario de emisiones atmosféricas con variación de la fuente de emisión	El alcance temporal, el alcance espacial, la resolución temporal y la resolución espacial y las sustancias a inventariar no varían.	Se cuenta con un inventario de emisiones generadas por fuentes fijas y se requiere actualizar el inventario de emisiones atmosféricas e incluir las emisiones de fuentes móviles.
Actualización de un inventario de emisiones atmosféricas con variación en la resolución temporal o espacial de la información	Los tipos de fuentes, el alcance temporal, el alcance espacial y las sustancias a inventariar no varían.	Se cuenta con un inventario de emisiones atmosféricas con información anual y se requiere actualizar el inventario de emisiones atmosféricas generando información de las emisiones mes a mes.
Actualización de un inventario de emisiones atmosféricas con la combinación de las anteriores variaciones	Varían alguna o todas las características del inventario de emisiones atmosféricas.	Se cuenta con un inventario de emisiones atmosféricas de material particulado generado en una planta de producción de una empresa durante el mes de octubre del año 2010 y se quiere actualizar el inventario de emisiones atmosféricas con el fin de incluir material particulado y óxidos de azufre para todas las plantas del país.

2.4.1. CIERRE, PUBLICACIÓN Y DIVULGACIÓN

Una vez concluido el ejercicio de estimación de emisiones del inventario de emisiones atmosféricas y se cuente con los reportes solicitados, así como con el análisis correspondiente, se sugiere realizar la publicación oficial del inventario de emisiones atmosféricas y realizar jornadas de socialización del mismo con los diferentes actores de interés, incluyendo la sociedad civil en el caso de inventarios realizados por instituciones o entidades gubernamentales.

3

FUENTES FIJAS

El aumento de la productividad es un indicador del crecimiento económico de un país y está directamente relacionado con la calidad del aire, ya que, al aumentar la productividad, igualmente aumenta el consumo de combustibles fósiles y a su vez aumentan la cantidad de emisiones expulsadas a la atmósfera.

En Colombia, entre los años 2007 al 2009, el PIB aumentó en 19.594 miles de millones de pesos, siendo los grandes centros urbanos (Bogotá D.C., Antioquia, Valle del Cauca y Santander) representantes de los mayores aportes a nivel nacional con 56,2 % en el 2006 y 57,5 % en el 2007.

Dentro de las actividades económicas que más aportaron al PIB durante esos años que están involucradas en la generación de emisiones atmosféricas, se encuentran principalmente: la agricultura, la industria manufacturera, la explotación de minas y canteras, el comercio, los servicios de restaurantes y hoteles y la construcción, todas estas caracterizadas por la existencia de fuentes fijas (IDEAM, 2010a).

En este sentido, las fuentes fijas que generan mayores emisiones atmosféricas corresponden a la industria manufacturera, la cual se concentra solo en 18 de los 56 grupos industriales investigados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE, en la Encuesta Anual Manufacturera de 2014 (con un total de 9.159 establecimientos industriales) establecidos en la Clasificación industrial internacional uniforme de todas las actividades económicas (CIIU).⁴

Dentro de los principales grupos industriales que concentran la producción bruta del país se encuentran: productos de la refinación del petróleo (21,1 %), fabricación de otros productos químicos (6,4 %), elaboración de bebidas (5,9 %), elaboración de otros productos alimenticios (4,7 %) y fabricación de productos minerales no metálicos n.c.p. (4,7 %) (DANE, 2016).

En el 2014, la producción bruta total del sector industrial fue de 212,5 billones de pesos, concentrada principalmente en las áreas metropolitanas de Bogotá D.C., Medellín, Cali y Cartagena. El 80,2 % de la producción bruta de la industria se concentró en los 18 de los 56 grupos industriales investigados.

Por lo anterior, el seguimiento de las emisiones generadas por fuentes fijas mediante la realización de inventario de emisiones atmosféricas, es de gran importancia para el desarrollo de planes de gestión que ayuden a mejorar la calidad del aire.

El presente capítulo, muestra una descripción de las diferentes clasificaciones de fuentes fijas que se pueden tener en cuenta a la hora de realizar un inventario de emisiones, así como algunos de los métodos y ejemplos para la estimación o determinación de las emisiones en fuentes fijas.

3.1. CLASIFICACIÓN FUENTES FIJAS

Una fuente fija es toda aquella fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa⁵.

Las fuentes fijas a su vez, pueden clasificarse de acuerdo al origen de la fuente, forma de descarga de la emisión, a la actividad industrial, procesos industriales, etapas de los procesos industriales, tipo

4. De acuerdo con la Clasificación Industrial Internacional Uniforme –CIIU Rev. 4 A.C.

5. Artículo 2.2.5.1.1. Definiciones. Decreto 1076 de 2015

de combustible utilizado, equipos de combustión y tamaño de la empresa, entre otros, todos estos descritos a continuación.

3.1.1. ORIGEN DE LA FUENTE

De acuerdo al origen de la fuente, las fuentes fijas se pueden clasificar en dos grandes categorías: fuentes antropogénicas y fuentes naturales.

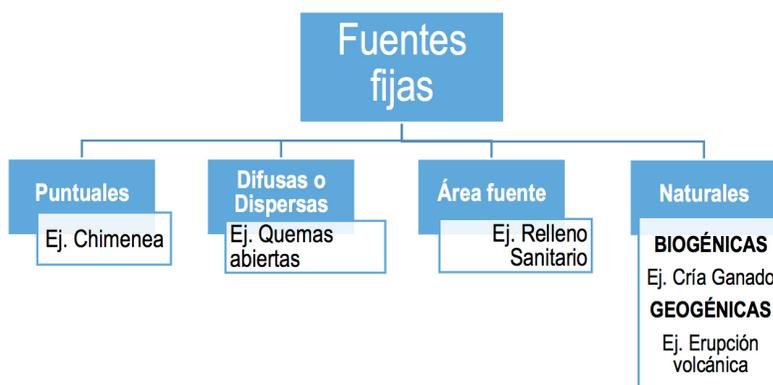
- **Fuentes antropogénicas:** son todas aquellas que emiten compuestos a la atmósfera con intervención directa del hombre.
- **Fuentes naturales:** son todas aquellas que emiten compuestos a la atmósfera generadas por procesos bióticos y abióticos, sin intervención directa del hombre (esta categoría de fuentes naturales, se trata de manera más amplia en el capítulo 5).

3.1.2. FORMA DE DESCARGA

De acuerdo a la forma como se realiza la descarga de los compuestos, las fuentes fijas pueden ser puntuales, dispersas o difusas o, de área⁶.

- **Fuentes fijas puntuales:** son todas aquellas que emiten contaminantes al aire por ductos o chimeneas. Por ejemplo, sector industrial químico, petrolero, químico petrolero, de pinturas y tintas, productor de celulosa y papel, de hierro, acero, vidrio, entre otros.
- **Fuentes fijas dispersas o difusas:** aquellas donde los focos de emisión se dispersan en un área, por razón del desplazamiento de la acción causante de la emisión. Por ejemplo, las quemaduras abiertas controladas en zonas rurales o las emisiones de actividades de explotación minera a cielo abierto.
- **Fuentes fijas de área:** zona o región, urbana suburbana o rural, que, por albergar múltiples fuentes fijas de emisión, es considerada como un área especialmente generadora de sustancias contaminantes del aire.

EJEMPLO: CLASIFICACIÓN POR TIPO DE FUENTE



3.1.3. TIPO DE ACTIVIDAD INDUSTRIAL

Los criterios de clasificación para definir el tipo actividad industrial pueden ser de acuerdo a las características económicas productivas o regulaciones sectoriales en materia de emisiones.

6. Ibid

3.1.3.1. TIPO DE ACTIVIDAD ECONÓMICA PRODUCTIVA

El Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia - DANE adaptó en 2012, la cuarta versión de la *Clasificación industrial internacional uniforme (CIIU)* para Colombia, con el fin de implantar una clasificación industrial de acuerdo a la actividad económica productiva en el país.

En este sentido, el objetivo principal de la CIIU, es proporcionar un conjunto de categorías de las actividades que puedan utilizarse para la recopilación y presentación de informes estadísticos de acuerdo con las actividades allí incluidas (DANE, 2012).

La estructura general de las categorías presentadas en la CIIU que involucran fuentes fijas son:

Sección A: agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca.

Sección B: explotación de minas y canteras.

Sección C: industrias manufactureras.

Sección D: suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado.

Sección E: distribución de agua; evacuación y tratamiento de aguas residuales, gestión de desechos y actividades de saneamiento ambiental.

Sección F: construcción.

Sección G: comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos automotores y motocicletas.

Sección I: alojamiento y servicios de comida (en esta sección se involucra principalmente la división 56).

Sección S: otras actividades de servicio.

En cada una de las secciones de la CIIU, existe una subdivisión y descripción de todas las actividades industriales presentes en el país. Este documento puede ser consultado en detalle a través de la página web del DANE.

3.1.3.2. ACTIVIDADES PRODUCTIVAS SEGÚN LA REGLAMENTACIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, a través del artículo 6 de la Resolución 909 del 2008 (MAVDT, 2008a) estableció las actividades industriales y los respectivos contaminantes a monitorear, como por ejemplo⁷:

Tabla 3.1. Ejemplo de actividades industriales y contaminantes a monitorear de acuerdo con el artículo 6 de la Resolución 909 de 2008.

Actividad industrial	Procesos e instalaciones	Contaminantes
Producción de ácido sulfúrico	Cualquier instalación que produzca ácido sulfúrico por el proceso de contacto por medio del quemado de azufre elemental, ácido de alquilación, sulfuro de hidrógeno, sulfuros orgánicos y mercaptanos o residuos ácidos.	SO ₂ Neblina ácida o trióxido de azufre

7. Es importante tener en cuenta que estas actividades, así como los contaminantes que se deben monitorear están sujetos a los ajustes que se puedan dar a partir de la modificación o derogación de la norma en mención.

Actividad industrial	Procesos e instalaciones	Contaminantes
Procesos de galvanotecnia	Procesos de desengrasado, decapado, desmetalizados, recubrimiento con películas metálicas y orgánicas sobre sustratos metálicos y plásticos por medio de procesos químicos y electroquímicos.	SO ₂ , NO _x , HCl, Pb, Cd, Cu
Fabricación de vidrio	Hornos manuales de fundición de vidrio, hornos de producción de vidrio y hornos fundidores eléctricos.	MP, SO ₂ , NO _x , HF, HCl
Hornos de tostado de cascarilla de grano o material vegetal	Cualquier planta o instalación que tueste cascarilla de grano o material vegetal como parte de un proceso industrial y no como combustible para la generación de calor.	MP, NO _x , HCT, Dioxinas y Furanos

De igual forma y teniendo en cuenta el tipo de combustible utilizado (sólido, líquido o gaseoso) y los contaminantes emitidos por las diferentes fuentes, en tal Resolución se establecieron estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas, de acuerdo con las siguientes categorías (MAVDT, 2008a):

- Equipos de combustión externa (capítulo III)
- Centrales térmicas y plantas de cogeneración (capítulo IV -V)
- Fabricación de productos textiles (capítulo VI)
- Equipos de combustión externa que utilicen biomasa como combustible (capítulo VII)
- Fabricación de productos de la refinación del petróleo (capítulo VIII)
- Producción de cemento, concreto y agregados (capítulo IX)
- Fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y de arcilla (capítulo X)
- Tratamiento térmico de subproductos de animales (capítulo XI)
- Tratamiento térmico a residuos o desechos peligrosos y no peligrosos (capítulo XII – XIII respectivamente)
- Hornos crematorios (capítulo XIV)

De igual forma se establecen disposiciones para las siguientes categorías:

- Quemadas controladas en áreas rurales (capítulo XV)
- Comercio y servicio (capítulo XVI)

3.1.4. TIPO DE PROCESO

El desarrollo de las diferentes actividades industriales involucra la realización de varios procesos que, en la mayoría de los casos, transforman materias primas con el fin de obtener un producto o servicio final. Así mismo, durante la ejecución de estos procesos se presentan diferentes etapas o subprocesos que pueden estar involucrados en la descarga de contaminantes al aire.

Para realizar la clasificación teniendo en cuenta el tipo de proceso, es importante incluir cada una de esas etapas o subprocesos presentes, con el fin de obtener una mayor precisión en la estimación de las emisiones.

Los procesos se pueden clasificar en procesos químicos y procesos físicos (Mayer L, 1987).

Procesos químicos: todos aquellos que permiten una transformación química de las sustancias involucradas. Por ejemplo, reacciones químicas, combustión, oxidación, emulsificación, etc.

Procesos físicos: aquellos que no modifican las sustancias involucradas. Por ejemplo, corte de láminas, trituración de minerales, cribado, evaporación, trituración, disolución, entre otros.

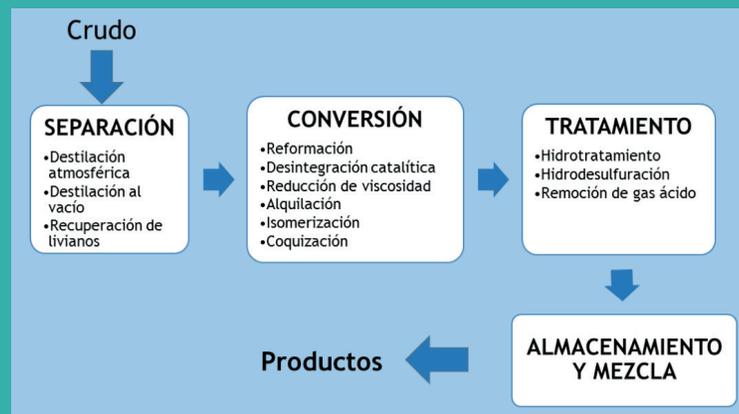
3.1.5. Tipo de combustible

Durante los procesos de combustión realizados en las diferentes industrias, generalmente se proporciona calor (ya sea de forma directa o indirecta a través de vapor, agua o aceite), electricidad o combustible, que son transformados durante la actividad de producción (EEA, 2016c).

¿Sabía usted qué?

- El proceso de refinación de petróleo consiste básicamente, en la transformación de los componentes útiles del petróleo en productos derivados. En este proceso se presentan distintas etapas (Figura 3.1) que, a su vez, involucran tanto procesos químicos, como procesos físicos, con el fin de obtener los numerosos hidrocarburos que ayudan a satisfacer las necesidades de la sociedad.
- Dentro de los procesos se encuentran: **destilación atmosférica** (separación por calor de los hidrocarburos mezclados), **destilación al vacío** (extracción del gasóleo), **coquización** (aumento de presión que garantiza el flujo del fluido por la tubería), **desintegración catalítica** (descomposición de moléculas grandes, pesadas o complejas de hidrocarburos, en moléculas más ligeras y simples), **hidrotratamiento** (estabilización catalítica de los petrolíferos), **reducción de viscosidad** (obtención de hidrocarburo de bajo peso molecular, se basa en operación de craqueo térmico), **alquilación** (combinación de olefina con un hidrocarburo aromático o parafínico en presencia de un catalizador), **reformación** (mejoramiento de la calidad antidetonante de la gasolina modificando su estructura molecular), **isomerización** (alteración del arreglo fundamental de los átomos de una molécula, sin adherir o sustraer nada de la molécula original) (EPA, 2015a).

Figura 3.1. Principales etapas del proceso de refinación de petróleo



Estas transformaciones normalmente generan emisiones de distintos tipos. Por ejemplo, las industrias termoeléctricas (las cuales son consideradas como fuentes importantes de emisiones atmosféricas) operan con gas natural, carbón mineral y en algunos casos, con fuel oil o ACPM. La combustión que

Combustible es una sustancia o material capaz de reaccionar con el oxígeno presente en el aire, causando un desprendimiento de energía térmica apta para producir trabajo mecánico (ACCEFYN, 2003).

ocurre durante los procesos termoeléctricos, genera SO₂, NO_x, CO, CO₂ y partículas que pueden contener metales (López C, Sánchez M, 2007).

Los combustibles se pueden clasificar en tres categorías, de acuerdo con lo establecido en el artículo 1° de la Resolución 909 de 2008:

- **Combustibles sólidos:** el carbón mineral, coque, carbón vegetal, antracita, hullas, lignitos, leña, turbas, madera, biomasa, fibras vegetales, asfalto y brea.
- **Combustibles líquidos:** los más usuales los derivados del petróleo: diésel, fuel oil N°2 o ACPM, fuel oil N° 6, crudo o bunker.
- **Combustibles gaseosos:** se denominan combustibles gaseosos a los hidrocarburos naturales y a los fabricados exclusivamente para su empleo como combustibles, y a aquellos que se obtienen como subproducto en ciertos procesos industriales y que se pueden aprovechar como combustibles. Por ejemplo: gas natural, metano, etano, propano, butano, gas de refinería, gas de alto horno, biogás o mezclas de estos.

3.1.6. EQUIPOS DE COMBUSTIÓN

La combustión es una reacción de oxidación de una sustancia o material combustible durante la cual se desprende una cantidad de energía o calor. Puede clasificarse según la fuente de combustión, en dos tipos: **combustión interna** (realizada dentro del motor) y **combustión externa** (realizada fuera de la máquina) (Márquez M, 2005).

Las emisiones procedentes de los equipos industriales de combustión, son significativas de acuerdo al número y tamaño de los equipos, la técnica de combustión que emplean y el rango de eficiencia de las emisiones (EEA, 2016c).

Dentro de los equipos de combustión industriales más comunes están las calderas, hornos, quemadores, intercambiadores de calor; entre otros.

3.1.6.1. CALDERAS

Son recipientes cerrados utilizados en los cuales se calienta agua (o cualquier otro líquido), se genera vapor; se sobrecalienta el vapor (o puede también suceder cualquier combinación) bajo presión o al vacío a través de la aplicación directa o indirecta de calor (NCGA, 2005).

Según la actividad industrial o características de la caldera, se pueden clasificar en:

Tipos y Características	
<ul style="list-style-type: none"> • Según el tipo de alimentación (manuales o automáticas), con o sin control de emisiones. • En función de su capacidad • Comerciales o industriales. • Entre otras 	<ul style="list-style-type: none"> • Según el tipo de combustible. • Según la forma de transferencia de calor (acuotubulares, pirotubulares o hierro fundido). • Por arreglo de la superficie de transferencia de calor (horizontal o vertical, de tubos rectos o doblados). • Según la configuración de quemado del combustible (suspensión, fogón o stoker, lecho fluidizado).

Adaptado de UPB, 2010.

3.1.6.2. HORNOS

Son equipos que generan calor manteniéndolo en un compartimento cerrado (UPB, 2010).

En Colombia, los combustibles más utilizados en la industria son: el carbón, el petróleo y el gas natural, según lo reportó la Universidad Pontificia Bolivariana en el 2010.

“Durante un proceso de combustión la masa de cada elemento permanece igual” (Van Wylen et ál., 2003)

Son utilizados para calentar o incinerar materiales, piezas o elementos que son colocados en su interior, utilizando temperaturas por encima de la del ambiente. Algunos ejemplos de hornos son: hornos cúpula, hornos de inducción, hornos reberveratorios, hornos túnel, hornos pampa, hornos crematorios, entre otros.

3.1.6.3. INTERCAMBIADORES DE CALOR

Son dispositivos utilizados para transferir energía de un medio a otro. Pueden ser de contacto directo (regenerativos) o de contacto indirecto (recuperativos).

Las calderas y hornos tienen a su vez quemadores, los cuales se pueden clasificar principalmente en manuales, semiautomáticos y totalmente automáticos y pueden ser tanto verticales, como horizontales.

3.1.7. TAMAÑO DE LA EMPRESA

Una empresa es toda unidad de explotación económica, realizada por persona natural o jurídica, en actividades agropecuarias, industriales, comerciales o de servicios, en el área rural o urbana (Congreso de Colombia, 2011).

En muchos casos, las emisiones atmosféricas pueden estar directamente relacionadas con variables económicas y demográficas. Por ejemplo, a mayor tamaño de la empresa o más número de empresas de poco tamaño instauradas en un mismo lugar, mayor puede ser la cantidad de emisiones generadas. Sin embargo, esta relación no siempre es lineal. Depende más de la eficiencia energética, es decir de la capacidad para obtener mayor rendimiento económico de la energía, o del peso relativo, de ciertos sectores económicos u otros (Junta de Andalucía, 2007).

La clasificación de fuentes fijas por tamaño de la empresa está sujeta a los términos de la legislación colombiana propuesta a través de la Ley 905 de 2004, donde se define el tamaño empresarial (mediana, pequeña y microempresa) teniendo en cuenta el número de trabajadores, valor de las ventas brutas anuales y el valor de los activos totales (Congreso de Colombia, 2004).

- **Mediana empresa:** una mediana empresa cuenta con una planta de personal entre 51 y 200 trabajadores, o activos totales por valor de 5001 a 30.000 salarios mínimos mensuales legales vigentes.
- **Pequeña empresa:** una pequeña empresa cuenta con una planta de personal entre 11 y 50 trabajadores, o activos totales por valor entre 501 y menos de 5.000 salarios mínimos mensuales legales vigentes.
- **Microempresa:** una microempresa cuenta con una planta de personal no superior a los 10 trabajadores o activos totales, excluida la vivienda, por valor inferior a 500 salarios mínimos mensuales legales vigentes.

Figura 3.2. Ejemplo de clasificación según las características de fuentes fijas

Tipo de fuente	Actividad industrial	Tipo de proceso	Etapas del proceso	Equipo	Combustible	Características del equipo
Móvil						
Fija	Industria textil	Químico				
	Industria ladrillera	Físico	Teñido	Horno		
			Estampado	Caldera	Electricidad	
			Ribeteado		Aceite	
					Gas	
					Carbón	< 50 BHP
						50 ≥ 100 BHP
						> 100 BHP

3.2. INFORMACIÓN PARA FUENTES FIJAS

Anteriormente se mencionó que la información mínima necesaria para la elaboración de un inventario de emisiones atmosféricas varía en función de los objetivos y el alcance del inventario, así como del tipo de fuente relacionada o a inventariar; por lo tanto, es significativo conocer algunas de las fuentes de información existentes y de gran utilidad a la hora de hacer un inventario de emisiones atmosféricas, así como también, el nivel de detalle con el cual se puede recopilar la información primaria, con el fin de aprovechar al máximo el tiempo establecido para el desarrollo del inventario y lograr que sea lo más representativo y confiable posible.

3.2.1. FUENTES DE INFORMACIÓN

Dentro de los recursos a utilizar como fuentes de información en Colombia, para identificar, caracterizar y cuantificar fuentes fijas están:

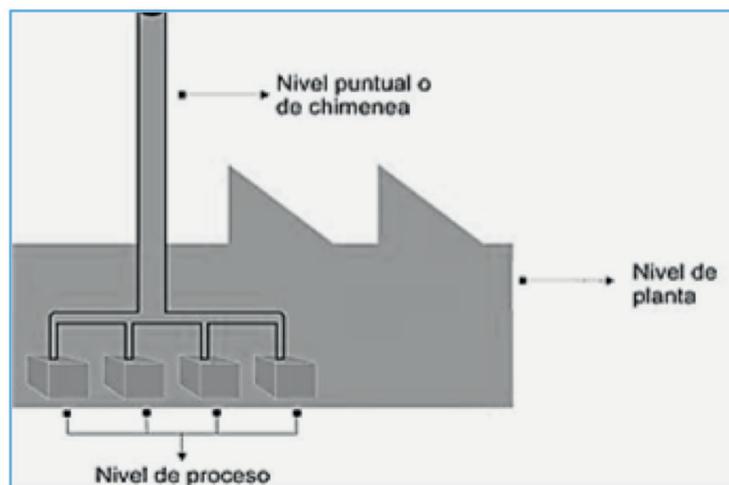
Informes e inventarios de emisiones realizados anteriormente tanto a nivel nacional, como a nivel internacional.	Estudios privados disponibles tales como reportes de emisiones, consumo de combustible, producción anual, etc., de grandes y pequeñas industrias.
Censos industriales del Departamento Administrativo Nacional de Estadística –DANE.	Registro único ambiental (RUA) del IDEAM.
La Clasificación industrial internacional uniforme (CIU).	Informes de emisiones en cumplimiento de lo establecido en el numeral 2 del Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas.
Reportes nacionales o regionales de consumos de combustibles (p. ej.: informes de la Unidad Planeación Minero Energética - UPME).	Encuestas o censos realizados directamente en el lugar o fuentes de estudio, como la Encuesta anual manufactura (EAM) del DANE
Imágenes aéreas o satelitales.	Soportes técnicos de estudios anteriores, entre otros.

3.2.2. NIVEL DE DETALLE

Cuando la información para un inventario de fuentes fijas es recopilada de forma directa o a través de inspecciones, visitas o entrevistas se pueden tener en cuenta tres niveles de detalle (Radian International LLC, 2006) como se muestra en la figura 3.3.

Estos niveles pueden determinarse durante el desarrollo del inventario, basándose bien sea en el uso final del inventario o la disponibilidad de recursos, y dependen en gran medida del método elegido para estimar las emisiones.

Figura 3.3. Niveles de complejidad para un inventario de fuentes puntuales



Fuente: Radian International LLC, 2006.

Entre las ventajas que tiene el contar con estos niveles de información están la precisión y calidad de los datos a utilizar en el inventario de emisiones.

Las características específicas de los tres niveles de detalle son:

NIVEL	DESCRIPCIÓN	ELEMENTOS DE INFORMACIÓN
Planta	Planta o instalación que puede tener varios procesos u operaciones causantes de emisiones.	<p>Nombre de la planta.</p> <ul style="list-style-type: none"> Identificación y ubicación geográfica. Contacto (nombre, teléfono, fax, correo electrónico). Número de identificación de la actividad industrial (CIU). Producción (frecuencia, materias primas, subproductos), entre otros.
Puntual o de chimenea	Lugar exacto en donde se presentan las emisiones generadas.	<ul style="list-style-type: none"> Horarios de operación normal. Emisiones medidas/estimadas. Eficiencia del sistema de control por contaminante emitido (en caso de tenerse). Datos de la chimenea (altura, diámetro). Descripción de la plataforma. Puertos de muestreo.

NIVEL	DESCRIPCIÓN	ELEMENTOS DE INFORMACIÓN
Proceso	Operaciones unitarias o procesos que integran la planta de producción.	<ul style="list-style-type: none"> Datos a nivel de proceso (materias primas, corrientes de proceso). Datos de operación (real, máxima y de diseño). Capacidad del equipo por proceso o segmento. Caracterización del combustible Descripción del equipo de control y eficiencias. Emisiones por segmento, unidades de emisión.

Fuente (MAVDT, 2007a)

3.3. ESTIMACIÓN DE EMISIONES PARA FUENTES FIJAS

A nivel mundial existen diferentes métodos de evaluación para las emisiones generadas por fuentes fijas, entre los que sobresalen los promulgados por Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos - EPA, la Agencia Ambiental Europea - EEA, el Comité Europeo de Normalización - CEN y la Organización Internacional de Estandarización -ISO.

Estos métodos se basan principalmente en la relación del factor de emisión y factor de actividad.

En Colombia, mediante el “*Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada para fuentes fijas*” se establecen los procedimientos de evaluación de emisiones (MAVDT, 2010b), los cuales corresponden principalmente a medición directa, monitoreo paramétrico y balance de masa.

3.3.1. MEDICIÓN DIRECTA

La medición directa consiste en determinar la concentración de un contaminante, en una corriente de gas, o la tasa de emisión del contaminante en una chimenea o escape en un proceso (SEMARNAT, 2005).

Los equipos utilizados para realizar la medición directa son los muestreadores o analizadores instrumentales, dentro de los cuales están: los analizadores de combustión portátiles para chimeneas, muestreadores isocinéticos para fuentes fijas, sistemas de monitoreo continuo, entre otros.

Los datos de una medición directa deben ser tomados en condiciones representativas de la operación normal en el proceso a evaluar. Una vez se obtienen los datos, pueden extrapolarse para estimar emisiones anuales, solo si la operación del proceso no varía de forma significativa.

Las mediciones se expresan en unidades de masa del contaminante emitido por unidad de tiempo (tasa de emisión) o masa del contaminante emitido por unidad de actividad del proceso (factor de emisión) (SEMARNAT, 2005).

En algunos casos los costos para una planta o industria aplicando este método de medición directa pueden ser altos, pero si se aplica de forma correcta, los resultados pueden proporcionar datos bases significativos para estudios posteriores.

Para aplicar la medición directa, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, ha adoptado de acuerdo al Código Federal de Regulaciones de los Estados Unidos (CFR) diferentes métodos (ver ejemplo en la tabla 3.2) que se emplean según la actividad industrial, el contaminante, características de emisiones y ducto de salida o chimenea presente. Estos métodos pueden ser consultados en detalle en el *Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada para fuentes fijas*.

La medición directa se realiza a través de procedimientos donde se recolecta una muestra (usando equipos muestreadores) para su posterior análisis o mediante el uso de analizadores en tiempo real (MAVDT, 2010b)

En este mismo sentido, de acuerdo al método a emplear, en el *Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada para fuentes fijas* se indica que se deben tener en cuenta una serie de consideraciones, que sirven como criterio de validación de la medición durante el proceso de la evaluación de emisiones como son:

Momento de inicio y fin de la medición directa	Parámetros de operación o funcionamiento de las instalaciones donde se realiza la evaluación de las emisiones.
Uso de más de un combustible en un proceso industrial.	Análisis de gases (O_2 , CO_2 , y CO).
Determinación de la humedad de los gases y el contenido de oxígeno.	Cuantificación de las emisiones del material particulado (MP), compuestos orgánicos volátiles (COV), NO_x , SO_2 , y H_2SO_4 .
Cumplir los tiempos y volúmenes mínimos establecidos en el protocolo.	Condiciones de medición directa en instalaciones de tratamiento térmico de residuos o desechos peligrosos.

Tabla 3.2. Métodos a utilizar en la evaluación de emisiones en una industria petrolera

ACTIVIDAD	CONTAMINANTES	MÉTODO DE MONITOREO	OBJETIVO DEL MÉTODO	MÉTODOS ALTERNOS
Refinación de petróleo	MP, SO_2, NO_x	1	Determinación del punto y velocidad de toma de muestra para fuentes fijas.	1A, 2A, 2C, 3A, 3B, 5B, 5F
		2	Determinación de la velocidad y tasa de flujo volumétrica de gases en chimenea (tubo Pitot tipo S).	
		3	Análisis de gases para la determinación del peso molecular base seca.	
		4	Determinación del contenido de humedad en gases de chimenea.	
		5	Determinación de las emisiones de material particulado en fuentes fijas.	
		7	Determinación de las emisiones de óxidos de nitrógeno en fuentes fijas.	

ACTIVIDAD	CONTAMINANTES	MÉTODO DE MONITOREO	OBJETIVO DEL MÉTODO	MÉTODOS ALTERNOS
Refinación de petróleo	MP, SO ₂ , NO _x	8	Determinación de las emisiones de ácido sulfúrico y dióxido de azufre en fuentes fijas.	1A, 2A, 2C, 3A, 3B, 5B, 5F
		17	Determinación de la emisión de material particulado en fuentes fijas.	

CONSIDERACIONES A TENER EN CUENTA: tiempo de medición (60 minutos) y volumen de la muestra (0,015 dscm* - 0,53 dscf**).

*dscm: metros cúbicos de gas seco estándar.

**dscf: pies cúbicos de gas seco estándar.

En caso que alguna industria no pueda determinar las emisiones atmosféricas por ninguno de los métodos establecidos en el Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada para fuentes fijas, debe solicitar la autorización para el uso del método alternativo a la autoridad ambiental competente.

Por otra parte, con el fin de garantizar que los resultados obtenidos al utilizar la medición directa sean comparables con los límites máximos permisibles establecidos para fuentes fijas, los ductos o chimeneas, deben contar con una serie de instalaciones físicas específicas definidas por cada método.

3.3.1.1. Ejemplo de cálculo de emisiones por medición directa

Calcular la tasa de emisión en masa (TEM) en kilogramos por hora (Kg/h) y la tasa de emisión en masa de la actividad -TEMa de las partículas de una caldera cuya tasa de consumo de calor (R) es igual a 110 MMkj/h, teniendo en cuenta que ΔV corresponde al volumen de la muestra de gas, M_r a la masa de partículas recolectadas en la muestra de enjuague, M_f Masa de partículas recolectadas en la muestra del filtro y Q a la tasa de flujo volumétrico del gas de escape en condiciones estándar (MAVDT, 2007a).

$$\Delta V = 0,57 \text{ metros cúbicos normales (Nm}^3\text{)}$$

$$M_r = 5,0 \text{ mg}$$

$$M_f = 8,4 \text{ mg}$$

$$Q = 26,27 \text{ Nm}^3\text{/h}$$

Teniendo la anterior información, el cálculo de las emisiones comienza con la determinación de la concentración de partículas en el gas de escape (CS) donde:

$$CS = (M_r + M_f) / \Delta V$$

$$CS = (5,0 \text{ mg} + 8,4 \text{ mg}) / 0,57 \text{ Nm}^3$$

$$CS = 23,5 \text{ mg} / \text{Nm}^3$$

Una vez se determina la concentración de partículas en el gas de escape, se establece la TEM en unidades de Kg/h. Por lo tanto:

$$\begin{aligned}
 TEM &= (CS * Q) \\
 TEM &= (23,5 \text{ mg/Nm}^3 * 26,27 \text{ Nm}^3/\text{h})/10^6 \text{ mg/kg} \\
 TEM &= 0,00062 \text{ Kg/h}
 \end{aligned}$$

Este dato de emisión se puede expresar también por unidad de actividad como un factor de emisión, para así obtener la tasa de emisión en TEM_a :

$$\begin{aligned}
 TEM_a &= TEM/R \\
 TEM_a &= (0,00062 \text{ Kg/h})/(110 \text{ MMkj/h}) \\
 TEM_a &= 5,6 \text{ E}^{-6} \text{ Kg/MMkj}
 \end{aligned}$$

3.3.1.2. Ejemplo de cálculo de emisiones por medición directa mediante sistemas de monitoreo continuo

Otra alternativa para realizar el cálculo utilizando medición directa es a través de un sistema de monitoreo continuo, el cual permite evaluar la variación del proceso con el tiempo.

Para este ejemplo ((MAVDT, 2007a) se presentan en la tabla 3.3, unos resultados para diferentes contaminantes generados por una caldera de quema de petróleo, los cuales se obtuvieron por medición directa, utilizando un sistema de monitoreo continuo.

Tabla 3.3. Resultados de diferentes contaminantes generados por una caldera de quema de petróleo, utilizando un sistema de monitoreo continuo de emisiones

Período	O ₂ (%V)	SO ₂ (ppmv)	NO _x (ppmv)	CO (ppmv)	Tasa de flujo de gas en la chimenea (Nm ³ /h)
11:00	2,1	1004,0	216,2	31,5	33,96
11:15	2,0	1100,0	200,6	25,5	34,36
11:30	2,1	1050,0	216,7	25,1	32,89
11:45	1,9	1070,0	220,5	20,8	34,89
12:00	1,9	1070,0	213,8	19,4	34,74
Promedio	2,0	1058,8	213,6	24,5	34,17

Con base en la información de la tabla, se calcula la tasa promedio de emisión (TPE_{prom}) de CO durante todo el período de muestreo y la tasa de emisión de la actividad (TEM_a) de CO suponiendo que el consumo de calor de la caldera (R) es de 118 MMkj/h.

Así mismo, para calcular la tasa de emisión de CO, adicionalmente a los datos de la tabla 3.3, es necesario tener los datos de la concentración promedio de CO (C_{prom}), la tasa promedio promedio de flujo de gas en la chimenea (Q_{prom}), el peso molecular promedio del contaminante (MW_{prom}) y el volumen molar a presión y temperatura estándar (V).

Entonces:

$$\begin{aligned}
 TEM_{prom} &= \frac{C_{prom} * MW_{prom} * Q_{prom}}{1000 * V * 10^6} \\
 TEM_{prom} &= \frac{(24,5 \text{ ppmv}) * (28 \text{ g/gmol}) * (34,17 \text{ Nm}^3/\text{h})}{(1000 \text{ g/Kg}) * 0,024 \text{ m}^3/\text{gmol} * 10^6} \\
 TEM_{prom} &= 97,7 \text{ Kg/h}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 TEM_a &= \frac{TEM_{prom}}{R} \\
 TEM_a &= \frac{97,7 \text{ Kg/h}}{118 \text{ MMkJ/h}} \\
 TEM_a &= 0,828 \text{ Kg/MMkJ}
 \end{aligned}$$

El mismo procedimiento utilizado para el cálculo de emisiones de CO, se puede utilizar para cada uno de los contaminantes de interés. La sumatoria de los resultados de cada contaminante, dará la estimación total de las emisiones.

3.3.2. BALANCE DE MASAS

El balance de masas, involucra la cuantificación de un flujo de material que entra y sale en un proceso, donde las diferencias entre estos flujos son asumidas como descargas al ambiente con el fin de estimar de manera indirecta la emisión a la atmósfera de sustancias contaminantes (MAVDT, 2010b).

El método de balance de masas es inapropiado en procesos en los que el material es químicamente combinado es consumido en el proceso, o cuando las pérdidas de materiales en la atmósfera representan una pequeña porción. Debe aplicarse cuando los flujos de entrada y salida pueden ser claramente identificados.

En este sentido la ecuación básica para estimar las emisiones atmosféricas aplicando el método de balance de masas es:

$$[M_e] - [M_s] = M_a$$

(3.1)

Donde:

Me : masa que entra (g)

Ms : masa que sale (g)

masa acumulada (g)

En caso que se quiera utilizar el método de balance de masas específico para algún componente presente en el proceso donde esté involucrada una reacción química, se debe especificar o conocer previamente la reacción química que se desarrolla y la ecuación se expresa de la siguiente forma (MAVDT, 2007a):

$$(C_e - C_s) + (C_g - C_c) = C_a$$

(3.2)

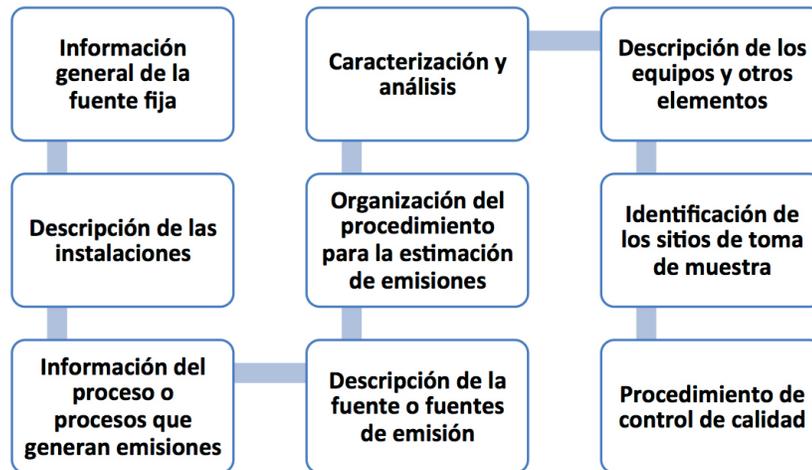
Donde:

Ce : Componente que entra
 Cs : Componente que sale
 Cg : Componente generado
 Cc : Componente consumido
 Ca : Componente acumulado

El balance de masas es muy importante en actividades industriales donde en sus procesos se generan emisiones fugitivas o donde se pierde un alto porcentaje de los materiales en el aire, ya que se convierte en el primer método para la cuantificación de estas emisiones. Por ejemplo, en las actividades industriales de manufactura o en las actividades industriales que emplean COV en sus procesos.

Al igual que en el método anterior, para estimar emisiones a través del balance de masas, se deben tener en cuenta ciertas consideraciones (descritas detalladamente en el *Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada para fuentes fijas*), resumidas en la figura 3.4.

Figura 3.4. Información necesaria para la evaluación de emisiones por balance de masas
Adaptado de (MAVDT, 2010b).



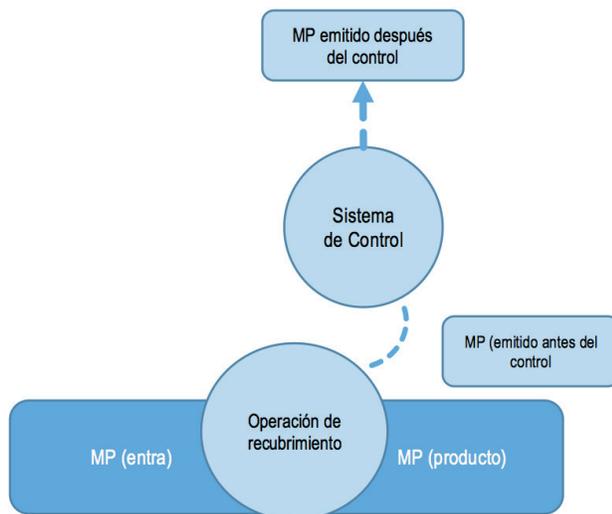
3.3.2.1. Ejemplo de cálculo de emisiones por balance de masas

Calcular las emisiones anuales de material particulado (MP) en una operación de recubrimiento de una superficie que utiliza 1800 L/año de recubrimiento.

La densidad promedio del recubrimiento es de 1,2 Kg/L y el promedio de sólidos de 35% en masa. La eficiencia de transferencia del revestimiento es del 40% y la eficiencia del equipo de control es del 95% (MAVDT, 2007a).

En la figura 3.5 se presenta un análisis de masa del material particulado en una operación de recubrimiento.

Figura 3.5. Análisis de masa del material particulado (MP) en la operación de recubrimiento



MP (entra) : material sólido que ingresa al sistema a través de la materia prima (fracción de masa de sólidos presentes en el recubrimiento).

MP (producto) : material sólido adherido al producto final obtenido del proceso de recubrimiento.

MP (emitido antes del control) : material sólido particulado emitido en la corriente gaseosa antes de pasar por el sistema de control.

MP (emitido después del control) : material sólido particulado emitido en la corriente gaseosa después de pasar por el sistema de control.

Como lo que se desea es un balance de masa específico para el material particulado, se emplea la ecuación 3.1 anteriormente mencionada y se le aplica al material particulado siendo el sistema solamente la operación de recubrimiento. Como en la operación de recubrimiento no existe ninguna reacción química, el balance de masa queda reducido a la siguiente expresión, siendo el término de la derecha de la igualdad cero (0):

$$(MP_e - MP_s) = 0$$

El MP_e , será el que ingresa a la operación de recubrimiento, el cual se calcula de la siguiente forma:

$$MP_e = (1800 \text{ Lt/año}) * (1,2 \text{ Kg/Lt}) * (35/100 \text{ sólidos})$$

$$MP_e = 756 \text{ Kg sólidos/año}$$

Ahora, el material particulado que sale del proceso corresponde a la suma de los sólidos que salen adheridos al producto final, más los sólidos que son dirigidos hacia el sistema de control de emisiones (emisión gaseosa no controlada). Hay que tener en cuenta que la eficiencia de transferencia del recubrimiento es del 40 %. Por lo tanto:

$$MP_{\text{producto}} = (756 \text{ Kg/año}) * (40\%)$$

$$MP_{\text{producto}} = 302 \text{ Kg/año}$$

$$MP_{\text{emitido antes del control}} = 756 \text{ Kg/año} - 302 \text{ Kg/año}$$

$$MP_{\text{emitido antes del control}} = 454 \text{ Kg/año}$$

Posteriormente, para determinar la emisión a la atmósfera de material particulado total anual, después de haberse utilizado un sistema de control con una eficiencia del 95 %, se tiene:

$$MP_{\text{emitido antes del control}} = 454 \text{ Kg/año}$$

$$MP_{\text{recogido por el sistema de control}} = (454 \text{ Kg/año}) * (95\%)$$

$$MP_{\text{recogido por el sistema de control}} = 431 \text{ kg/año}$$

$$MP_{\text{emitido después del control}} = (454 \text{ Kg/año}) - (431 \text{ Kg/año})$$

$$MP_{\text{emitido después del control}} = 23 \text{ Kg/año}$$

Finalmente se concluye que la emisión de material particulado anual que tiene la operación de recubrimiento indicada, aún después de aplicar su sistema de control de emisiones es igual a 23 Kg/año.

Hay que tener en cuenta que en este ejemplo el balance de masas se simplifica porque se supone que todo el material que se está balanceando, es emitido a la atmósfera. Sin embargo, existen situaciones en las que esta suposición no siempre es razonable.

3.3.2.2. Ejemplo de cálculo de emisiones por balance de masas con reacción química

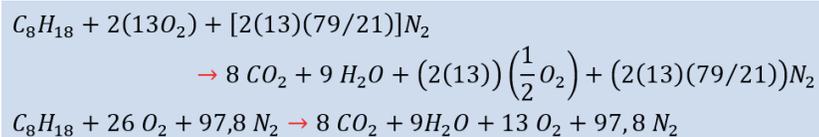
Otro caso particular que se presenta en el análisis de los procesos industriales, es cuando hay presente reacción química. Se debe conocer o establecer con anterioridad la reacción química que se desarrolla en la etapa del proceso estudiada. Para estos casos, el planteamiento del balance de masas, debe realizarse estrictamente por componentes (o elementos químicos presentes) aplicando la ecuación 3.2 (MAVDT, 2007a).

En cierto equipo de combustión (caldera u horno) se “quema” un alcano con fórmula C_8H_{18} (octano) con exceso de aire del 200 % respecto al teórico. Con base en esta información, se quiere determinar la composición en moles de la mezcla gaseosa que se obtiene como producto de dicha combustión (MAVDT, 2007a).⁸

Entonces, la reacción de combustión típica del octano con aire es la siguiente:



Al aplicar el 200 % de exceso de aire (el doble de aire teórico para la combustión) y teniendo en cuenta que éste está compuesto por 21 % de oxígeno y 79 % de nitrógeno aproximadamente, se tiene que la reacción de combustión puede reescribirse de la siguiente forma:



La cantidad de moles totales del gas obtenido como producto es:

8. Ejemplo tomado de Van Wylen et ál, 2000. Fundamentos de termodinámica. Segunda edición. México. Editorial Limusa, 2000.

$$\begin{aligned} \text{Moles totales} &= \text{mol } (CO_2) + \text{mol } O_2 + \text{mol } N_2 \\ \text{Moles totales} &= 8 + 9 + 13 + 97,8 \\ \text{Moles totales} &= 127,8 \end{aligned}$$

Ahora bien, el análisis de la composición del gas de combustión producido es:

$$\begin{aligned} CO_2 &= (8 \text{ moles } CO_2 / 127,8 \text{ moles totales})(100) \\ CO_2 &= 6,26\% \\ H_2O &= (9 \text{ moles } H_2O / 127,8 \text{ moles totales})(100) \\ H_2O &= 7,04\% \\ O_2 &= (13 \text{ moles } O_2 / 127,8 \text{ moles totales})(100) \\ O_2 &= 10,17\% \\ N_2 &= (97,8 \text{ moles } N_2 / 127,8 \text{ moles totales})(100) \\ N_2 &= 76,53\% \end{aligned}$$

Para tener en cuenta:

- Al utilizar un dispositivo de control destructivo (incinerador o unidad de oxidación catalítica en el escape), una parte de los compuestos orgánicos volátiles presentes en la corriente, serán oxidados. Por lo tanto no es razonable suponer que las pérdidas de COV en el proceso, son equivalentes a las emisiones ya que una parte de ellas está siendo controlada y removida por el dispositivo de control de emisiones. En este caso, las características y cantidades de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles deberán determinarse con base en otras técnicas de estimación de emisiones como factores de emisión o modelos.
- Hay otras situaciones que pueden complicar el balance de masas. En primer lugar, no todas las pérdidas de solventes de ciertas operaciones como el lavado en seco o el desengrasado, se dan en el sitio de la planta. En general, se puede suponer que gran parte del solvente enviado a sitios de disposición se evaporará.
- Sin embargo, se debe determinar si una parte del solvente asociado con varias operaciones se evapora en el punto de disposición, más que en el punto de uso, ya que estas pérdidas pueden presentarse fuera del área cubierta por el inventario.
- De la misma manera, en algunos procesos de evaporación no es posible emplear balances de masas debido a que la cantidad de material perdido es demasiado pequeña para ser determinada con exactitud usando los procedimientos de medición convencionales. Por ejemplo, la aplicación de balances de masas a los tanques de almacenamiento de productos del petróleo por lo general no es factible, debido a que las pérdidas por operación son demasiado pequeñas con respecto a la capacidad total promedio del tanque. En estos casos es preferible aplicar otras técnicas de estimación de emisiones como factores de emisión o modelos.

Fuente MAVDT, 2007a.

3.3.3. FACTOR DE EMISIÓN

De acuerdo al “*AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors*” un factor de emisión es un valor representativo que relaciona la cantidad de un contaminante liberado a la atmósfera, con una actividad específica.

Estos valores se expresan normalmente en términos de peso del contaminante dividido, por unidad de peso, volumen, distancia o duración de la actividad.

Factor de emisión es un valor representativo que relaciona la cantidad de un contaminante liberado a la atmósfera, con una actividad específica.

EJEMPLO DE UNIDADES EXPRESADAS EN EL FACTOR DE EMISIÓN DE ACUERDO A LA FUENTE INVOLUCRADA

Caldera de gas natural:	Masa del contaminante/cantidad de gas quemado (Kg/m ³)
Desengrasador de vapor:	Masa del contaminante por hora/área superficial del desengrasador (Kg h/m ³)
Manufactura de baterías:	Masa del contaminante/cantidad de baterías producidas (Kg/10 ³ baterías)

El factor de emisión en fuentes fijas, se puede estimar por medición directa, balance de masa o a partir de factores de emisión ya establecidos en estudios realizados tanto a nivel nacional, como a nivel internacional.

Adicional a las actividades para la evaluación de emisiones por balance de masas mencionadas anteriormente en la figura 3.4, para emplear el factor de emisión es necesario también identificar las fuentes de emisión, el factor de actividad y la estimación de las emisiones (tabla 3.4).

Tabla 3.4. Información necesaria para la evaluación de emisiones atmosféricas mediante factor de emisión.

ACTIVIDAD	CARACTERÍSTICA
Identificación de las fuentes de emisión	Se debe realizar una amplia descripción de las fuentes de emisión teniendo en cuenta las variables que afectan la emisión.
Factor de actividad	Es la medida del tamaño o nivel real del proceso o instalación. Para procesos industriales corresponde a la tasa de producción (p.ej.: masa de producto por unidad de tiempo). En fuentes de área corresponde a la cantidad de material transferido. Para otro tipo de actividades puede ser el área superficial alterada por fuerzas mecánicas o por el viento.
Estimación de las emisiones	Descripción y justificación del factor de emisión seleccionado, utilizado la fuente y los estándares de emisión que le aplican a la actividad.

Para cada una de estas fuentes, se debe tener en cuenta una distancia de 0,8 Km a la redonda, con respecto a la fuente de emisión.

Fuente: MAVDT, 2010b.

La ecuación para determinar las emisiones en fuentes fijas donde se relacionan el factor de emisión y el factor de actividad, se modifica a:

$$E = FE_{ij} * FA_{jt}$$

(3.3)

Donde:

$FE_{j,i}$: factor de emisión de la sustancia o mezcla de sustancias (j) para la actividad (i).

$FA_{i,t}$: factor de actividad de la actividad (i) durante el tiempo (t).

Cuando la fuente involucrada para la evaluación de las emisiones cuenta con un equipo de control, la ecuación se expresa así:

$$E = FE_{i,j} * FA_{jt} * (1 - ER/100)$$

(3.4)

Donde:

$FE_{j,i}$: factor de emisión de la sustancia o mezcla de sustancias (j) para la actividad (i).

$FA_{i,t}$: factor de actividad de la actividad (i) durante el tiempo (t).

ER: eficiencia del equipo en reducción de emisiones (%)

Tanto el "AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors", como el "EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016" ofrecen unos factores de emisión ya establecidos para las distintas fuentes fijas. En la tabla 3.5 se presentan los capítulos referentes a estos factores de emisión, con el fin de orientar un poco al usuario con respecto a las fuentes que pueden ser consultadas con este fin.

Así mismo, adicionalmente la EPA, cuenta con una base de datos en línea que relaciona los factores de emisión para contaminantes del aire, criterio y peligrosos, tanto para procesos industriales como no industriales denominada "WebFIRE".

De acuerdo a la EPA (1995), los factores de emisión, se categorizan, según su grado de precisión, en diferentes categorías (A, B, C, D, y E), siendo "A" la categoría más confiable para un tipo de fuente y con mayor grado de precisión y "E" la de precisión más baja, lo cual se da por la falta de análisis de un número significativo de fuentes.

Tabla 3.5. Capítulos de consulta para los factores de emisión ya establecidos según el “AP-42” y el “Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016”

DOCUMENTO	CAPÍTULO
AP-42	<ol style="list-style-type: none"> 1. External Combustion Sources 2. Solid Waste Disposal 3. Stationary Internal Combustion Sources 4. Evaporation Loss Sources 5. Petroleum Industry 6. Organic Chemical Process Industry 7. Liquid Storage Tanks 8. Inorganic Chemical Industry 9. Food and Agricultural Industries 10. Wood Products Industry 11. Mineral Products Industry 12. Metallurgical Industry 13. Miscellaneous Sources 14. Greenhouse Gas Biogenic Sources
Air pollutant emission inventory guidebook 2016	<ol style="list-style-type: none"> 1. Energy <ol style="list-style-type: none"> 1.A. Energy 1.B. Fugitive Emissions from Fuels 2. Industrial Processes and Product Use 3. Agriculture 5. Waste 6. Other Sources <ol style="list-style-type: none"> 11. Natural Sources

La selección del factor de emisión para el cálculo de las emisiones de contaminantes al aire, puede ser por combustión o proceso, para lo cual se debe contar principalmente con la siguiente información (Gobierno del Distrito Federal, 2002):

- **Combustión:** la información se basa principalmente en determinar la capacidad del equipo de combustión, consumo y tipo de combustible utilizado. También si se utiliza o no un equipo de control y los horarios de operación. Si se utiliza equipo de control se analiza si éste se encuentra relacionado al punto de generación del contaminante, qué contaminante controla, tipo de equipo y eficiencia de control.
- **Proceso:** en este caso se debe analizar cada tipo de proceso u operación para cada etapa del proceso. La información se basa principalmente en determinar las actividades o etapas del proceso, el consumo de materiales, producción total y también, si cuenta o no con equipos de control.

3.3.3.1. Ejemplo del cálculo de emisiones por factor de emisión sin equipo de control

Calcular las emisiones anuales de NO_x de una caldera sin sistema de control en una planta termoeléctrica que quema gas natural. El consumo de calor corresponde a >100 millones de

MMBtu/h que quema gas natural y el consumo anual de gas natural es de 40 millones m³ (FA) (MAVDT, 2007a).

Tabla 3.6. Factores de emisión para NO_x en calderas de >100 MMBtu/h

GRANDES CALDERAS (>100 MMBtu/h entrada de calor)	FACTOR DE EMISIÓN (NO _x) Kg/10 ⁶ m ³	CATEGORÍA DE PRECISIÓN
Sin control (pre-NSPS)*	4480	A
Sin control (post-NSPS)*	3040	A
Con control (quemador de NO _x)	2240	A
Con control (recirculación de gases de combustión)	1600	D

*Calderas con entradas de calor de más de 250 MMBtu/h que comenzaron la modificación de la construcción o reconstrucción antes del 17 de agosto de 1971 y unidades con capacidades de entradas de calor entre los 100 y 250 MMBtu/h, que comenzaron la modificación después de esta fecha.

Fuente: AP-42, 1998.

Teniendo en cuenta que el valor del factor de emisión para NO_x es 4480 Kg/10 m³ (tabla 3.6) suponiendo que es una caldera vieja y el factor de emisión es el más alto, se aplica la ecuación 3.3 así:

$$E_{NO_x} = 4480 * 40 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{año}$$

$$E_{NO_x} = 179200 \text{ Kg/año}$$

En este caso el factor de actividad corresponde al consumo de combustible de la caldera de gas natural.

3.3.4. MODELOS DE EMISIÓN

Algunos de los modelos de emisión usados para fuentes fijas son: TANKS, WATER9, LANDFILL y PM Calculator. Cada uno de estos métodos tiene ventajas y desventajas técnicas y económicas, que deben ser consideradas en el momento de la aplicación.

En este sentido se recomienda seguir un orden de preferencia de acuerdo a la actividad de la empresa y la información de la misma, según la medición directa o monitoreo, factores de emisión, estimación mediante datos históricos, balance de materiales, cálculos de ingeniería y modelos matemáticos de emisión.

- **TANKS (EPA, 1999b):** es un programa diseñado para estimar emisiones al aire a partir de líquidos orgánicos en tanques de almacenamiento. TANKS cuenta con varias versiones (4.0, 3.1, 3.0, 2.0, 1.0) siendo la 4.09 la más actualizada y con nuevas características que siguen la metodología de cálculo de emisiones de la EPA. Los datos de entrada requeridos por TANKS se refieren a:

Información del tanque: tipo de tanque (tanque vertical de techo fijo, tanque horizontal de techo fijo, tanque de techo flotante externo, tanque de techo flotante interno o tanque de techo flotante externo en forma de cúpula), diámetro y largo del tanque (en pies), volumen de trabajo, frecuencia de llenado, color y estado de la pintura del tanque y características del techo (para tanques flotantes hay una pantalla de entrada de datos aparte).

Información del sitio: temperatura ambiente, presión atmosférica y velocidad del viento de la ciudad o municipio más cercano a la ubicación del tanque.

Información del líquido: identificación de los componentes químicos y propiedades del líquido almacenado (categoría química), con el fin de determinar la presión de vapor del líquido.

Una vez se ingresa esta información al programa, TANKS genera reportes de emisión en libras de materia volátil, mensuales o anuales, en un documento para impresión o en un archivo tipo EXCEL.

- **WATER9 (EPA, 2001):** este modelo calcula las emisiones de los componentes individuales de residuos en las plantas de tratamiento de aguas residuales, a través de la simulación esquemática de una planta de tratamiento de agua residual, usando una simbología establecida por el software. WATER9 es una versión actualizada de programas anteriores (WATER8, Chem9 y Chemdat8).

Las emisiones de los componentes se determinan con base en las propiedades del componente de interés y su concentración en el residuo, por lo tanto, es importante identificarlo previamente, ya sea utilizando la base de datos del programa o por la introducción de nueva información descriptiva del componente.

Las características principales de WATER9 se basan en las expresiones analíticas para estimar las emisiones al aire, la interface gráfica consistente de diagramas de flujo, una base de datos con las propiedades de los componentes orgánicos más comunes, los métodos para estimar propiedades de componentes orgánicos faltantes, los métodos para traer información de hojas de cálculo y una lista de opciones para ver e imprimir reportes.

- **LANDFILL (Amy et ál., 2006):** estima la tasa de emisión de una variedad de gases (metano, dióxido de carbono, compuestos orgánicos no metánicos) provenientes de rellenos sanitarios. Los datos de entrada se refieren básicamente a la capacidad de diseño del relleno sanitario, tasa y capacidad potencial de generación de metano y los años de operación del relleno sanitario.

Este modelo utiliza como método de estimación una ecuación simple de decaimiento de primer orden. El desarrollo de este modelo se resume en siete pasos principales:

- Selección del proyecto de relleno sanitario
 - Selección de los parámetros del modelo para calcular las emisiones
 - Definición de los parámetros de operación del relleno sanitario
 - Uso de las funciones de utilidad
 - Adaptación del modelo para un escenario específico
 - Reporte de las emisiones
 - Archivo de los cambios del proyecto del relleno sanitario
- **PM Calculator (EPA, 2003):** este modelo estima las emisiones de material particulado (MP_{2.5} y MP₁₀) en procesos en los que se utilizan equipos de control, manejando información del AP-42.

Los parámetros de entrada requeridos por este software son: el código de clasificación de la fuente (SCC, por sus siglas en inglés), código del dispositivo de control y un archivo de las emisiones de material particulado sin control.

La entrada de los códigos SCC, desventaja en el uso de este programa, ya que en Colombia se utiliza la Clasificación Internacional Industrial Uniforme (CIIU) para categorizar las actividades industriales, sin embargo, se podría establecer una relación de acuerdo a las características de la actividad objetivo a inventariar.

FUENTES MÓVILES

El crecimiento de la flota vehicular en las grandes ciudades capitales y centros urbanos durante los últimos años, ha generado que las fuentes móviles se conviertan en uno de los principales orígenes de contaminación atmosférica, a lo cual también se le suma, el aumento exponencial de las enfermedades respiratorias.

En Colombia, el parque automotor cuenta con 12'140.507 unidades de vehículos, de los cuales 4'382.184 son vehículos particulares, 878.605 vehículos públicos y 6'729.053 motocicletas, es decir el 55,43 % son motocicletas y 44,57 % son vehículos, maquinaria, remolques y semirremolques (datos reportados hasta enero de 2016) (RUNT, 2016).

Los vehículos automotores aportan en gran manera emisiones de contaminantes a las áreas urbanas. Estos contaminantes incluyen: precursores de ozono (CO, NO_x, COVNM gases efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O), sustancias acidificantes (NH₃, SO₂), material particulado (MP), especies carcinogénicas (hidrocarburos aromáticos policíclicos (PHA) y compuestos orgánicos persistentes (COP), sustancias tóxicas (dioxinas y furanos) y metales pesados (EEA, 2016d). Por esta razón, la evaluación de las emisiones de fuentes móviles es trabajada y manejada de manera independiente.

Una herramienta fundamental para el entendimiento del problema de contaminación ocasionada por parte de este tipo de fuentes y la formulación de políticas de control de la contaminación del aire, son los inventarios de emisiones de fuentes móviles.

La estimación de emisiones generadas por fuentes móviles puede ser bastante compleja, pues involucra aspectos como la tipología vehicular; características del combustible, el diseño y las condiciones de funcionamiento del motor; dispositivos de control utilizados, ciclos de conducción, estado de la red vial, entre otras (Mintransporte, 2016).

Es importante tener en cuenta que en esta guía solo se hace referencia a las fuentes móviles terrestres.

4.1. CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES MÓVILES VEHICULARES

Una fuente móvil es toda fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse. En las fuentes móviles se incluyen los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza (Minambiente, 2015).

Las fuentes móviles pueden clasificarse de varias maneras, estas incluyen: diseño para circulación, tipo de combustible, categoría vehicular; tipo de servicio, entre otras.

4.1.1. SEGÚN DISEÑO PARA CIRCULACIÓN

Las dos primeras grandes categorías en fuentes móviles se refieren a los vehículos en la vía (*on-road*) y los vehículos fuera de la vía (*non-road*) para efectos de esta guía solo se tendrán en cuenta los vehículos clasificados para uso en carretera.

- **VEHÍCULOS EN LA VÍA (*on-road*):** corresponde a los vehículos automotores diseñados para circular por vías públicas, como son las motocicletas, los vehículos de pasajeros, buses, camiones, entre otros.

¿Sabía qué?

Las características del combustible influyen en las emisiones generadas por fuentes móviles

- **VEHÍCULOS FUERA DE LA VÍA (non-road):** “Se refiere a cualquier máquina móvil, equipo industrial transportable o cualquier vehículo con o sin carrocería, que no ha sido diseñado para el transporte de pasajeros o carga en carretera, en el cual se ha instalado una máquina de combustión interna. Esta definición incluye, pero no está limitada a las maquinas instaladas en: plataformas industriales de perforación, compresores, entre otros; equipos de construcción, incluyendo motoniveladoras, tractores, excavadores hidráulicos, cargadores, entre otros; equipos agrícolas, trilladoras, entre otros; equipos para silvicultura, vehículos auto-propulsados; (...)”⁹ (Minambiente, 2013).

4.1.2. SEGÚN TIPO DE COMBUSTIBLE

Las emisiones provenientes de fuentes móviles se generan como resultado del proceso de combustión en los motores de combustión interna. Este proceso, puede darse en motores de encendido por chispa (motores ciclo Otto) o de encendido por compresión (motores ciclo diésel). De forma adicional a la clasificación por tipo de combustible, ésta se puede realizar en función del tamaño del motor o cilindraje.

Teniendo en cuenta los combustibles empleados en el territorio nacional, esta clasificación puede incluir:

- Vehículos a gasolina
- Vehículos operados con combustible diésel/ACPM y sus mezclas
- Dedicados a gas natural o GLP (gas licuado de petróleo)
- Vehículos bi-combustible¹⁰
- Vehículo dual¹¹
- Vehículos híbridos

De manera similar, para los vehículos tipo motocicletas, motociclo y triciclos, se puede emplear una clasificación por tipo de motor (con mezcla de gasolina aceite -dos tiempos; gasolina (cuatro tiempos) o en función de la cilindrada de los mismos.

4.1.3. SEGÚN CATEGORÍA VEHICULAR

Para efectos de la medición de emisiones contaminantes, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ha adoptado la clasificación de fuentes móviles por categoría vehicular conforme a los ciclos de prueba de Estados Unidos y de la Unión Europea, como se muestra a continuación.

9. Resolución 1111 de 2013 del Minambiente, artículo segundo – Anexo 1.

10. Vehículo bicombustible: vehículo automotor que utiliza un motor de combustión interna que puede operar con gas natural o con gasolina (u otro combustible de ignición por chispa como etanol (...)). Resolución 1111 de 2013 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, anexo 1.

11. Vehículo Dual: vehículo automotor que utiliza un motor de combustión interna con una mezcla de gas natural y diésel (...). Ibídem.

Tabla 4.1. Categorías de vehículos conforme a los ciclos de prueba de Estados Unidos

Categoría	Subcategoría	Capacidad	Peso neto	Peso bruto	ALVW	LVW
			(kg)			
LDV		≤ 12 pasajeros		≤ 3.856		
LDT	LLDT	LDT1	≤ 2.722	≤ 2.722		≤ 1.701
		LDT2		> 1.701		
	HLDT	LDT3		> 2.722	≤ 2.608	
		LDT4		≤ 3.856	> 2.608	
HDV	MDPV	< 12 pasajeros	> 2.722	> 3.856		
				< 4.537		
	LHDGE	> 3.856				
		≤ 6.350				
		> 6.350				
	LHDDE	> 3.856				
		< 8.845				
MHDDE	≥ 8.845					
HHDE	≤ 14.969					
Urban bus	> 15 pasajeros		> 14.969			

Fuente: Resolución 1111 de 2013, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Tabla 4.2. Categorías de vehículos conforme a los ciclos de prueba de la Unión Europea

Categoría	Subcategoría	Capacidad	Peso bruto (kg)	RW (kg)	
				Para vehículos ciclo Otto	Para vehículos ciclo diésel
M	M1	≤ 8 Pasajeros			
	M2	> 8 Pasajeros	≤ 5.000		
	M3		> 5.000		
N	N1	> 12 pasajeros	≤ 3.500	< 1.250	≤ 1.305
				≥ 1.250	> 1.305
				≤ 1.700	≤ 1.760
	> 1.700			> 1.760	
	N2			> 3.500	
≤ 12.000					
N3	> 12.000				

Fuente: Resolución 1111 de 2013, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

De manera análoga, para los vehículos tipo motocicleta, motociclos y similares, a nivel internacional se ha establecido, entre otras, la siguiente clasificación mostrada en las tablas 4.3 y 4.4.

Tabla 4.3. Categorías de vehículos tipo motocicleta de acuerdo con la clasificación de la EPA, Estados Unidos

Categoría	Descripción categoría
Clase I	Motocicletas con desplazamiento de motor entre 50 cc y 169 cc
Clase II	Motocicletas con desplazamiento de motor entre 170 cc y 279 cc
Clase III	Motocicletas con desplazamiento de motor mayor a 279 cc

Fuente: adaptado de 40 CFR Parts 9, 86, 90, and 1051 Control of Emissions from Highway Motorcycles; Final Rule; January 15, 2004 (USA, 2004).

Tabla 4.4. Categorías de vehículos de dos o tres ruedas y los cuatriciclos de acuerdo con el reglamento de la UE

Categoría	Descripción categoría	Subcategoría	Descripción Subcategoría
L1e	Vehículo de motor de dos ruedas ligero	L1e-A	Vehículo (ciclo de motor)
		L1e-B	Ciclomotor de dos ruedas
L2e	Ciclomotor de tres ruedas	L2e-P	Ciclomotor de tres ruedas concebido para el transporte de pasajeros
		L2e-U	Ciclomotor de tres ruedas concebido para el transporte de mercancías
L3e	Motocicleta de dos ruedas	L3e-A1	Motocicleta de prestaciones bajas
		L3e-A2	Motocicleta de prestaciones medias
		L3e-A3	Motocicleta de prestaciones altas
L4e	Motocicleta de dos ruedas con sidecar	-	-
L5e	Triciclo de motor	L5e-A	Triciclo
		L5e-B	Triciclo comercial
L6e	Cuatriciclo ligero	L6e-A	Cuatriciclo ligero para carretera
		L6e-BU	Cuatrimóvil ligero para el transporte de mercancías
		L6e-BP	Cuatrimóvil ligero para el transporte de pasajeros
L7e	Cuatriciclo pesado	L7e-A	Quad pesado para carretera
		L7e-B	Quad todo terreno pesado
		L7e-C	Cuatrimóvil pesado

Fuente: adaptado del Reglamento (UE) No. 168/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo, relativo a la homologación de los vehículos de dos o tres ruedas y los cuatriciclos, y a la vigilancia del mercado de dichos vehículos (UE, 2013).

4.1.4. TECNOLOGÍA VEHICULAR PARA EL CONTROL DE EMISIONES

El proceso de combustión genera principalmente CO_2 y H_2O . Sin embargo, también se generan subproductos como resultado de la oxidación incompleta del combustible (CO , hidrocarburos, material particulado) o por la oxidación de especies no combustibles presentes en la cámara de combustión (NO_x a partir del nitrógeno en el aire, SO_x provenientes del azufre en el combustible y lubricantes, entre otros) (EEA, 2016d).

Por esta razón, y con el ánimo de dar cumplimiento a la normativa existente, se han diseñado sistemas de control que minimizan la emisión de estas sustancias, como por ejemplo los dispositivos de post tratamiento (remueve los contaminantes en la corriente del tubo de escape), los sistemas modificadores de combustión (alteran el ambiente durante la combustión del combustible en el motor), los nuevos tipos de motor de combustión interna con inyección directa de gasolina, auto-encendido controlado y encendido por compresión de carga homogénea.

A continuación, se señalan los principales sistemas de control empleados en fuentes móviles.

- **Sistema cerrado de ventilación positiva del cárter:** este sistema previene la liberación de gases del depósito de aceite del motor (cárter) a la atmósfera, conduciéndolos a la cámara de combustión, donde se queman junto con la mezcla aire/combustible. Este sistema utiliza, como elemento principal, una válvula de ventilación positiva (PCV, por sus siglas en inglés) (MAVDT, 2008b).
- **Sistema de control de emisiones evaporativas:** recoge los vapores de gasolina provenientes del tanque del combustible o del carburador, y los conduce hacia el depósito que contiene carbón activado (cánister) para drenarlos y llevarlos a la cámara de combustión donde se queman al tiempo con la mezcla aire/combustible (MAVDT, 2008b).
- **Sistema de recirculación de gases (EGR):** recircula pequeñas cantidades de gases de escape hacia el múltiple de admisión, con lo cual se reduce la emisión de óxidos de nitrógeno (MAVDT, 2008b). Puede reducir NO_x entre un 20 – 50%.
- **Sistema de autodiagnóstico a bordo (OBD):** dispositivos o sistemas instalados a bordo del vehículo y conectados al módulo electrónico de control, que tienen como objetivo identificar el deterioro o el mal funcionamiento de los componentes del sistema de control de emisiones; alertar al usuario del vehículo para proceder al mantenimiento o a la reparación del sistema de control de emisiones, almacenar y proveer acceso a las ocurrencias de defectos o fallas en los sistemas de control y contar con información sobre el estado de mantenimiento y reparación de los sistemas del control de emisiones (Minambiente, 2013).
- **Convertidor catalítico de 2 vías:** es la forma más antigua de control catalítico. Oxida el CO y los hidrocarburos (COV) a CO_2 y H_2O . Puede reducir el CO y los compuestos orgánicos volátiles hasta en un 95 %.
- **Convertidor catalítico de 3 vías:** este sistema tiene una sección de oxidación que utiliza platino y paladio y una sección de reducción, que utiliza rodio para reducir los NO_x a nitrógeno y oxígeno inocuos; de igual forma, oxida el CO y los hidrocarburos de manera similar que un catalizador de dos vías. Reduce el CO y los compuestos orgánicos volátiles hasta en un 99 % y los NO_x hasta un 95 %.
- **Filtro de material particulado (DPF):** remueve el material particulado de la corriente del tubo de escape a través de un filtro removible. Puede reducir el material particulado entre 80 y 90 %.
- **Sistema catalítico con filtro de partículas (CPF):** destruye el material particulado en la corriente del tubo de escape colectándolo en un filtro que contiene un material catalizador y luego hace combustión del material particulado para removerlo. Puede reducir el material particulado en un 95%.
- **Catalizador de oxidación diésel (DOC):** destruye el CO , los hidrocarburos, los compuestos orgánicos volátiles y el material particulado de los hidrocarburos en la corriente del tubo de

escape. Esta tecnología sólo es efectiva en la fracción orgánica soluble de material particulado producto de la combustión diésel. El rango de reducción oscila entre un 10 a un 30 % (SDA, 2014)

- **Inyección de urea:** la urea es inyectada a la corriente del tubo de escape para destruir el NO que se forma en el motor. Puede reducir los NO_x en un 50 %.
- **Inyección de urea con catalizador:** la urea es inyectada a la corriente de tubo de escape y luego tomada a través de un catalizador donde se destruye el NO. Los sistemas de reducción catalítica selectiva pueden reducir los NO_x en un 60 a 90 %, las emisiones de HC hasta el 80 % y las emisiones de material particulado un 20 a 30 %.

En la tabla 4.5, se presentan algunos de los sistemas de control de emisiones característicos de las normativas estadounidense y europea.

Tabla 4.5. Sistemas de control de emisiones de acuerdo con la normativa de Estados Unidos y de Europa

Reglamento	Tecnología	Contenido azufre para combustible diésel (ppm)	Características para vehículos diésel	Características para vehículos a gasolina
USA	EPA 1991	2500	-	-
	EPA 1994	500	-	-
	EPA 1998	500	* Control electrónico * Inyector unitario electrónico P 1500-1700 bar * Inyección variable * Mejoras en combustión	-
	EPA 2004	500	* Inyector unitario electrónico o common-rail P 1700-1900 bar * Inyección variable * Rediseño del pistón * EGR con enfriador * DOC	-
	EPA 2007	15	* VGT * Inyector unitario electrónico o common-rail P 1800-2000 bar * Inyección variable * Calibración y optimización del EGR * DOC y DPF*	-
	EPA2010	15	*VGT o doble etapa * Sistema de inyección de alta presión (P > 2000 bar) y alta flexibilidad * Combustión avanzada * Integración con subsistemas * EGR (solo como soporte al SCR) * SCR—zeolitas * DOC y DPF de pared	-

Reglamento	Tecnología	Contenido azufre para combustible diésel (ppm)	Características para vehículos diésel	Características para vehículos a gasolina
UE	Euro I (1)	2000	-	* Catalizador de tres vías con sistema de control de ciclo cerrado *Requiere combustible sin plomo
	Euro II (2)	500	*Turbocargador *Bomba en línea o rotativa a una presión (P) de 1200 bar *Retraso en inyección de diésel	* Catalizador de tres vías con sistema de control de ciclo cerrado *Reducción en los límites de emisión con relación a Euro I
	Euro III (3)	350	* Control electrónico * Inyector unitario electrónico * P 1500-1700 bar *Inyección variable * DOC** * DPF	*Prueba de durabilidad de los sistemas anticontaminantes *Pruebas en circulación *Sistemas de autodiagnóstico a bordo (OBD)
	Euro IV (4)	50	* Inyector unitario electrónico o common-rail *P 1700-1900 bar *Inyección variable * SCR*** con catalizador de vanadio * DOC	*Límites más estrictos con relación a Euro 3, a través de mejoras en el abastecimiento de combustible y el seguimiento y control de los sistemas de tratamiento de emisiones
	Euro V (5)	10	*Inyector unitario electrónico o common-rail * P 1700-1900 bar * Inyección variable * SCR—vanadio *Ajustes al SCR * DOC	*Reducción de emisiones de NOx del 25% en comparación con el Euro 4 Límite de emisión en masa para MP para vehículos a gasolina de inyección directa

Reglamento	Tecnología	Contenido azufre para combustible diésel (ppm)	Características para vehículos diésel	Características para vehículos a gasolina
UE	Euro VI (6)	10	* Turbocargador de geometría variable (VGT) o doble etapa * Sistema de inyección de alta presión (P > 2000 bar) y alta flexibilidad * Combustión avanzada * Integración con subsistemas * EGR**** (solo como soporte al SCR) * SCR—zeolitas * DOC y DPF de pared	Para vehículos a gasolina no se introducen nuevas reducciones

*Filtros de partículas diésel (DPF)

**Catalizador de oxidación (DOC, por sus siglas en inglés)

***Tecnologías de reducción catalítica selectiva (SCR, por sus siglas en inglés)

****Tecnologías de recirculación de gases (EGR, por sus siglas en inglés)

Fuente: adaptado de ICCT, 2014 y EEA 2016d

4.1.5. OTRAS FORMAS DE CLASIFICACIÓN

- **Clasificación Código Nacional de Tránsito Terrestre:**

De acuerdo con la normativa colombiana, el parque automotor puede clasificarse de acuerdo a la clase de vehículo, el tipo de servicio (público, oficial, particular; otros.)¹², o según su finalidad (transporte de pasajeros o transporte de carga).

De acuerdo con la Ley 769 de 2002¹³, la tipología de servicio se define como sigue:

Vehículo de servicio particular: vehículo automotor destinado a satisfacer las necesidades privadas de movilización de personas, animales o cosas.

Vehículo de servicio público: vehículo automotor homologado, destinado al transporte de pasajeros, carga o ambos, por las vías de uso público mediante el cobro de una tarifa, porte, flete o pasaje.

Vehículo de servicio oficial: vehículo automotor destinado al servicio de entidades públicas.

Vehículo de servicio diplomático o consular: vehículo automotor destinado al servicio de funcionarios diplomáticos o consulares.

12. Transporte en cifras. Estadísticas 2015 (Mintransporte, 2015)

13. Ley 769 de 2002. Por la cual se expide el Código Nacional de Tránsito Terrestre y se dictan otras disposiciones

Clase de vehículo: denominación dada a un automotor de conformidad con su destinación, configuración y especificaciones técnicas

Tabla 4.6. Clasificación por clase de vehículo según la legislación colombiana

	CLASE DE VEHÍCULO	DESCRIPCIÓN	
Pasajeros	Motocicleta	Vehículo automotor de dos ruedas en línea, con capacidad para el conductor y un acompañante.	
	Mototriciclo	Vehículo automotor de tres ruedas con estabilidad propia y capacidad para el conductor y un acompañante del tipo SideCar y recreativo	
	Antiguo	Automotor que haya cumplido 35 años y que conserve sus especificaciones y características originales de fábrica, presentación y funcionamiento.	
	Clásico	Automotor que haya cumplido 50 años y que además de conservar sus especificaciones y características originales de fábrica, presentación y funcionamiento, corresponda a marcas, series y modelos catalogados internacionalmente como tales.	
	Taxis	Vehículo automotor destinado al servicio público individual de pasajeros.	
	Buseta	Vehículo destinado al transporte de personas con capacidad de 20 a 30 pasajeros y distancia entre ejes inferiores a 4 metros.	
	Microbús	Vehículo destinado al transporte de personas con capacidad de 10 a 19 pasajeros.	
	Bus	Vehículo automotor destinado al transporte colectivo de personas y sus equipajes, debidamente registrado conforme a las normas y características especiales vigentes.	
	Vehículo de transporte masivo	Vehículo automotor para transporte público masivo de pasajeros, cuya circulación se hace por carriles exclusivos e infraestructura especial para acceso de pasajeros.	
		Cuatrimoto	Vehículo automotor de cuatro ruedas con componentes mecánicos de motocicleta, para transporte de personas o mercancías con capacidad de carga de hasta 770 kilogramos.
	Motocarro	Vehículo automotor de tres ruedas con estabilidad propia con componentes mecánicos de motocicleta, para el transporte de personas o mercancías con capacidad útil hasta 770 kilogramos.	
Carga	Camión	Vehículo automotor que por su tamaño y destinación se usa para transportar carga.	
	Camión tractor	Vehículo automotor destinado a arrastrar uno o varios semirremolques o remolques, equipado con acople adecuado para tal fin.	
	Camión C2-P	Camión rígido de dos ejes pequeño.	
	C2-G	Camión rígido de dos ejes grande.	
	Configuración C3	Camión rígido de tres ejes.	
	Configuración C4	Camión rígido de cuatro ejes.	
	C3	Tractocamión C2-S1	Tractocamión de dos ejes con semirremolque de un eje.
	C4	Tractocamión C2-S2	Tractocamión de dos ejes con semirremolque de dos ejes.
	C4	Tractocamión C3-S1	Tractocamión de tres ejes, con semirremolque de un eje.
	Configuración C5		Camión rígido de cuatro ejes.
	C5	Tractocamión C3-S2	Tractocamión de tres ejes, con semirremolque de dos ejes.
> C5	Tractocamión C3-S3	Tractocamión de tres ejes, con semirremolque de tres ejes.	

Fuente: adaptado de la Ley 769 de 2002 y la Resolución 4100 de 2004¹⁴

14. Resolución 4100 de 2004 de Ministerio de Transporte, "Por la cual se adoptan los límites de pesos y dimensiones en los vehículos de transporte terrestre automotor de carga por carretera, para su operación normal en la red vial a nivel nacional"

- **Clasificación Instituto Nacional de Vías - INVÍAS e Instituto Nacional de Concesiones - INCO**

El Instituto Nacional de Vías –INVÍAS, clasifica los vehículos de acuerdo a la clase de vehículo, con el fin de efectuar el cobro de las tarifas de peajes a cargo del INVÍAS en la red vial nacional, como se muestra en la tabla 4.7.

Tabla 4.7. Categoría vehicular según INVÍAS e INCO

CATEGORÍA	CRITERIOS
I	Automóviles, camperos, camionetas, microbuses con ejes de llanta sencilla.
II	Buses, busetas, microbuses con eje trasero de doble llanta y camiones de dos ejes.
III	Vehículos de pasajeros y de carga de tres y cuatro ejes.
IV	Vehículos de categoría de cinco ejes.
V	Vehículos de categoría de seis ejes.

Fuente: tomado de la Resolución 140 de 2017¹⁵

- **Clasificación Registro Único Nacional de Tránsito - RUNT**

“El RUNT es un sistema de información que permite registrar y mantener actualizada, centralizada, autorizada y validada la misma sobre los registros de automotores, conductores, licencias de tránsito, empresas de transporte público, infractores, accidentes de tránsito, seguros, remolques y semirremolques, maquinaria agrícola y de construcción autopropulsada y de personas naturales o jurídicas que prestan servicio al sector” (RUNT, 2017).

El RUNT ha establecido tablas paramétricas para la clasificación de vehículos, teniendo en cuenta los diferentes registros alojados en este sistema. En la tabla siguiente se resumen algunos de los parámetros empleados por el RUNT.

Tabla 4.8. Clasificación de vehículos de acuerdo con las tablas paramétricas del RUNT

Parámetro	Descripción
Tipo de servicio	Particular, público, diplomático, oficial
Clase de vehículo	Automóvil, bus, buseta, camión, camioneta, campero, microbús, tracto camión, motocicleta, maquinaria agrícola, maquinaria industrial, motocarro, moto triciclo, cuatrimoto, remolque, semirremolque, volqueta
Línea	Por ejemplo: Aveo, Carnival, Cerato, Clio, Jetta, Pathfinder, Sentra, Civic, Cabrio, GMK 5100, etc.
Tipo de carrocería	Por ejemplo: estacas, furgón, platón, niñera, coupé, sedan, van, etc.
Modalidad servicio	Pasajeros, carga, mixto
Cilindraje	Expresado en centímetros cúbicos. Por ejemplo: 1300cc, 2000cc, 12000cc
Tipo Combustible	Gasolina, GNV, diésel, gas-gasolina, eléctrico, hidrógeno, etanol, biodiésel, GLP, gasolina-eléctrico, diésel– eléctrico.

14. Resolución 140 de 2017 del Ministerio de Transporte - Instituto Nacional de Vías, “Por la cual se actualizan las tarifas de peaje a cobrar en las estaciones de peaje a cargo del Instituto Nacional de Vías-INVÍAS y el Programa de Seguridad en Carreteras Nacionales para la vigencia 2017, en los términos estipulados en las Resoluciones 228 de 2013 y 00982 de 2015, emitidas por el Ministerio de Transporte”

4.2. INFORMACIÓN PARA FUENTES MÓVILES

Al igual que en fuentes fijas, la información necesaria para la elaboración de un inventario de emisiones atmosféricas varía en función de los objetivos y el alcance del inventario. A continuación, se mencionan algunas fuentes comunes de información secundaria para la estimación de emisiones provenientes de fuentes móviles.

4.2.1. FUENTES DE INFORMACIÓN

Dentro de los recursos para identificar, caracterizar y cuantificar fuentes móviles se encuentran:

Registros existentes en entidades (importadores, ensambladores, concesionarios, etc.) que permiten conocer una distribución de la flota vehicular en categorías vehiculares y edades.	RUNT, sistema que cuenta con información actualizada y centralizada sobre automotores y registros relacionados directamente con el transporte en Colombia.
Aforos vehiculares desarrollados.	Autoridades de tránsito y transporte (Ministerio de transporte, alcaldías, secretarías de tránsito y movilidad, agentes de tránsito entre otros).
Instituciones, empresas que manejan flota vehicular (p. ej.: Transmilenio, operadores de carga, transporte intermunicipal, etc.)	Censos de empresas comercializadoras de combustibles
Operativos en vía.	Inventarios anteriores

4.2.2. NIVEL DE DETALLE

El nivel de detalle en fuentes móviles para la evaluación de emisiones puede incluir: las emisiones del tubo de escape, las emisiones evaporativas del combustible y emisiones generadas por los neumáticos y los frenos.

Figura 4.1. Niveles de complejidad para un inventario de fuentes móviles



Adpatado de SEMARNAT, 2005

4.2.2.1. EMISIONES DEL TUBO DE ESCAPE

El tubo de escape es el punto principal de descarga de las emisiones vehiculares, resultantes de la oxidación del combustible. Desde allí se emite el total de monóxidos de carbono y óxidos de nitrógeno y la mitad de los hidrocarburos que produce el vehículo (Radian International LCC, 2006).

Las emisiones liberadas por el tubo de escape pueden variar dependiendo de varios factores como la aceleración del automóvil, el modo de conducción, el tipo de combustible, la temperatura, presión y la eficiencia del dispositivo de control de emisiones, entre otros.

4.2.2.2. EMISIONES EVAPORATIVAS DEL COMBUSTIBLE

Las emisiones evaporativas hacen referencia a la suma de todas las emisiones de compuestos orgánicos volátiles diferentes de metano (COVNM) relacionadas con el combustible, pero no derivadas de la combustión de éste. La mayoría de las emisiones evaporativas emanan de los sistemas de combustibles, como el tanque, el sistema de inyección y las líneas de combustible (EEA, 2016e).

Las emisiones evaporativas corresponden a (SEMARNAT, 2005):

- Emisiones del motor en caliente: ocurren debido a la volatilización del combustible en el sistema de alimentación después de que el motor se ha apagado.
- Emisiones de operación: ocasionadas por las fugas de combustible líquido o vapor, presentes cuando el motor está en funcionamiento.
- Emisiones durante la recarga de combustible: emisiones desplazadas desde el tanque de combustible del vehículo durante la recarga.
- Emisiones diurnas: ocurren por el aumento en la temperatura del combustible y el aumento en la presión del vapor de éste, por causa de temperaturas ambientales altas durante las horas de luz, el aporte de calor del sistema de escape o el calor reflejado por la superficie de circulación.
- Emisiones en reposo: se presentan cuando el motor no está en funcionamiento, son causadas por fugas de combustible y la permeabilidad del vapor a través de las líneas de alimentación del combustible.

Para evaluar las emisiones evaporativas de operación, diurnas y de reposo, se realizan clasificaciones de las diferentes tecnologías de automotores, mediante pruebas dinámicas (método en cabina cerrada SHED) bajo diferentes condiciones de manejo.

4.2.2.3. OTRAS EMISIONES

Emisiones de material particulado, incluyendo carbono negro (*black carbon*), son generadas debido al desgaste de los neumáticos y frenos del vehículo y el desgaste de la superficie de la carretera (EEA, 2016f). De igual forma, el levantamiento de polvo de los caminos causado por los vehículos, el polvo suspendido por la turbulencia de movimiento, generan emisión de partículas de tamaños y composición diferentes a las generadas por combustión.

4.3. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES VEHICULARES

En fuentes móviles, el método para calcular las emisiones en las fuentes móviles, relaciona el factor de emisión y el factor de actividad. En este sentido, la ecuación utilizada para estimar las emisiones en fuentes móviles se convierte en:

$$E = FE_{i,j,k} * FA_{j,t}$$

(4.1)

Donde:

E : emisiones totales
 $FE_{i,j,k}$: factor de emisión del contaminante (i), para el vehículo de la categoría vehicular (j), y combustible (k).
 $FA_{j,t}$: factor de actividad del vehículo de la categoría vehicular (j), durante el tiempo (t).

De acuerdo al nivel de detalle, el total de las emisiones en fuentes móviles se calculan como la suma de las emisiones en caliente (con el motor a temperatura normal de funcionamiento) y las emisiones durante el funcionamiento del motor térmico transitorio (arranque en frío), este último corresponde a cuando la temperatura del motor del automóvil es inferior a las normas de diseño, las emisiones evaporativas, emisiones de polvo re-suspendido y aquellas generadas por el desgaste de frenos y llantas. (EEA, 2016d; CONAMA 2009).

Para lo cual la ecuación corresponde a:

$$E_{Total} = E_{Frío} + E_{Caliente} + E_{Evaporativa} + E_{desgaste} + E_{Polvo}$$

(4.2)

Donde:

E_{Total} : emisiones totales de un contaminante en particular, en un área determinada.
 $E_{Frío}$: Emisiones durante el funcionamiento del motor térmico transitorio (arranque en frío).
 $E_{caliente}$: Emisiones durante el funcionamiento del motor estabilizado (caliente).

FACTOR DE ACTIVIDAD

Para fuentes móviles, usualmente el factor de actividad está relacionado con la distancia recorrida por un vehículo. En un inventario de emisiones este factor representa la distancia total recorrida por una población de vehículos en un periodo de tiempo determinado. Sin embargo, el factor de actividad también puede hacer referencia al consumo de combustible del vehículo.

Esta información puede ser obtenida a partir de modelos de transporte aplicables al área de estudio o de conteos de vehículos en circulación, conocido como: tráfico promedio diario.

En aquellos casos en que no se cuenta con esta información, el factor de actividad se estima con base en otros parámetros alternativos como el consumo de combustible a nivel regional, la caracterización detallada del parque automotor o encuestas directas a usuarios (CONAMA, 2009).

El valor del factor de actividad se totaliza teniendo en cuenta las categorías vehiculares establecidas para el inventario a desarrollar:

4.3.1. FACTOR DE EMISIÓN

Para fuentes móviles, el factor de emisión normalmente es expresado como la cantidad de sustancia o contaminante liberado a la atmósfera con relación a la cantidad de combustible consumido o a la distancia recorrida.

El factor de emisión puede ser obtenido por medición directa a través de analizadores de emisiones de gases utilizados en las pruebas de dinamómetro de chasis, en el caso de vehículos a gasolina y motocicletas, o en un banco de pruebas para motores pesados, en el caso de vehículos a diésel. También puede ser estimado por balance de masa, haciendo la aplicación inversa de modelos de dispersión en condiciones controladas (túneles vehiculares y cañones urbanos) o, a través de estudios e investigaciones realizados a nivel nacional e internacional, todos estos teniendo en cuenta la categoría vehicular.

De igual forma, el factor de emisión para fuentes móviles simple, donde se realiza el cálculo a partir de resultados de concentración obtenidos en las estaciones de medición o ambientes urbanos (p. ej.: calles cerradas, túneles, cañones urbanos o en calles abiertas o autopistas) recogidos por unos receptores.

Los factores de emisión para fuentes móviles, pueden ser obtenidos directamente de modelos de emisión o en documentos compilatorios como la *Guía de inventarios de emisiones contaminantes al aire* de la Agencia Ambiental Europea (EMEP/EEA *Air pollutant emission inventory guidebook* 2016). Factores de emisión para fuentes móviles pueden ser consultados en el capítulo 1 sobre energía, que a su vez se divide en diferentes secciones, tal como muestra en la tabla 4.9.

Tabla 4.9. Fuentes de consulta de factores de emisión para fuentes móviles de acuerdo con EEA, 2016.

CAPÍTULO	SUBCAPÍTULO	SECCIÓN	TÍTULO
ENERGY	A. COMBUSTIÓN	I.A.3.a	Aviación
		I.A.3.b.i-iv	Emisiones provenientes del tubo de escape para vehículos en vía
		I.A.3.b.v	Evaporación de gasolina
		I.A.3.b.vi-vii	Desgaste de neumáticos y frenos de vehículos en vía, desgaste de la superficie
		I.A.3.c	Ferrocarriles
		I.A.3.d	Navegación
		I.A.4	Otras fuentes móviles fuera de la vía (non-road) y maquinaria

Fuente: EEA 2016a

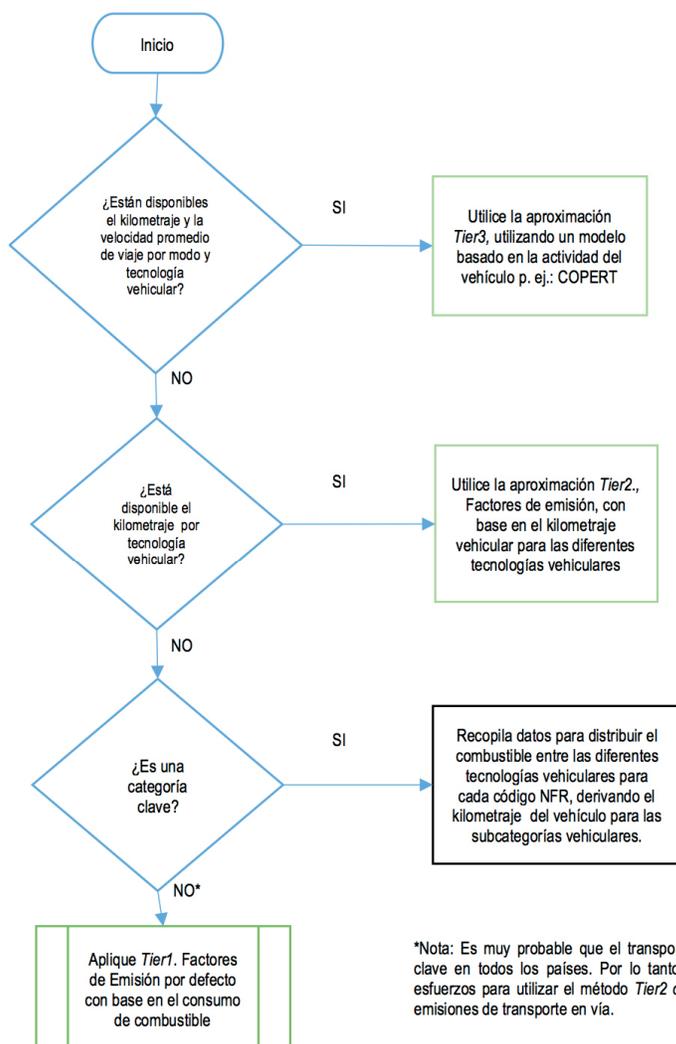
La guía europea, emplea una metodología para la estimación de emisiones por niveles de complejidad, conocidos comúnmente como “Tier”, estos niveles o escalas están asociados básicamente a la cantidad y calidad de información que se tiene disponible y al enfoque o alcance adoptado para la estimación.

Para fuentes móviles la metodología *Tier 1* utiliza el combustible como factor de actividad, junto con factores de emisión promedio específicos del combustible. Ésta, es similar a la metodología *Tier 1* descrita en la Guía IPCC, 2006. Este método debe ser usado solo en ausencia de información más detallada que las estadísticas de combustible.

Por su parte la metodología *Tier 2*, considera el combustible utilizado por las diferentes categorías vehiculares, así como su estándar de emisión. Finalmente, en la metodología *Tier 3*, las emisiones son calculadas utilizando una combinación de datos técnicos confiables y el factor de actividad; es también llamada “Metodología detallada” e involucra aspectos como la operación del motor en frío y en caliente, el ciclo de conducción entre otros. (EEA, 2016d)

La guía europea propone el siguiente esquema para la selección de la metodología a emplear:

Figura 4.2. Árbol de decisión para estimación de emisiones de fuentes móviles



*Nota: Es muy probable que el transporte en vía sea una categoría clave en todos los países. Por lo tanto, siempre se deben realizar esfuerzos para utilizar el método *Tier2* o *Tier3* para la estimación de emisiones de transporte en vía.

La Guía IPCC es empleada para el cálculo de emisiones de GEI del sector transporte y es descrita con mayor detalle en la Tercera comunicación nacional de cambio climático — Inventario nacional de GEI.

Sabias que...

En la guía europea usualmente se emplean 3 niveles de complejidad metodológica:

Tier 1: es el método más básico y sencillo. Aplica una relación lineal simple entre el factor de actividad y el factor de emisión. El factor de actividad se obtiene generalmente de información estadística. Los factores de emisión de esta categoría han sido escogidos de forma tal que representen las condiciones “típicas” o “promedio” de un proceso, y tienden a ser independientes de la tecnología.

Tier 2: es un método intermedio. Se emplea un factor de actividad igual o similar al de Tier 1, pero aplica factores de emisión específicos del país, que han sido desarrollados con información específica del mismo sobre las condiciones de los procesos, la calidad de los combustibles, tecnologías de control, etc.

Tier 3: es el método más demandante en términos de complejidad y requerimientos de información. Puede incluir el uso de datos a nivel de la instalación o modelos sofisticados. Por ejemplo, puede incluir el uso de datos del registro de emisiones y transferencia de contaminantes, o datos de esquemas de comercio de emisiones, en el caso de actividades industriales, o modelos como COPERT, en el caso de fuentes móviles. (EEA, 2016a).

Estos niveles de complejidad también se emplean para fuentes fijas.

4.3.1.1. EJEMPLO DE CÁLCULO EMPLEANDO EL FACTOR DE EMISIÓN

Estimar las emisiones de CO y material particulado (MP), para un vehículo que opera con combustible diésel, de cilindrada mayor a 2L, estándar compatible con Euro 2, que durante un día recorre 60 km en un núcleo urbano, a una velocidad promedio de 40km/h.

Para la estimación de emisiones se emplearán los factores de emisión propuestos en la Guía de inventarios de emisiones contaminantes al aire de la Agencia Ambiental Europea, capítulo I.A.3.b.i-iv Road transport. (EEA, 20106d)

Método Tier I:

Las emisiones se estiman mediante la ecuación:

$$E_i = FA_{jk} * FE_{ijk}$$

En este caso se tiene:

- * Factor de actividad en términos del consumo de combustible del vehículo de categoría vehicular (j), que emplea el combustible (k).
- * Factor de emisión en términos del consumo de combustible contaminante (i), del vehículo de categoría vehicular (j), que emplea el combustible (k).

Así las cosas, para este vehículo que pertenece a la categoría “Vehículos de pasajeros” y utiliza combustible diésel, el factor de emisión para CO y material particulado corresponde a¹⁵:

15. La guía de la Agencia Ambiental Europea propone un valor mínimo, uno máximo y uno promedio para el factor de emisión; para el ejemplo se emplea el valor promedio.

$$FE_{CO} = 3,33 \frac{gCO}{kg \text{ diesel}}$$

$$FE_{MP} = 1,10 \frac{gMP}{kg \text{ diesel}}$$

Teniendo en cuenta que no se conoce el consumo de combustible, se emplea el factor de consumo típico por categoría vehicular propuesto en la guía, que en este caso corresponde a 60 g diésel/km

Las emisiones estimadas para una distancia recorrida de 60 km corresponden a:

$$E_{CO} = \frac{60g \text{ diesel}}{km} * \frac{3,33gCO}{kg \text{ diesel}} * \frac{1kg \text{ diesel}}{1000g \text{ diesel}} * 60km = 11,99 gCO$$

$$E_{MP} = \frac{60g \text{ diesel}}{km} * \frac{1,10gMP}{kg \text{ diesel}} * \frac{1kg \text{ diesel}}{1000g \text{ diesel}} * 60km = 3,96 gMP$$

Método Tier2:

Las emisiones se estiman mediante la ecuación:

$$E_i = FA_{jm} * FE_{ijk}$$

En este caso se tiene:

- * Factor de actividad en términos distancia recorrida del vehículo de categoría vehicular (j) y tecnología (m), [km].
- * Factor de emisión en función de la tecnología vehicular para el contaminante (i), del vehículo de categoría vehicular (j), con tecnología (m), [g/km].

Para este vehículo que pertenece a la categoría "Vehículos de pasajeros", utiliza combustible diésel y es compatible con estándar Euro2, el factor de emisión para CO y material particulado corresponde a:

$$FE_{CO} = 0,296 \frac{gCO}{km}$$

$$FE_{MP_{2,5}} = 0,0548 \frac{gMP_{2,5}}{km}$$

Las emisiones estimadas para una distancia recorrida de 60 km corresponden a:

$$E_{CO} = 60km * \frac{0,296gCO}{km} = 17,76gCO$$

$$E_{MP_{2,5}} = 60km * \frac{0,0548gMP_{2,5}}{km} = 3,29gMP_{2,5}$$

Método Tier3:

En este método las emisiones totales están dadas por:

$$E_{Total} = E_{caliente} + E_{frío}$$

Teniendo en cuenta que solo se conoce el dato de velocidad, para este ejemplo sólo se estimarán las emisiones en caliente.

Emisiones en caliente:

$$E_{caliente} = D_{rj} * FE_{caliente(ijr)}$$

Donde:

Nota: Para la estimación de emisiones de una flota vehicular, generalmente se emplean las estadísticas de consumo de combustible disponibles.

D: distancia del vehículo conducida en vías tipo r, por el vehículo de categoría j, [km]

$FE_{\text{caliente}(ijr)}$: factor de emisión para el contaminante i, para el vehículo de categoría j, operado en vías tipo r, [g/km]

Los tipos de vías pueden ser urbana, rural o autopista.

Las emisiones en caliente son función de la velocidad (V), en este sentido para el factor de emisión tanto de CO como de MP se tiene:

$$FE = \frac{a + (c * V) + (e * V^2)}{1 + (b * V) + (d * V^2)} + \frac{f}{V}$$

Los coeficientes para CO son:

$$a = 9,00E^{-1} \quad b = 0 \quad c = -1,74E^{-2} \quad d = 0 \quad e = 8,77E^{-5} \quad f = 0$$

Los coeficientes para MP son:

$$a = 8,66E^{-2} \quad b = 0 \quad c = -1,424E^{-3} \quad d = 0 \quad e = 1,06E^{-5} \quad f = 0$$

$$FE_{CO} = \frac{9,00E^{-2} + (-1,74E^{-2} * 60) + (8,77E^{-5} * 60^2)}{1 + (0 * 60) + (0 * 60^2)} + \frac{0}{60} = 0,17gCO/km$$

$$FE_{MP} = \frac{8,66E^{-2} + (-1,42E^{-2} * 60) + (1,06E^{-5} * 60^2)}{1 + (0 * 60) + (0 * 60^2)} + \frac{0}{60} = 0,039gCO/km$$

$$E_{\text{caliente CO}} = 60km * \frac{0,17gCO}{km} = 10,3gCO$$

$$E_{\text{caliente MP}} = 60km * \frac{0,039gMP}{km} = 2,37gMP$$

4.3.2. PRUEBAS DE LABORATORIO

Dinámicas

Estas pruebas se realizan en un dinamómetro de chasis, en el caso de vehículos ligeros propulsados con motor de combustión interno ciclo Otto y motocicletas, o en un banco de pruebas para motores pesados, propulsados con motor ciclo diésel.

Este método determina las tasas básicas de emisión (TBE) mediante pruebas dinamométricas de chasis bajo ciertos ciclos de manejo. Posteriormente, se aplica un modelo de emisión que modifique estas TBE teniendo en cuenta las condiciones climáticas del sitio, las condiciones de tráfico vehicular y otras variables propias del lugar en estudio. Este es el método más utilizado a nivel mundial para el cálculo de las emisiones vehiculares (MAVDT, 2007b).

Figura 4.3. Ejemplo de dinamómetro de chasis



Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012

El mayor inconveniente de este método, es la baja muestra porcentual de vehículos analizados, principalmente por los costos asociados en tiempo y equipo que conlleva cada evaluación.

Adicionalmente, las tasas básicas de emisión que se determinan con este método, pueden variar en forma significativa entre diferentes regiones, principalmente por los ciclos de manejo y el rendimiento de los motores, lo cual cambia de país a país e incluso entre diferentes zonas de un mismo país.

Sin embargo, la utilización de modelos de emisión con TBE de otros países, se convierte en una mejor alternativa de estimación de emisiones de vehículos automotores en muchas ciudades donde no se cuenta con los recursos para hacer la prueba de chasis dinamoétrica (MAVDT, 2007b).

Para la determinación de las emisiones evaporativas, se emplea la cámara de pruebas de emisión (SHED, por sus siglas en inglés). En ésta se miden las emisiones que genera el vehículo, incluso estando estacionado y con el motor apagado. Esta cámara simula los ciclos día-noche o calor-frío (Minambiente, 2012).

Estáticas:

Las pruebas estáticas consisten en la medición de emisiones contaminantes a través del tubo de escape de los vehículos, es realizada en velocidad crucero y en marcha mínima o ralentí para los vehículos ciclo Otto y en condición de aceleración libre para los vehículos ciclo diésel, sin la aplicación externa de carga al motor y el vehículo operando en neutro. En Colombia es empleada como principal método para el control y seguimiento de las fuentes móviles y es realizada de forma periódica como requisito para la obtención del **certificado de revisión técnico-mecánica y de emisiones contaminantes**¹⁶, y en los operativos de revisión en vía realizados por la autoridad ambiental y la autoridad de tránsito.

Los equipos y procedimientos empleados para estas pruebas están establecidos en las normas técnicas colombianas y su realización debe ser llevada a cabo por un organismo debidamente acreditado por el IDEAM.

4.3.3. PRUEBAS EN RUTA

Las pruebas en ruta permiten realizar la medición directa de emisiones del tubo de escape, a través de sofisticados métodos analíticos que operan en tiempo real, con lo cual es posible también determinar los factores de emisión para diferentes categorías de una flota vehicular. Durante una prueba en ruta el vehículo se encuentra en condiciones reales de operación (SDA, 2009).

4.3.4. SENSORES REMOTOS

Son sistemas de medición de contaminantes, desarrollados para medir emisiones de los tubos de escape de vehículos en circulación (Gobierno del Distrito Federal de México, 2006). Un sensor remoto opera transmitiendo un haz de luz a través de una fracción de aire a ser analizado. Para esto, se ubica a un lado de la vía un transmisor (normalmente una fuente de radiación) y al otro lado de la vía el receptor. El sistema mide la pluma de los gases emitidos dejada por el vehículo y permite monitorear monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarburos totales (HC_T), monóxido de nitrógeno (NO) e hidrocarburos individuales (HC) (Minambiente, 2011).

La ventaja principal de este sistema de determinación de emisiones, es que permite la obtención rápida de resultados, la medición de un solo vehículo, tarda alrededor de un segundo, por lo que

Acreditación:
Procedimiento mediante el cual se reconoce la competencia técnica y la idoneidad de los organismos de certificación e inspección, laboratorios de ensayo y metrología.

16. Artículo 51 Ley 769 de 2002. Por la cual se expide el Código Nacional de Tránsito Terrestre y se dictan otras disposiciones. Modificado por el artículo 201 del Decreto 019 de 2012.

puede ser evaluada rápidamente la situación de un área determinada con relación a las emisiones de la flota vehicular; es ésta la razón por la cual su implementación ha ido aumentando en los últimos años en países como México (Gobierno del Distrito Federal de México, 2006).

Dentro de las desventajas de este método se pueden mencionar el desconocimiento del régimen del motor o el estado de mantenimiento de éste al momento de realizar la prueba (SDA, 2009).

4.3.5. MODELOS DE EMISIÓN

Teniendo en cuenta la complejidad que puede acarrear el desarrollo de un inventario de emisiones de fuentes móviles, a nivel mundial se han desarrollado modelos de emisión como herramienta para facilitar la estimación de emisiones, teniendo en cuenta la cantidad y calidad de información disponible, así como características propias de cada región.

Dentro de las ventajas de estos métodos se tiene su aproximación al valor real de emisión, gracias a la evolución de los mismos en el tiempo; lo cual constituye una herramienta fundamental para la toma de decisiones.

A continuación, se describen algunos de los modelos para estimación de emisiones generadas por fuentes móviles:

COPERT:

Es un *software* empleado a nivel mundial para calcular emisiones de transporte en carretera. COPERT (*computer programme to calculate emissions from road transport*), fue desarrollado por la Agencia Ambiental Europea, y permite el cálculo de emisiones a escala nacional, regional o local, para una resolución temporal anual, diaria e incluso desarrollos más recientes permiten el cálculo con resolución de una hora. COPERT ha sido desarrollado para preparar los inventarios de emisiones de los países miembros de la Unión Europea, sin embargo, ha sido empleado en muchos otros países como Chile y Colombia. La metodología empleada por este modelo hace parte de la *Guía de inventarios de emisiones contaminantes* de la EEA y es consistente con los lineamientos IPCC-2006 para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero. Dentro de las emisiones que se pueden estimar con este modelo se incluyen CO, NO_x, COV, MP, N₂O, NH₃, SO₂, especiación de COVNM, así como consumo de energía (EMISIA, 2014).

Además, de las emisiones vehiculares por operación, el modelo permite estimar emisiones por arranque en frío, emisiones evaporativas y aquellas por desgaste de neumáticos y frenos. Este modelo clasifica a los vehículos automotores según los estándares europeos (EURO I, EURO2, etc.). Cada estándar define la tecnología utilizada en los motores, en los equipos de control de emisiones y los combustibles. Al combinar la clasificación por tecnología, con la clasificación por tipo de vehículo (bus, automóvil, etc.), se obtienen más de 100 categorías (MAVDT, 2007b).

MOBILE:

La serie de modelos MOBILE fue desarrollada en Estados Unidos por la EPA, para realizar la estimación de factores de emisión en vehículos automotores a partir de los resultados de las pruebas estándar nacionales de chasis dinámico (FTP – *federal test procedure* y SFTP – *supplemental federal test procedure*). Emplea como variables información meteorológica, así como de circulación. Permite estimar los principales contaminantes emitidos por los vehículos automotores (CO, NO_x, SO_x, hidrocarburos), incluyendo un módulo especial para material particulado y compuestos orgánicos volátiles tóxicos y gases de efecto invernadero. Puede ser empleado a escala nacional o local con una resolución anual, mensual, diaria o estacional (EPA, 2016a).

Este modelo era empleado para el desarrollo de inventarios de emisiones en los diferentes estados americanos y sus planes de implementación y estimar las emisiones que alimentan

los diversos modelos de la EPA. Permite estimar tanto emisiones del tubo de escape como evaporativas.

Las últimas versiones desarrolladas (Mobile 6.0 y 6.2) incluyen un factor de deterioro de la flota vehicular, efectos de la velocidad y del azufre en la gasolina. Es importante tener en cuenta que los modelos Mobile ya no son apropiados para utilizar en los análisis regulatorios actuales en Estados Unidos ya que no tienen en cuenta las normas de emisión establecidas después de 2004. Este modelo ha sido reemplazado por el modelo MOVES (*motor vehicle emission simulator*). (EPA, 2004)

MOVES:

El simulador de emisiones de vehículos automotores MOVES (por sus siglas en inglés) fue desarrollado por la EPA y permite estimar emisiones generadas por fuentes móviles a nivel nacional, regional y de proyecto para gases de efecto invernadero, contaminantes criterio y compuestos tóxicos. Es utilizado para crear factores de emisión o inventarios de emisiones tanto para vehículos en vía como para vehículos fuera de la vía. El modelo permite ingresar información de los tipos de vehículos, periodos de tiempo, áreas geográficas, contaminantes, características de operación de los vehículos y tipo de vías para ser modeladas.

Permite la estimación del consumo de energía total, basado en petróleo y materiales fósiles y de emisiones de metano y óxido de nitrógeno para todas las fuentes de vía.

MOVES es una nueva generación de modelos que reemplazará eventualmente a los modelos MOBILE6 y NONROAD lo cual significa que este modelo cubre no sólo los vehículos en la vía sino también las fuentes fuera de ella.

Se espera que anualmente la EPA actualice la versión de estos nuevos modelos MOVES, agregando contaminantes del aire y fuentes de los mismos, así como actualizaciones de los datos necesarios para mejorar la precisión del modelo. MOVES no sólo provee las bases para futuras ediciones de modelos en cuanto al diseño del *software* y su interface, sino que además incorpora metodologías nuevas y caracterizaciones de datos para los vehículos en carretera y su actividad.

La versión más reciente es MOVES2014a, la cual realiza una serie de cálculos, que han sido cuidadosamente desarrollados para reflejar con precisión los procesos de operación de los vehículos, tales como arranque en frío, en recorrido o estacionado, y proporcionar estimaciones de las emisiones totales o las tasas de emisión por vehículo o por unidad de actividad (EPA, 2015b; EPA, 2016b).

IVE:

El **Modelo internacional de emisiones vehiculares** (IVE), por sus siglas en inglés, desarrollado por el Centro Internacional de Sistemas Sostenibles (ISSRC, por sus iniciales en inglés) y la Universidad de California en Riverside, permite estimar emisiones vehiculares para ayudar a las ciudades y regiones a: i) enfocar las estrategias de control y planeación del transporte hacia unas más efectivas, ii) predecir cómo las diferentes estrategias afectarán las emisiones locales, y iii) medir el progreso en la reducción de emisiones en el tiempo.

Permite estimar emisiones a nivel de proyecto y a escala regional y nacional, incluyendo para este último un módulo para gases causante del efecto invernadero. Se pueden modelar los siguientes contaminantes: CO, COV, NOX, PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂, N₂O, CH₄, NH₃, benceno, plomo, 1,3 butadienos, y aldehídos.

Se desarrolló especialmente para ser aplicado en países en vías de desarrollo, en los cuales existen condiciones de tráfico y tecnología vehicular diferentes a los demás países. Para esto, 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 del control de emisiones y de alimentación de combustible.

Así como también cuenta con una base de datos de valores por defecto de factores de emisión básicos resultado de estudios realizados por países que han suministrado esta información (Estados Unidos, la Unión Europea y Japón). Estos datos pueden ser modificados cuando se cuente con esta información a nivel local.

Los datos de entrada para el modelo IVE son: datos de la flota vehicular (*fleet file*), tasas básicas de emisión (TBE) locales para los diferentes tipos de contaminantes (si no existen se pueden utilizar los valores por defecto), distribución vehicular por año, servicio prestado y tecnología (300 categorías), proporción de vehículos con aire acondicionado (ISSRC, 2008; ISSRC, 2017).

FUENTES NATURALES

Una fuente natural es toda aquella que libera compuestos a la atmósfera como resultado de procesos biológicos tanto bióticos como abióticos, sin intervención directa del hombre. Estas incluyen, océanos, agua fresca, microorganismos presentes en el suelo, vegetación, biomasa quemada, relámpagos, seres vivos, entre otras (Velasco E, Bernabé R, 2004; Guenther, *et ál*, 2000). Sin embargo, hay otras fuentes naturales “influenciadas” por el hombre, como lo son los cultivos (Guenther *et ál*, 1995) o la cría de especies animales.

Las emisiones de origen natural no son emisiones contaminantes ya que estas hacen parte de los ciclos del planeta, “ayudan a regular la temperatura a escala global, propician el balance químico de la atmósfera y han determinado en gran medida la evolución de los ecosistemas” (Velasco E, Bernabé R, 2004).

A escala global, las emisiones naturales de óxido de nitrógeno (NO), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM) igualan e incluso pueden exceder las emisiones de origen antropogénico (Guenther, *et ál*, 2000). Otros compuestos emitidos por fuentes naturales incluyen, metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), compuestos azufrados, compuestos nitrogenados, hidrocarburos volátiles, compuestos oxigenados, entre otros.

Las emisiones biogénicas de COVNM juegan un papel importante en la química atmosférica debido a su alta reactividad con otros compuestos (como aquellos de origen antropogénico), ya que pueden actuar como precursores de contaminantes secundarios, como el ozono troposférico y aerosoles secundarios; y afectar la capacidad de auto limpieza de la atmósfera. Los compuestos orgánicos volátiles biogénicos (COVB) son típicamente más reactivos que los compuestos orgánicos volátiles de origen antropogénico y se ha estimado que su reactividad es de dos a tres veces la de sus homólogos generados por la combustión de gasolina. (Tsui *et ál*, 2009)

Es importante considerar este tipo de emisiones al desarrollar inventarios, pues permiten el desarrollo de estrategias de prevención o control de la contaminación efectivas, especialmente en aquellas zonas con afectaciones de origen fotoquímico. (Velasco E, Bernabé R, 2004).

Son también considerados como emisiones naturales algunos aerosoles biológicos como polvo de tierras erosionadas, sales marinas, fragmentos de plantas, polen, esporas, entre otros. Algunos de estos, pueden tener influencia en procesos como la formación de nubes y la dispersión de la luz (Velasco E, Bernabé R, 2004).

Algunas de las aplicaciones del desarrollo de inventarios de fuentes naturales, incluyen su utilidad como datos de entrada en modelos de calidad del aire y la consecuente evaluación de estrategias de control de la contaminación, permiten estimar los niveles mínimos de hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NO_x), sin presencia humana, en una región, así como para determinar las especies vegetales más adecuadas en planes de reforestación, selección de tipos de fertilizantes y especies de cultivo. También sirven para brindar información del comportamiento del ciclo del carbono con el objetivo de analizar su influencia en el calentamiento global (Velasco E, Bernabé R, 2004).

5.1. CLASIFICACIÓN DE FUENTES NATURALES

Las fuentes naturales se pueden dividir en dos grandes categorías: fuentes naturales biogénicas y fuentes naturales geogénicas o geotécnicas.

Fuentes naturales biogénicas: son las fuentes que emiten compuestos generados de procesos bióticos. Se presentan en todos los ecosistemas y procesos naturales, siendo la vegetación la fuente predominante de este tipo de emisiones. La actividad microbiana proveniente del suelo también se incluye en esta categoría, así como algunas actividades con intervención humana como la agricultura (Velasco E, Bernabé R, 2004; EPA, 1997).

Fuentes naturales geogénicas: aquellas que generan emisiones procedentes de procesos abióticos. Por ejemplo, filtraciones de aceites o gases naturales, erosión del suelo, actividades volcánicas, fumarolas, geiseres, relámpagos y en general actividades geotérmicas sobre la superficie terrestre, así como la quema de biomasa (Velasco E, Bernabé R, 2004; EPA, 1997).

No existe una clasificación estandarizada de fuentes naturales, sin embargo, a continuación, se muestran algunas empleadas a nivel internacional.

En la guía de inventarios de emisiones contaminantes al aire de la Agencia Ambiental Europea – EEA, del año 2016, se describe un capítulo para fuentes naturales, en el cual las clasifican en tres grandes grupos empleando la nomenclatura para el reporte (NFR, por sus siglas en inglés), como: volcanes, incendios forestales y otras fuentes naturales. A su vez estos capítulos incluyen una subclasificación que emplea la nomenclatura seleccionada para contaminación del aire (SNAP, por sus siglas en inglés) (EEA, 2016a). En la tabla 5.1 se muestra la clasificación propuesta por la guía europea.

Tabla 5.1. Clasificación de fuentes naturales Guía de inventarios de emisiones contaminantes al aire de la Agencia Ambiental Europea - EEA

CATEGORÍA			TÍTULO
Código NFR	Título	Código SNAP	Sectores, subsectores y actividades de emisión
11.A	Volcanes	1108	Volcanes
11.B	Incendios forestales	1103	Incendios forestales y de otros tipos de vegetación (inducidos por el hombre, naturales)
11.C	Otras fuentes	1101	Bosques manipulados y no manipulados (bosques caducifolios de coníferas manejados y sin manejar)
		1104	Pastos naturales y otra vegetación (pastizales naturales y otros tipos de vegetación, praderas, tundras, vegetación baja, matorrales)
		1105	Humedales y agua (humedales, pantanos drenados y sin drenar, terrenos inundables, ciénagas, lagos de profundidad menor a 2m).
		1107	Animales (termitas, mamíferos, otros)
		1109	Filtraciones geológicas
		1110	Relámpagos

Adaptado de EEA, 2016a

CATEGORÍA		TÍTULO
	110117, 110216	Suelos de bosques y pastizales (suelos de bosques de coníferas y caducifolios no manejados, de pastizales naturales y otra vegetación y de bosques de coníferas y caducifolios manejados)
	1121	Cambios en bosques y otras reservas de biomasa leñosa (bosques tropicales, bosques templados, bosques boreales, pastizales, otros).
	1122	Conversión de bosques y pastizales
	1123	Abandono de suelos manipulados
	1124	Emisiones de CO ₂ a partir de remoción de suelos
	1125	Otras

Por su parte en la compilación de factores de emisión AP-42 de la EPA, se cuenta con un capítulo de fuentes naturales (capítulo 14) el cual presenta factores de emisión de gases de efecto invernadero de las siguientes fuentes (EPA, 2016c):

Suelos: incluye suelos agrícolas y no agrícolas. Para estos últimos se presenta el factor de emisión en función del tipo de cobertura.

Termitas: presenta factores de emisión para metano (CH₄).

Relámpagos: presenta factores de emisión para NO_x.

Fermentación entérica: toma en cuenta las emisiones de metano producidas en los tactos digestivos de animales, especialmente los rumiantes.

Nota: como se ha mencionado anteriormente, para la estimación de gases de efecto invernadero se recomienda seguir los lineamientos del IPCC.

El AP-42 no incluye una categoría para vegetación, sin embargo, ésta si es empleada y tenida en cuenta para realizar inventarios de emisiones biogénicas.

5.1.1. FUENTES BIOGÉNICAS

A continuación, se presentan características de algunas fuentes biogénicas. Teniendo en cuenta que las emisiones de origen vegetal son las más representativas de esta categoría, se hará énfasis en la descripción de estas fuentes.

Las plantas, los microorganismos presentes en el suelo, así como los animales, emiten compuestos que son producidos como resultado de diferentes procesos bioquímicos y mecanismos metabólicos. (Velasco E, Bernabé R, 2004)

VEGETACIÓN

En los tejidos vegetales, se han identificado decenas de miles de compuestos orgánicos. Muchos de estos compuestos tienen muy baja volatilidad o son almacenados en estructuras de las plantas que presentan barreras sustanciales a la emisión, razón por la cual es probable que menos de 40 de estos compuestos, sean emitidos a tasas que influyan significativamente en la composición química de la atmósfera (Guenther, *et ál.*, 2000).

Dentro de estos compuestos se incluyen terpenoides (isopreno, monoterpenos), compuestos reactivos (compuestos de la familia del hexenal, alquenos, aldehídos, y ácidos orgánicos) y compuestos menos reactivos (alcoholes, cetonas y alcanos) (Guenther *et ál.*, 2000). De estos, quizás el de mayor interés sea el isopreno, pues es el que presenta mayores tasas de emisión en la vegetación.

Generalmente, al momento de realizar un inventario de emisiones biogénicas, es común agrupar los compuestos orgánicos volátiles biogénicos para facilitar su interpretación y análisis: así por ejemplo a partir del trabajo realizado por Guenther *et ál.*, 1995, estas especies químicas se suelen agrupar como isopreno, monoterpenos, otros compuestos orgánicos volátiles (OCOV), estos últimos algunas veces separados como compuestos orgánicos reactivos y otros compuestos orgánicos volátiles.

A continuación, se muestran algunos de los procesos asociados a las emisiones de COVB de origen vegetal.

Tabla 5.2. Procesos asociados a la generación compuestos orgánicos volátiles biogénicos (COVB) por la vegetación

COMPUESTO	PROCESO ASOCIADO	TEJIDO U ÓRGANO ASOCIADO	PAPEL
Isopreno, metilbutenol, α -pineno	Posible protección térmica	Cloroplastos	Acción enzimática como posible respuesta a incrementos de la temperatura ambiente
Monoterpenos, diterpenos y sesquiterpenos	Mecanismos de defensa	Tejidos especializados	Protección ante insectos y plagas
Etileno	Desarrollo y crecimiento	Tejidos especializados	Hormonas para regular el crecimiento y desarrollo de la planta
Etano, etanol, metil silicato, hexenal, etc.	Mecanismos de defensa	Tejidos no especializados	Protección ante enfermedades y animales herbívoros
Alquenos, alcoholes, ésteres, aromáticos, etc.	Polinización	Flores, Membranas	Atracción a insectos
Acetaldehído, hexenal, cetonas y metanol	Antibióticos	Hojas y raíz	Respuesta a daños a la membrana
Metanol, acetaldehído, etanol, formaldehído, acetona, ácido acético, ácido fórmico, etc.	Funciones vitales y conductancia estomática	-----	Indeterminado, posiblemente parte del metabolismo

Tomado de: Velasco E, Bernabé R, 2004.

De manera general, las emisiones de COVB provenientes de la vegetación están asociados a factores como la especie vegetal, su densidad foliar, la edad, así como la intensidad de luz, la temperatura, la humedad, situaciones que generen algún tipo de estrés sobre la planta (por ejemplo: estrés hídrico), procesos fisiológicos propios de la misma, entre otros.

No existe una única manera para clasificar la vegetación, pues esta catalogación es característica de cada región de estudio y depende de las especies presentes en la misma. En este sentido, la clasificación dependerá en gran medida de la información disponible.

Las herramientas principales para poder realizar esta clasificación son los inventarios forestales y los mapas de cobertura vegetal. Con estos es posible reconocer las formaciones o tipos de ecosistemas presentes en cada región.

La cobertura de la tierra, es la cobertura (bio) física que se observa sobre la superficie de la tierra, en un término amplio no solamente describe la vegetación y los elementos antrópicos existentes sobre la tierra, sino que también describen otras superficies terrestres como afloramientos rocosos y cuerpos de agua (IDEAM, 2014a).

Para Colombia se cuenta con el mapa de coberturas de la tierra a escala, 1:100.000, realizado por el IDEAM, obtenido mediante la adopción, adaptación y unificación para Colombia de la metodología CORINE Land Cover escala 1:100.000.

En este mapa de coberturas se presenta la información hasta cuatro niveles de detalle. Sin embargo, la caracterización de cada tipo de cobertura y el detalle de las especies típicas presentes en estas, así como su distribución, debe realizarse de manera independiente para cada área de estudio. Esta información puede ser obtenida de estudios específicos o a través de visitas de campo. En la tabla 5.3 se presentan las unidades de coberturas de la tierra para Colombia. Es importante aclarar que en el mapa de coberturas de la tierra para Colombia también se incluyen áreas artificializadas, las cuales no hacen parte de las fuentes biogénicas.

La descripción de estas coberturas está disponible en el documento *Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land cover adaptada para Colombia (IDEAM, 2010b)*.

Tabla 5.3. Unidades de coberturas de la tierra para Colombia para la leyenda nacional, escala 1:100.000

1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES
1.1. Zonas urbanizadas	3.1. Bosques
1.1.1. Tejido urbano continuo	3.1.1. Bosque denso
1.1.2. Tejido Urbano Discontinuo	3.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme
1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	3.1.1.1.2. Bosque denso alto inundable
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados.	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable
1.2.3. Zonas portuarias	3.1.2. Bosque abierto
1.2.4. Aeropuertos	3.1.2.1.1. Bosque abierto alto de tierra firme
1.2.5. Obras hidráulicas	3.1.2.1.2. Bosque abierto alto inundable
1.3. Zonas de extracción minera y escombreras	3.1.2.2.1. Bosque abierto bajo de tierra firme
1.3.1. Zonas de extracción minera	3.1.2.2.2. Bosque abierto bajo inundable
1.3.2. Zonas de disposición de residuos	3.1.3. Bosque fragmentado
1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	3.1.4. Bosque de galería y ripario
1.4.1. Zonas verdes urbanas	3.1.5. Plantación forestal
1.4.2. Instalaciones recreativas	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva.
	3.2.1.1. Herbazal denso
2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS	3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado
2.1. Cultivos transitorios	3.2.1.1.1.2. Herbazal denso de tierra firme arbolado
2.1.1. Otros cultivos transitorios	3.2.1.1.1.3. Con arbustos
2.1.2. Cereales	3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas	3.2.1.1.2.2. Herbazal denso inundable arbolado
2.1.4. Hortalizas	3.2.1.1.2.3. Arracachal
2.1.5. Tubérculos	3.2.1.1.2.4. Helechal
2.2. Cultivos permanentes	3.2.1.2. Herbazal abierto
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	3.2.1.2.1. Herbazal abierto arenoso
2.2.1.1. Otros cultivos permanentes herbáceos	3.2.1.2.2. Herbazal abierto rocoso
2.2.1.2. Caña	3.2.2.1. Arbustal denso
2.2.1.3. Plátano y banano	3.2.2.2. Arbustal abierto
2.2.1.4. Tabaco	3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
2.2.1.5. Papaya	3.3. Áreas abiertas, sin o con vegetación
2.2.1.6. Amapola	3.3.1. Zonas arenosas naturales
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	3.3.2. Afloramientos rocosos
2.2.2.1. Otros cultivos permanentes arbustivos	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
2.2.2.2. Café	3.3.4. Zonas quemadas
2.2.2.3. Cacao	3.3.5. Zonas glaciares y nivales
2.2.2.4. Viñedos	4. ÁREAS HÚMEDAS
2.2.2.5. Coca	4.1. Áreas húmedas continentales
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	4.1.1. Zonas pantanosas
2.2.3.1. Otros cultivos permanentes arbóreos	4.1.2. Turberas
2.2.3.2. Palma de aceite	4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
2.2.3.3. Cítricos	4.2. Áreas húmedas costeras
2.2.3.4. Mango	4.2.1. Pantanos costeros
2.2.4. Cultivos Agroforestales	4.2.2. Salitral
2.2.5. Cultivos confinados	4.2.3. Sedimentos expuestos en bajar
2.3. Pastos	5. SUPERFICIES DE AGUA
2.3.1. Pastos limpios	5.1. Aguas continentales
2.3.2. Pastos arbolados	5.1.1. Ríos (50m)
2.3.3. Pastos enmelezados	5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales
2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	5.1.3. Canales
2.4.1. Mosaico de cultivos	5.1.4. Cuerpos de aguas artificiales
2.4.2. Mosaicos de pastos y cultivos	5.2. Aguas marítimas
2.4.3. Mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales	5.2.1. Lagunas costeras
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	5.2.2. Mares y océanos
2.3.5. Mosaico de cultivos y espacios naturales	5.2.3. Estanques para acuicultura marina

Tomado de IDEAM, 2010b.

SUELOS

Los suelos son una fuente importante de óxidos de nitrógeno, debido a los procesos de nitrificación y desnitrificación que en ellos se generan gracias a la actividad microbiana presente en estos. Estos procesos se generan tanto en suelos de cultivo, como en ecosistemas naturales. Estas emisiones dependen de las características propias del suelo, así como de algunos factores de efectos de largo plazo como composición y la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, pH, los niveles de nitratos; y efectos de corto plazo como la humedad y la temperatura (Velasco E, Bernabé R, 2004; Guenther *et ál.*, 2000).

Otros compuestos como CO, COVNM (etano, eteno, propano, isopreno, metanol y formaldehído) también son producidos por microorganismos presentes en el suelo, sin embargo, otros microorganismos pueden metabolizar estos compuestos lo que hace que en muchos casos estos suelos sean un sumidero neto de estos compuestos. Los estudios sugieren que los suelos tienen una contribución pequeña de CO y COVNM a la atmósfera, por lo que generalmente se consideran despreciables estas emisiones (Guenther *et ál.*, 2000).

En general, las emisiones de NO_x provenientes de los suelos se pueden clasificar en dos grupos: las que provienen de suelos químicamente fertilizados y aquellas en donde los fertilizantes no se han utilizado. El NO_x emitido de los suelos con uso agrícola depende tanto de los fertilizantes utilizados como de la actividad desnitrificadora de los microorganismos en el mismo (MAVDT, 2007c).

Los ecosistemas naturales tienden a generar niveles moderados de flujos de NO_x, sin embargo, en aquellos suelos enriquecidos con nitrógeno, especialmente regiones agrícolas, pueden generar flujos de NO_x similares a aquellos producidos por fuentes antropogénicas. Las emisiones de NO_x provenientes del suelo pueden ser categorizadas en función del uso del suelo como, por ejemplo: bosques, cultivos agrícolas, vegetación urbana, pastos. (EEA, 2016g).

ANIMALES

En principio esta categoría incluye todos los animales, sin embargo, este tipo de emisiones biogénicas han sido poco estudiadas.

Se tienen en cuenta normalmente las emisiones de animales en estado salvaje, tanto aquellas generadas en los intestinos como las generadas en la excreta. En la guía europea de inventarios de emisiones de contaminantes al aire, se consideran las emisiones generadas por humanos como la respiración, el sudor, etc. Estas emisiones incluyen principalmente metano y amoníaco, aunque otros compuestos orgánicos volátiles como el isopreno, también están presentes, aunque a una tasa mucho menor, probablemente despreciable.

Los animales que se conocen como los mayores emisores de metano son los mamíferos, principalmente los rumiantes y roedores; y las termitas. De otro lado la descomposición de la úrea o ácido úrico en amoníaco proviene generalmente de mamíferos o aves.

Para un compuesto como el amoníaco que se deposita de forma bastante eficiente, puede ser considerado el efecto del dosel, ya que estos gases liberados por los animales pueden ser absorbidos de forma casi inmediata por el follaje de los árboles o el pasto incluso antes de alcanzar las capas bajas de la atmósfera (EEA, 2016h).

5.1.2. FUENTES GEOGÉNICAS

Como se mencionó anteriormente, esta categoría de fuentes naturales incluye las emisiones procedentes de los volcanes, relámpagos, fumarolas, geiseres, filtraciones gaseosas en la corteza terrestre, la quema de biomasa y demás actividades geotérmicas en la superficie terrestre.

Se estima que alrededor de 16% de del balance global de NO_x en la troposfera proviene de los suelos (EEA, 2016g).

Se estima que de las emisiones globales de amoníaco 4,8 % son generadas por humanos mientras que el 0,2 % proviene de animales salvajes. (EEA, 2016h)

El uso de madera como combustible es considerado una fuente de emisión antropogénica (Guenther *et ál.*, 2000)

Los principales compuestos emitidos por estas fuentes incluyen dióxido de azufre (SO_2), dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfhídrico (H_2S), mercurio (Hg), cloro (Cl), etano (C_2H_6), propano (C_3H_8) y COVNM y material particulado (Velasco E, Bernabé R, 2004).

En general, estas emisiones se generan a una tasa mucho menor que aquellas generadas por fuentes biogénicas, por lo que su papel en la fotoquímica de la troposfera no es muy significativo (Guenther et al., 2000), razón por la cual es poco común su inclusión en los inventarios de emisiones. Sin embargo, algunas de estas fuentes pueden llegar a superar en magnitud a las emisiones antropogénicas, como es el caso de las erupciones volcánicas (Velasco E, Bernabé R, 2004).

A continuación se describen de forma general algunas de estas fuentes.

INCENDIOS FORESTALES O QUEMA DE BIOMASA

Un incendio forestal es un proceso de combustión no controlada que consume grandes extensiones de terreno y de flora. Los incendios forestales pueden ser de origen natural ya sea por la caída de un rayo o intensa radiación solar; o de origen antropogénico con fines productivos o por descuido o negligencia (Velasco E, Bernabé R, 2004; MAVDT, 2007c). Aunque la quema de biomasa con fines agrícolas presenta un grado de intervención humana, es considerada como una fuente natural de emisiones.

De acuerdo con el IDEAM, “los incendios de la cobertura vegetal figuran como uno de los principales motores de transformación del ambiente y sus efectos se extienden sobre todos sus componentes: aire, suelo, agua, seres vivos, infraestructura, entre otros” (IDEAM, 2014b).

Los incendios forestales “se presentan de manera recurrente en gran parte del país, en especial durante los periodos secos prolongados, durante los cuales los ecosistemas tropicales húmedos y muy húmedos pierden parte de los contenidos de humedad superficial e interior, incrementando sus niveles de susceptibilidad y amenaza hacia la combustión de la biomasa vegetal que los compone” (IDEAM, 2014c). En Colombia se presentan dos temporadas secas anuales; en los meses de diciembre a marzo y en los meses de julio y agosto.

Los principales compuestos generados por la quema de biomasa son dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (H_2O), sin embargo, un gran número de partículas, incluyendo black carbon, y trazas de gases también son generados como resultado de la combustión incompleta, como por ejemplo monóxido de carbono, COVNM, compuestos de azufre y nitrógeno, entre otros (EEA, 2016i)

Las emisiones provenientes de incendios forestales dependen de la duración e intensidad del fuego, el área total quemada y el tipo y cantidad de vegetación quemada (EEA, 2016i).

RAYOS O RELÁMPAGOS

Un relámpago, es una descarga eléctrica de alto voltaje y temperatura que ocurre durante eventos de tormenta. Estas descargas “forman canales de ionización en la atmósfera, lo que provoca la disociación del nitrógeno molecular y su posterior reacción con oxígeno para formar óxidos de nitrógeno”, los cuales son precursores de ozono troposférico (EEA, 2016j; Velasco E, Bernabé R, 2004).

Las emisiones más relevantes corresponden a NO , N_2O y NO_2 . Sin embargo, la producción de N_2O proveniente de estas fuentes es relativamente pequeña en comparación con otras fuentes biogénicas y antropogénicas (EPA, 1996).

VOLCANES

El magma caliente contiene gases como dióxido de azufre, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, mercurio y cloro, los cuales pueden ser liberados cuando el magma se encuentra cerca de la

La producción global de NO_x proveniente de relámpagos se ha estimado en un rango de 3 a 5 tg N/año (EEA, 2016i)

superficie. Las emisiones provenientes de volcanes muestran una gran variación temporal y regional. Los volcanes liberan flujos considerables de gases y partículas a la atmósfera, tanto en procesos eruptivos como en los procesos de desgasificación no eruptivos de largo plazo.

Las emisiones de material particulado se pueden generar por: material piroclástico, condensación de gases volcánicos, transformación de partículas existentes o, reacciones a baja temperatura (EEA, 2016k).

5.2. INFORMACIÓN PARA FUENTES NATURALES

Para la realización de un inventario de emisiones atmosféricas provenientes de fuentes naturales, la información puede ser obtenida de diversas formas dependiendo de la fuente natural a inventariar. A continuación, se mencionan algunas:

Inventarios forestales	Mapas de cobertura de la tierra
Imágenes satelitales	Registros meteorológicos / estaciones meteorológicas
Bases de datos nacionales (uso de fertilizantes, cría de animales)	Campañas de campo
Registros de actividad volcánica	Registros agrícolas

5.3. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES EN FUENTES NATURALES

Para la estimación de inventarios de emisiones generadas por fuentes biogénicas, se debe contar con la siguiente información: parámetros ambientales, cobertura y distribución de especies, índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés), densidad de la biomasa, entre otras; y los factores o flujos de emisión característicos de cada especie vegetal.

PARÁMETROS AMBIENTALES

Los parámetros ambientales juegan un papel fundamental en la estimación de emisiones biogénicas, pues estas dependen en gran medida de factores como la temperatura y la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés).

Temperatura: para el cálculo de flujo de emisión de una especie característica, se emplea la temperatura de la hoja, la cual varía en función de la altura del dosel. Para el uso de modelos de estimación de emisiones, suele emplearse la temperatura promedio horaria para cada celda definida en el dominio de modelación. Este parámetro es función de la altitud sobre el nivel del mar.

Radiación fotosintéticamente activa (PAR): es una medida de la intensidad de radiación solar que llega a la superficie fotosintéticamente activa de la hoja. Comprende la radiación con una longitud

de onda entre 400 y 700 nm, también conocida como radiación visible, siendo ésta la que toman las plantas para su proceso de fotosíntesis. Se estima que aproximadamente el 79 % de esta radiación es captada por la vegetación (Velasco E, Bernabé R, 2004, Cárdenas P, 2012).

Para calcular la radiación fotosintéticamente activa (PAR) a lo largo del dosel se pueden emplear ecuaciones de modelo de dosel, como la propuesta por Lamb et ál., 1993, corregida por Geron et ál., 1995:

$$PAR(z) = PAR(b)_c \exp \left[-kLAI \left(\frac{z_i}{12} \right) \right] \quad (5.1)$$

Donde:

PAR(b) _c :	PAR en la parte superior del árbol [$\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$]
K:	0,60 coeficiente de extinción de la PAR
LAI:	índice de área foliar
i:	número de capa

(Adaptado de Velasco E, Bernabé R, 2004)

Cuando no es posible contar con la información de la radiación fotosintéticamente activa, suele emplearse información de la cobertura nubosa.

Otros parámetros meteorológicos que pueden complementar los modelos de estimación empleados son: velocidad del viento, humedad, índice de sequía (Cárdenas P, 2012).

INFORMACIÓN SOBRE LA COBERTURA O VEGETACIÓN

Con relación a la vegetación característica se requiere la siguiente información: tipo de bosque, principales especies, número de árboles por hectárea, diámetro promedio del tronco a la altura del pecho (DAP), altura promedio de las especies, densidad másica foliar (LMD, por sus siglas en inglés) e índice de área foliar (LAI).

La relación entre el área ocupada por los árboles y el área de la región (área arboles/área región), es adimensional y puede tener valores mayores o menores a uno. Si es mayor que 1, las copas de los árboles están traslapadas o se entrecruzan entre sí; mientras que si es menor que 1 los árboles están alejados unos de otros (Velasco E, Bernabé R, 2004; MAVDT, 2007c).

$$\text{Área árboles} = (\# \text{ árboles})(\text{Diámetro follaje})(\text{área región}) \quad (5.2)$$

El diámetro del follaje, se calcula a partir del diámetro promedio del tronco a la altura del pecho (DAP), empleando ecuaciones como las siguientes:

$$\text{Diámetro follaje coníferas} = 0,47 + 0,166\text{DAP}$$

$$\text{Diámetro follaje caducifolias} = 1,13 + 0,205\text{DAP}$$

Adaptado de Velasco E, Bernabé R, 2004.

Otro parámetro importante de la vegetación es la densidad de masa foliar (LMD), expresada en gramos de biomasa/ m^2 , la cual puede obtenerse por medición directa en campo o de inventarios forestales. Este parámetro es de gran importancia en regiones de latitudes medias y altas, ya que la densidad de masa foliar varía en función de las estaciones climatológicas del año. Cuando se requiera cuantificar esta variación, se recomienda utilizar el algoritmo de Lieth y Whittaker (1975),

que relaciona la producción de biomasa en función de la temperatura y la pluviometría media de la estación del año (Velasco E, Bernabé R, 2004, Cárdenas P, 2012).

El índice de área foliar (LAI) es otro parámetro importante a considerar dentro de las características de la vegetación. El LAI, expresa la relación del área proyectada por las hojas con respecto del área del suelo (área hojas/área suelo), siendo así un número adimensional. Este valor depende de la especie, la fenología y variables ambientales, pero de manera general, tanto para árboles de hoja ancha como para coníferas, varía de 1 a 10. El índice de área foliar describe también propiedades de la interacción entre la planta y la atmósfera en lo que se refiere a radiación, intercambio de gas, energía y momentum. En los casos en los que no se cuenta con esta información, es posible emplear valores de índice de área foliar publicados para la misma especie en otra región (Velasco E, Bernabé R, 2004, Cárdenas P, 2012).

5.3.1. FACTOR DE EMISIÓN

Tal como se ha visto en los capítulos anteriores, el método de estimación por factor de emisión relaciona un factor de emisión característico, en este caso de la especie vegetal, y un factor de actividad. Para fuentes biogénicas han sido ampliamente empleados los algoritmos propuestos por Guenther y sus colaboradores. A continuación, se presenta uno de los más utilizados y sencillos, el propuesto por Guenther et ál., 1995, el cual está dado por:

$$E = FE_{ij} * \rho * FA$$

(5.3)

Donde:

E:	emisiones totales
FE_{ij} :	factor de emisión del compuesto (i) [$\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$], para la especie (j) a una PAR de $1000\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ y una temperatura de la hoja de 303,15K
ρ :	densidad foliar [kg de material seco/ m^2]
FA:	factor de actividad adimensional que tiene en cuenta la influencia de la temperatura de la hoja y la PAR

En este sentido para la estimación de emisiones de isopreno las cuales presentan una fuerte dependencia a la PAR y la temperatura se tiene:

$$E = FE_{ij} * \rho * (C_L * C_T)$$

(5.4)

FE_{ij} :	Factor de emisión de isopreno [$\mu\text{gC}/\text{m}^2\text{h}$], para la especie (j) a una PAR de $1000\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ y una temperatura de la hoja de 303,15K
ρ :	Densidad foliar [kg de material seco/ m^2]
C_L :	Factor de corrección por PAR
C_T :	Factor de corrección por temperatura de la hoja

El factor de ajuste por luz es definido como:

$$C_L = \frac{\alpha C_{LI} PAR}{\sqrt{(1 + \alpha^2 PAR^2)}} \quad (5.5)$$

Donde:

α :	0,0027
C_{LI} :	1,066
PAR:	radiación fotosintéticamente activa, [$\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$]

α y CL_I son coeficientes empíricos.

El factor de ajuste por temperatura es definido como:

$$C_T = \frac{\exp\left(\frac{C_{T1}(T-T_s)}{RT_sT}\right)}{1 + \exp\left(\frac{C_{T2}(T-T_m)}{RT_sT}\right)} \quad (5.6)$$

Donde:

CT_1 :	95000 J/mol
T :	Temperatura de la hoja, [K]
T_s :	Temperatura de la hoja a condiciones estándar, 303 K
R :	Constante de los gases ideales, 8,314 J/mol K
CT_2 :	230000 J/mol
T_m :	314 K

α , CL_I , CT_1 , CT_2 y T_m son coeficientes empíricos "obtenidos a partir de ajustes no lineales de mediciones de índices de emisión en diversas especies vegetales" (Velasco E, Bernabé R, 2004).

De manera similar, para la estimación de monoterpenos y otros compuestos orgánicos biogénicos (OCOV), las cuales dependen de la temperatura, se tiene:

$$E = FE_{ij} * \rho * \exp[\beta(T - T_s)] \quad (5.7)$$

Donde:

FE_{ij} :	Factor de emisión para monoterpenos u OCOV (i) para la especie (j) [$\mu\text{gC}/\text{m}^2\text{h}$]
ρ :	Densidad foliar [kg de material seco/ m^2]
β :	Coeficiente empírico que establece la dependencia de la emisión con la temperatura, $0,09 \text{ K}^{-1}$
T:	Temperatura de la hoja, [K]
T_s :	Temperatura de la hoja a condiciones estándar, 303 K

Este factor de emisión “contempla las variaciones en las emisiones por el genotipo, la disponibilidad de nutrientes en el suelo, la fenología, la humedad relativa, la humedad foliar y el estrés de la planta” (Velasco E, Bernabé R, 2004).

Por otro lado, para la estimación de emisiones de NO, provenientes del suelo, se emplean con frecuencia las relaciones propuestas por Williams *et ál.*, 1992, las cuales muestran la dependencia de la temperatura y tipo de uso de suelo, como se muestra a continuación:

$$E = NO_0 * \exp[0,071(T - T_s)] \quad (5.8)$$

Donde:

E:	Emisión de NO [$\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$]
NO_0	Factor de emisión estandarizado a $T_s=303 \text{ K}$, asociado a una categoría de suelo
T:	Temperatura del suelo, [K]

5.1.1.1. TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE FLUJO DE EMISIONES

Existen diversas técnicas para estimar el flujo de emisiones proveniente de las fuentes biogénicas. Dependiendo de los recursos disponibles, la escala de observación y la calidad de la información que se desee obtener, una u otra técnica será la más adecuada. A continuación, se describen de manera global algunas de ellas.

- **Escala celular:** Son la base de los algoritmos de emisión de compuestos orgánicos volátiles biogénicos. Permiten simular en corto tiempo la variación en las emisiones de plantas no sometidas a ningún tipo de estrés (Guenther A, 2017).

Técnicas de encierro: consiste en introducir una rama del árbol o una porción de pasto, dentro de una bolsa de teflón o una cámara cerrada, posteriormente se hace pasar un flujo de aire libre de ozono e hidrocarburos y a la salida de la cámara este flujo es enviado a través de una bomba a cartuchos de vidrio empacados con materiales que permiten atrapar los compuestos orgánicos volátiles biogénicos. Estas muestras son trasladadas posteriormente al laboratorio para el acondicionamiento de la muestra y posterior análisis (Velasco E, Bernabé R, 2004).

- **Escala dosel:** flujos de compuestos orgánicos volátiles biogénicos a escala de dosel

Permiten estudiar variaciones a largo término y los eventos de estrés sobre las plantas, aunque hay pocos estudios al respecto. Permiten evaluar la variación temporal por horas y días; y estimar las emisiones a condiciones “estándar”. En este caso último caso, los modelos tienden a coincidir aproximadamente en un 50 % si la información de entrada del sitio específico está disponible. (Guenther A, 2017).

Flujos de turbulencia: cuantifica el flujo como el producto de las fluctuaciones en la concentración y en la vertical del viento. La información meteorológica se usa para determinar la difusividad turbulenta. Estas técnicas de flujo incluyen covarianza turbulenta, covarianza disjunta turbulenta, acumulación de turbulencia, de la acumulación disjunta turbulenta y acumulación turbulenta relajada.

Varianza: el flujo está relacionado con las fluctuaciones en la concentración.

Gradiente: el flujo está relacionado con el gradiente de concentración en vertical.

Balance de masas: el flujo está relacionado con la concentración o el cambio de ésta. Se debe definir una región de estudio y después caracterizar todos los procesos que puedan influenciar la concentración dentro del dominio.

Cabe mencionar que algunas de estas técnicas también pueden ser empleadas a otra escala.

Figura 5.1. Torres de medición de emisiones biogénicas



Tomado de Guenther A, 2017

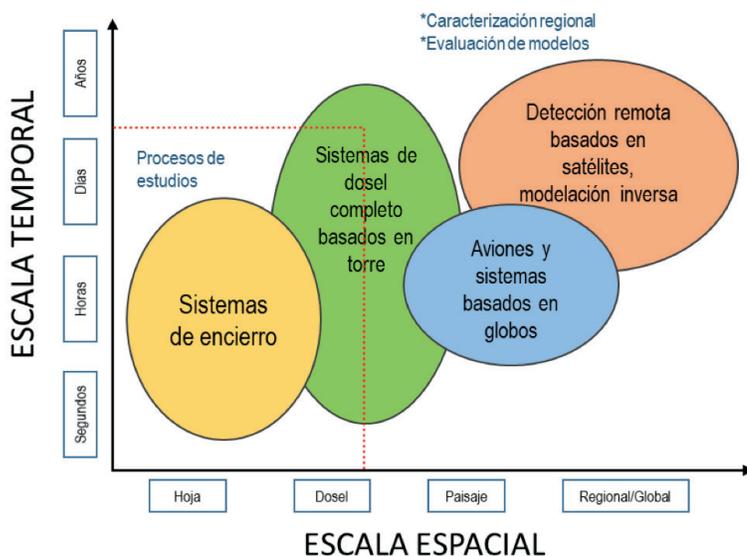
- **Escala regional:** interacción de las emisiones, dinámica y química

Esta técnica permite caracterizar la distribución de los factores de emisión. Se emplean aviones equipados con sistemas de medición de flujos de Eddy PTRMS¹⁷ (espectrómetro de masas por reacción de transferencia de protones). Se ha encontrado concordancia entre el promedio de emisiones observado y el estimado por modelos como el modelo de emisiones de gases y aerosoles de la naturaleza (MEGAN, por su sigla en inglés) (Guenther A, 2017).

- **Escala global:** Se emplean datos satelitales. Permiten cuantificar las variaciones de las emisiones desde regionales a globales y por estaciones o anuales.

Teniendo en cuenta que, para regiones como Colombia, la aplicación de este tipo de técnicas en estudios puntuales hasta ahora está iniciando y no se cuenta con información disponible a nivel local, para la estimación de inventarios de emisiones se emplean factores de emisión de especies con similares características a las presentes en el país.

Figura 5.2. Relación espacio-temporal y herramientas para la estimación de flujos de emisiones
(Traducida y adaptada de Guenther A, 2017)



5.3.2. MODELOS

Algunos de los métodos de estimación de emisiones biogénicas se basan en *software* de modelación, los cuales emplean bases de datos de factores de emisión para los diferentes compuestos, asociados a diferentes especies vegetales. A continuación, se describen algunos de los modelos empleados actualmente.

GLOBEIS (*Global Biosphere Emission and Intereaction System*):

Es un modelo de tercera generación, es decir, está diseñado para ser utilizado conjuntamente con modelos fotoquímicos, además de emplear sistemas de información geográfica. Fue desarrollado por la EPA y el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas -NCAR. Este modelo calcula las emisiones biogénicas de isopreno, monoterpenos totales, otros compuestos orgánicos volátiles (COV), así como las emisiones de los suelos de monóxido de nitrógeno (NO) y amoníaco (NH₃) del suelo para cualquier escala y dominio, y tiene la habilidad de modelar periodos prolongados de sequía y altas temperaturas (Cárdenas P, 2012).

Este modelo no contará con más desarrollos, pues será reemplazado totalmente por el modelo MEGAN.

BEIS 3 (*Biogenic Emission Inventory System*):

Diseñado por la EPA, su primer desarrollo fue en 1988 para estimar emisiones de compuestos orgánicos volátiles de la vegetación y emisiones de NO de los suelos. Este modelo fue concebido para ser empleado como parte del modelo de emisiones SMOKE (*Sparse Matrix Operator Kernel Emissions*) y ser integrado dentro del sistema regulatorio/académico de modelación de calidad del aire CMAQ (*Community Multiscale Air Quality*). BEIS3 calcula las emisiones de hasta 34 COV y NO del suelo, lo que permite utilizarlo en diversos modelos de mecanismos fotoquímicos (Velasco E, Bernabé R, 2004).

MEGAN (*Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature*):

Es un modelo de emisiones global para estimar las emisiones netas de gases y aerosoles de los ecosistemas terrestres a la atmósfera. Está diseñado para modelación de emisiones a nivel global y regional con una resolución espacial de $\sim 1 \text{ km}^2$ o menos. La versión 2.1 de este modelo incluye emisiones de 150 especies químicas, agrupadas en 20 categorías de acuerdo a la variación de las emisiones en respuesta a los cambios de las condiciones ambientales. De igual forma, puede presentar resultados de compuestos individuales o por categorías. Las variables manejadas en MEGAN incluyen cobertura de la tierra, clima y composición química atmosférica. Las emisiones estimadas pueden ser empleadas para alimentar modelos como CMAQ (Guenther *et ál.*, 2014).

BIBLIOGRAFÍA

- ACCEFYN (2003). Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Física y Naturales. Factores de emisión de los combustibles colombianos. Informe final presentado a la UPME. Bogotá, D.C.
- AMVA (2017). Medellín, Antioquia. Área Metropolitana del Valle De Aburrá. Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá, actualización 2015. Convenio de Asociación No. C.A. 335 de 2016. Informe de avance febrero de 2017.
- Amy, Alexander; Burklin, Clint; Singleton, Amanda (2006). LandGEM: Landfill Gas Emissions Model. Version 3.02: United States: EPA, 2006. 56 p.
- Cárdenas Paula (2012). Desarrollo de un inventario geo-referenciado de emisiones biogénicas para el dominio de modelación meso-escala de Bogotá. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C.
- COLOMBIA. Congreso de Colombia (2002). Ley 769 de 2002. Por la cual se expide el Código Nacional de Tránsito Terrestre y se dictan otras disposiciones.
- COLOMBIA. Congreso de Colombia (2004). Ley 905 de 2004. Por medio de la cual se modifica la ley 590 de 2000 sobre promoción del desarrollo de la micro, pequeña y mediana empresa colombiana y se dictan otras disposiciones.
- COLOMBIA. Congreso de Colombia (2011). Ley 1450 de 2011. Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014.
- CONAMA (2009). Comisión Nacional del Medio Ambiente de Chile. Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Fuentes Fijas y Móviles en el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. Santiago de Chile.
- DAGMA (2012). Santiago de Cali, Valle del Cauca. Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente. Fortalecimiento Tecnológico de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire y evaluación de la contaminación atmosférica de la ciudad de Santiago de Cali. Santiago de Cali.
- DANE (2012). Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Clasificación industrial internacional uniforme de todas las actividades económicas: Revisión 4 adaptada para Colombia CIU. Rev. 4 A.C. Bogotá, D.C.: DANE, 2012. 497 p.
- DANE (2016). Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Encuesta Anual Manufacturera -EAM 2014 / Boletín técnico. Bogotá, D.C., DANE, 2016. 32 p.
- DNP 2017. Colombia. Departamento Nacional de Planeación. Presentación: Costos en salud asociados a la Degradación Ambiental.
- EEA (2016a) European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. Technical guidance to prepare national emission inventories. Luxembourg. No. 12. ISBN 978-92-9213-806-6. ISSN: 1977-8449.
- EEA (2016b) European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. 6. Inventory management, improvement and QA/QC. Luxembourg. No. 21. ISBN 978-92-9213-806-6. ISSN: 1977-8449.
- EEA (2016c). European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. Part B. 1.A.2 Manufacturing industries and construction. Luxembourg. No. 21. ISBN 978-92-9213-806-6. ISSN: 1977-8449.
- EEA (2016d). European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. Part B. 1.A.3.b.i-iv Road Transport. Luxembourg. No. 21. ISBN 978-92-9213-806-6. ISSN: 1977-8449.
- EEA (2016e) European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. Part B. 1.A.3.b.v Gasoline Evaporation. Luxembourg. No. 21. ISBN 978-92-9213-806-6. ISSN: 1977-8449.
- EEA (2016f). European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook

2016. Part B. I.A.3.b.vii Road tyre and break wear. Luxembourg. No. 21. ISBN 978-92-9213-806-6. ISSN: 1977-8449.

- EEA (2016g). European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 part B. II.C Other natural sources, B110117 Forest & grassland soils 2016. Luxembourg. No. 21. ISBN 978-92-9213-806-6. ISSN: 1977-8449.
- EEA (2016h). European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. Part B. II.C Other natural sources and sinks B1107 Animals 2016. Luxembourg. No. 21. ISBN 978-92-9213-806-6. ISSN: 1977-8449.
- EEA (2016i). European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. Part B. II.B Forest fires 2016. Luxembourg. No. 21. ISBN 978-92-9213-806-6. ISSN: 1977-8449.
- EEA (2016j). European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. Part B. II.C Other natural sources B11000 Lightning 2016. Luxembourg. No. 21. ISBN 978-92-9213-806-6. ISSN: 1977-8449.
- EEA (2016k). European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. Part B. II.A Volcanoes 2016. Luxembourg. No. 21. ISBN 978-92-9213-806-6. ISSN: 1977-8449.
- EMISIA (2014). Emisia Mission for Environment. COPERT. Disponible en [<http://emisiamission.com/products/copert/>]. Consultado en 27-07-2017.
- EPA (1995). United States. Environmental Protection Agency. Introduction to AP 42, Volume I, Fifth edition. 10 p.
- EPA (1996). United States. Environmental Protection Agency. Report on revisions to 5th edition AP-42, Section 14.3, Lightning. 5p.
- EPA (1997). United States. Environmental Protection Agency. Emission Inventory Improvement Program (EIIP), volume V. Biogenic sources. Preferred and alternatives methods. U.S. Environmental Protection Agency.
- EPA (1999a). United States. Environmental Protection Agency. Handbook for criteria pollutant inventory development: A beginner's guide for point and area sources. United States: Office of Air Quality Planning and Standards.
- EPA (1999b). United States. Environmental Protection Agency. User's Guide to TANKS: Storage Tank Emissions Calculation Software. Version 4.0. United States. 87 p.
- EPA (2001). United States. Environmental Protection Agency. User's Guide for Water9 Software: Version 2.0.0. United States. 189 p.
- EPA (2003). United States. Environmental Protection Agency. PM Calculator: User's Manual. United States: EPA, 2003. 36 p.
- EPA (2004). United States. Environmental Protection Agency. Technical Guidance on the Use of MOBILE6.2 for Emission Inventory Preparation. United States: EPA, 2004. 82 p.
- EPA (2015a). United States. Environmental Protection Agency. AP 42, Fifth Edition, Volume I. Chapter 5: Petroleum Industry, Section 5.1 Petroleum Refining. 21p.
- EPA (2015b). United States. Environmental Protection Agency. MOVES2014a User Guide. EPA-420-B-15-095. 266p.
- EPA (2016a). United States. Environmental Protection Agency. Description and History of the MOBILE Highway Vehicle Emission Factor Model. Disponible en [<https://www.epa.gov/moves/description-and-history-mobile-highway-vehicle-emission-factor-model>]. Consultado el 27-07-2017.
- EPA (2016b). United States. Environmental Protection Agency. MOVES and Other Mobile Source Emissions Models. Disponible en [<https://www.epa.gov/moves>]. Consultado en 27-07-2017.
- EPA (2016c). United States. Environmental Protection Agency. AP 42, Fifth Edition, Volume I, Chapter 14: Greenhouse Gas Biogenic Sources. Disponible en [<https://www3.epa.gov/ttn/chiefs/ap42/ch14/>]. Consultado el 27-08-2017.
- EPA (2017a). United States. Environmental Protection Agency. Toxics Release Inventory (TRI) Program.

Disponible en [<https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program/learn-about-toxics-release-inventory>]. Consultado el 28-03-2017.

- EPA (2017b). United States. Environmental Protection Agency. TRI-Listed Chemicals, Disponible [<https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program/tri-listed-chemicals>]. Consultado el 28-03-2017.
- Guenther A, Hewitt C.N, Erickson D, Fall R, Geron C, Graedel T, Harley P, Klinger L, Lerdau M, Mckay W.A, Pierce T, Scholes B, Steinbrecher R, Tallamraju R, Taylor J, Zimmerman P, (1995). A global model of natural volatile organic compound emissions. *Journal of Geophysical Research*, 100, (D5), 8873–8892.
- Guenther A, Geron C, Pierce T, Lamb B, Harley P, Fall R (2000). Natural emissions of non-methane volatile organic compounds, carbon monoxide, and oxides of nitrogen from North America. *Atmospheric Environment*, 34, 2205 - 2230.
- Guenther A, Jiang X, Duhi T, Sakulyanontvittaya T, Jhonson J, Wang X (2014). MEGAN version 2.10 User's Guide. Washington State University.
- Guenther A (2017). Presentación Curso: Emisiones de compuestos orgánicos volátiles biogénicos (COVB) y su impacto sobre la calidad del aire y el clima. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales (15 al 17 de agosto 2017).
- IDEAM (2010a). Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM. Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2007 – 2010. Bogotá, D.C.: IDEAM, 2012. 311 p. ISBN: 978-958-8067-56-8.
- IDEAM (2010b). Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE LAnd Cover adaptada para Colombia Escala 1:100000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p.
- IDEAM (2014a). Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM. Coberturas de la tierra. Disponible en [<http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra>]. Consultado en 28-08-2017.
- IDEAM (2014b). Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM. Zonificación del riesgo a incendios. Disponible en [<http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/zonificacion-del-riesgo-a-incendios>]. Consultado en 28-08-2017.
- IDEAM (2014c). Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM. Incendios de la cobertura vegetal. Disponible en [<http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/incendios-cobertura-vegetal>]. Consultado en 28-08-2017.
- Colombia. IDEAM, MINAMBIENTE, DNP, CANCELLERÍA y PNUD, (2015). Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero (GEI) de Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de Colombia. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM. Bogotá, Colombia.
- ICCT (2014). International Council on Clean Transportation. Blumberg K; Possada F; Miller J. Actualización de la NOM-044. Información para la toma de decisiones. Traducido por: Garibay V y Fernandez R.
- ISSRC (2008). International Sustainable Systems Research Center. Manual del Usuario del Modelo IVE. Versión 2.0.
- ISSRC (2017). International Sustainable Systems Research Center. International vehicle emission model. Disponible en [<http://www.issrc.org/>] Consultado en 27-07-2017.
- López, Cristina; Sánchez, Mónica (2007). Diagnóstico de las centrales termoeléctricas en Colombia y evaluación de alternativas tecnológicas para el cumplimiento de la norma de emisión de fuentes fijas. Trabajo de grado (Ingeniera Ambiental y Sanitaria). Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Universidad de la Salle. Bogotá. D.C.
- Márquez, Manuel. (2005). Combustión y quemadores. España: MARCOMBO S.A.5 p. ISBN: 84-267-1364-5.
- MAVDT (2007a). Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Manual de inventario de fuentes puntuales. Documento desarrollado en el marco del contrato FONADE 2070389. Sin editar.

- MAVDT (2007b). Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Manual de inventario de fuentes móviles. Documento desarrollado en el marco del contrato FONADE 2070389. Sin editar.
- MAVDT (2007c). Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Manual de inventario de fuentes naturales. Documento desarrollado en el marco del contrato FONADE 2070389. Sin editar.
- MAVDT (2008a). Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 909 de 2008. Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones.
- MAVDT (2008b). Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 910 de 2008. Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones.
- MAVDT (2010a) Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire. Bogotá, D.C.: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010. 48p.
- MAVDT (2010b) Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial -MAVDT. Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas. Versión 2.0. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010. 99 p.
- Mayer, Ludwig (1987). Métodos de la industria química en esquemas de flujo en colores: una visión panorámica y moderna de los métodos de la industria química. 1 ed. Barcelona: Reverté. S.A. 1987. 159 p. ISBN 84-291-7962-3.
- México. Gobierno del Distrito Federal (2002). Inventario de emisiones atmosféricas de la Zona Metropolitana del Valle de México. México: Gobierno del Distrito Federal. 309 p.
- México. Gobierno del Distrito Federal. Campañas de Monitoreo Ambiental a Distancia de Vehículos. México D.F. 2006. 69 p.
- Minambiente (2011). Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Universidad Nacional de Colombia. Evaluation of methods and equipment to measure vehicular emissions through static testing and determination of maximum permissible limits for mobile sources... Bogotá D.C. 2011. 85 p.
- Minambiente (2012). Colombia. Estudio de pre factibilidad y diseño para un centro de homologación de vehículos (VHC) en Colombia. Documento 1.3. Descripción básica de un CHV (V 1.0).
- Minambiente (2013). COLOMBIA. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 1111 de 2013. Por la cual se modifica la Resolución 910 de 2008.
- Minambiente (2015). COLOMBIA. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Decreto 1076 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Mintransporte (2015). Colombia. Ministerio de Transporte de Colombia. Transporte en cifra. Estadísticas 2015. Bogotá, Colombia: Ministerio de Transporte.
- Mintransporte (2016). Colombia. Ministerio de Transporte de Colombia. Guía de Cambio Climático para la movilidad urbana. Bogotá, Colombia: Ministerio de Transporte.
- NCGA (2005). North Carolina General Assembly. North Carolina General Statute, Chapter 95, Article 7A y 7B. Uniform Boiler and Pressure Vessel Act of North Carolina. North Carolina: General Assembly, 2005. 52 p.
- Radian International LLC (2006). Manuales del programa de inventarios de emisiones de México: Desarrollo del inventario de fuentes puntuales. Sacramento: Radian International LLC. 181 p.
- Junta de Andalucía (2007). Andalucía. Plan Andaluz de acción por el clima 2007-2012. ISBN: 978-84-96776-33-3. 147 p. Andalucía, España.
- RUNT (2016). Registro Único Nacional de Tránsito. Informe Parque Automotor Registrado en el RUNT con corte a enero 2016 Disponible en [<http://www.runt.com.co>]. Consultado en 23-02-2016.

- RUNT (2017). Registro Único Nacional de Tránsito. ¿Qué es el RUNT?, disponible en: [<http://www.runt.com.co/portel/libreria/php/01.160101.html?dif=34f8e383edfcbe5443cc9cbe18cafe1d>]. Consultado [6-6-2017]
- SDA (2009). Bogotá D.C. Secretaría Distrital de Ambiente. Elementos técnicos del Plan decenal de descontaminación de Bogotá. Parte 2: Inventario de Emisiones Provenientes de Fuentes Fijas y Móviles. Bogotá D.C.
- SDA (2014). Bogotá D.C. Secretaría Distrital de Ambiente. Programa de filtros de partículas diésel para Bogotá – BDPF. Documento técnico de soporte. Alcaldía Mayor de Bogotá. Bogotá D.C.
- SDA (2015). Bogotá D.C. Secretaría Distrital de Ambiente. Actualización del Inventario de Emisiones para Bogotá a 2012. Resumen Técnico. Bogotá D.C.
- SEMARNAT (2005). México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Guía de elaboración de inventarios de emisiones. Primera edición. México: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). 2005. 508 p. ISBN: 968-817-569-2.
- Thompson, Moses (1981). GTZ Método ZOPP: Planificación de proyectos por objetivos.
- Tsui J,K-Y, Guenther A, Yip W-K, Chen F (2009). A biogenic volatile organic compound emission inventory for Hong Kong, Atmospheric environment, 43, 6442-6448.
- UPB (2010). Universidad Pontificia Bolivariana. Optimización del inventario de emisiones atmosféricas. Informe final. Convenio de Asociación No. 543 de 2008. Área Metropolitana del Valle de Aburrá: Universidad Pontificia Bolivariana, 2010.
- UE (2013). Parlamento Europeo y del Consejo. Reglamento (UE) No. 168/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de enero de 2013. Relativo a la homologación de los vehículos de dos o tres ruedas y los cuatriciclos, y a la vigilancia del mercado de dichos vehículos. Diario Oficial de la Unión Europea 2.3.2013. Pág. L.60/52 - L.60/128.
- USA (2004). Federal Register: Part II. Environmental Protection Agency. 40 CFR Parts 9, 86, 90, and 1051 Control of Emissions from Highway Motorcycles; Final Rule; Federal Register Vol. 69, No. 10, January 15, 2004. Pag. 2398-2444.
- Van Wylen, G. Sonntag, Richard. Borgnakke, Claus. (2003). Fundamentos de Termodinámica. 2 ed. México: Limusa Wiley.
- Velasco, Erik, Bernabé, Rosa María (2004). Emisiones biogénicas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). 2004. 94 p. ISBN: 968-817-699-0.
- Williams E, Guenther A, Fehsenfeld F (1992). An inventory of nitric oxide emissions from soils in the United States. Journal of Geophysical Research, 97, 7511-7519.

GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DE
**INVENTARIOS DE
EMISIONES ATMOSFÉRICAS**



MINAMBIENTE



GOBIERNO DE COLOMBIA
